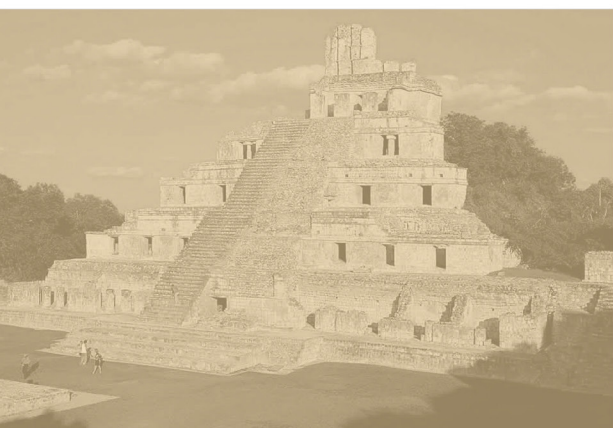
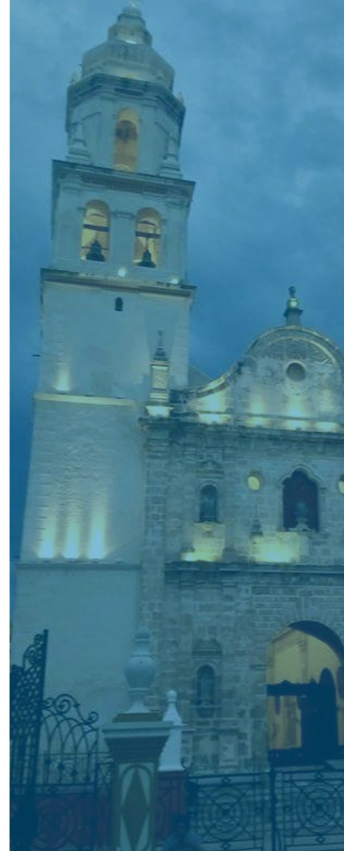


IX CONGRESO NACIONAL ALCONPAT 2020

San Fco. de Campeche, Campeche, México
Universidad Autónoma de Campeche
26 al 28 de octubre de 2020



UAC

Universidad Autónoma de Campeche

"Del enigma sin albas a triángulos de luz"



55 Aniversario
1965-2020
Universidad Autónoma de Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



IX Congreso Nacional ALCONPAT 2020

MEMORIAS

*Tezozomoc Pérez López, Josefá de los Ángeles Paat Estrella,
Francisco Barrera y Gabriela Patricia Aldana Narváez*
editores

Universidad Autónoma de Campeche

Mtro. José Román Ruíz Carrillo

Rector

Mtro. Fernando Medina Blum

Secretario General

Mtro. Juan Carlos Limón López

Director General de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería

M. en I. Manuel Guadalupe Estrada Segovia

Director

CICORR

Dr. Jorge Antonio González Sánchez

Jefe de División Académica

Comité Directivo

Dr. Pedro Castro Borges (CINVESTAV Mérida)

Dr. Andrés Torres Acosta (ITESM Querétaro)

Dr. Demetrio Nieves Mendoza (Universidad Veracruzana)

Dr. Facundo Almeraya Calderón (FIME UANL)

Dr. José Castañeda Ávila (Universidad Autónoma de Chihuahua)

Dr. Erick Maldonado Bandala (Universidad Veracruzana)

Dr. Carlos Barrios Durstewits (Universidad Autónoma de Sinaloa)

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel (FIME UANL)

Dr. Francisco Olguín Coca (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo)

Dr. Francisco Alonso Farrera (Universidad Autónoma de Chiapas)

Comité Organizador

Dr. Tezozomoc Pérez López (CICORR-Universidad Autónoma de Campeche)

Presidente

M. en C. Josefa de los Ángeles Paat Estrella (FCQB-Universidad Autónoma de Campeche)

Secretaria

Mtro. Francisco Barrera Lao (FI-Universidad Autónoma de Campeche)

Vocal

Mtra. Gabriela Patricia Aldana Narváez (FI-Universidad Autónoma de Campeche)

Vocal

Mtra. Andrea del Rosario Cruz y Cruz

Vocal

Dr. Román Alberto Canul Turriza

Vocal

Comité de imagen institucional

Lic. Glendy Escalante López (Dirección de Comunicación Social Universidad Autónoma de Campeche)

Mtra. Nancy Georgina Ortiz Cuevas (Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Campeche)

Comité Científico

Dr. Pedro Castro Borges (CINVESTAV Mérida)

Dr. Andrés Torres Acosta (ITESM Querétaro)

Dr. Demetrio Nieves Mendoza (Universidad Veracruzana)

Dr. Facundo Almeraya Calderón (FIME UANL)

Dr. José Castañeda Ávila (Universidad Autónoma de Chihuahua)

Dr. Erick Maldonado Bandala (Universidad Veracruzana)

Dr. Carlos Barrios Durstewitz (Universidad Autónoma de Sinaloa)

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel (FIME UANL)

Dr. Francisco Olguín Coca (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo)

Dr. Francisco Alonso Farrera (Universidad Autónoma de Chiapas)

Dra. Elia Mercedes Alonso (UMSNH)

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio (FIME UANL)

Dr. Iván Escalante García (CINVESTAV Unidad Saltillo)

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
San Francisco de Campeche, Campeche



Comité de diseño y desarrollo de página web

Julio A. Gutiérrez González, Facultad de Ingeniería UACAM

Apoyo Técnico

L. I. Luis Joaquín Uribe Gutiérrez

Dirección General de Tecnologías Información

Comité Técnico

Dr. Miguel Ramón Sosa Baz

Mtra. Diana Concepción Mex Álvarez

Mtro. José Ramón Cab Chan

Mtra. Luz María Hernández Cruz

Formación y edición de las memorias

M. en E. Jorge Gutiérrez Lara, Intituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche

Diseño de la portada

LDG. Juan Manuel Matñu Fierros, Intituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche



UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



Pérez López, T., Paat Estrella, J.Á., Barrera F., y Aldana Narváez, G.P. 2020. Memorias IX Congreso Nacional ALCONPAT 2020. Universidad Autónoma de Campeche, ALCONPAT 484 p.
doi 10.26359/ALCONPAT2020

© Centro Investigación de Corrosión Universidad Autónoma de Campeche

© ALCONPAT

doi 10.26359/ALCONPAT2020

Contenido

Presentación

Carbonation Effect on the Chloride Profile	7
C. Andrade1 y P. Castro	

Análisis del comportamiento de Isla de Calor Urbana Superficial en ciudades Puerto de México con clima cálido húmedo durante el COVID19	17
E.Limón-Yedra, E.Alonso-Guzmán, J.Santamaria-López, R.Grajeda-Rosado	

MATERIALES Y NANOMATERIALES

Evaluación del desempeño mecánico de concretos celulares autoclaveados para la elaboración de paneles ligeros	27
F.A. Alonso Farrera, I.A. Samayoa Aquino, J.F. Grajales Marín, M. Nazar Beutelspacher	

Desempeño por ductilidad de compuestos cementantes ingenierizados reforzados hibridamente con fibras de PVA, basalto y vidrio	35
M. Cabrera-Leal, A. Durán-Herrera	

Desempeño de un geopolímero a base de ceniza volante clase F con aditivos superplastificantes	51
S. Castro-Germánico, I. Flores-Vivián	

Mitigación de uso de aires acondicionados en edificaciones mediante la implementación de VO₂/MWNTCS como PCM incorporado en matrices de yeso	65
C. Y. Fragoso F., M. Z. Figueroa -Torres, J. R. Gonzalez-López, A.A. Zaldívar-Cadena, A. Toxqui -Terán	

Funcionalización de cementantes alternativos y comerciales por adición de SiO-TiO₂ y su evaluación fotocatalítica en la degradación de contaminantes en agua y aire	77
B. G. Esquivel-Alonso, I. Juárez-Ramírez, Isaías, A. Martínez-de la Cruz ⁷	

Síntesis de nanozeolita y su efecto como sustituto parcial del precursor de un geopolímero a base de metacaolín	91
M. López Morales, I. Flores-Vivián, G. Fajardo San Miguel	

Tratamientos superficiales con nanomateriales para la conservación de mampostería de arcilla cocida: Evaluación <i>in-situ</i> y en laboratorio	103
M. Neri-Álvarez, G. Fajardo-San Miguel, D. Cruz-Moreno	103

Influencia de la adición de CBC-st en la resistividad eléctrica del concreto	115
A. V. Pacheco-Hernández, V. G. Jiménez-Quero, V. A. Franco-Luján, P. Montes-García	
Síntesis de nanopartículas de silicio de MCM-41 obtenidas a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado	125
M. Ramírez Arévalo, D. Delgado Salas, T. Pérez López, Miguel Ramón Sosa-Baz, W. Talavera Pech	
Evaluación electroquímica en la unión soldada disímil de acero inoxidable austenítico y acero al carbono expuesta en zona de marea para aplicaciones estructurales	135
J. C. I. Ramírez Soto, T. Pérez López, J.T. Pérez Quiroz	
Factibilidad del uso de nanopartículas base silicio como tratamiento superficial para prevenir el ataque físico y químico de sulfatos en el concreto	145
D. L. Silva, V. Romero, D. Cruz-Moreno, G. Fajardo, G. Escadeillas	
Correlación entre pruebas no destructivas y la resistencia a la compresión de un polímero inorgánico base metacaolin y carbonato de calcio expuesto a CO₂	159
A.A. Clímaco Velázquez, J. M. Mendoza Rangel, I. Escalante García, O. F. Ojeda Farías	
Efecto de la variación de diferentes parámetros durante la síntesis de zeolita LTA	171
Y. Hernandez-Alejandre, I. Flores-Vivián	
Clasificación logística entre UCS y Is(50) de material pétreo región Morelia Michoacán	183
M. A. Navarrete-Seras, F. J. Domínguez-Mota, E. M. Alonso-Guzmán, W. Martínez-Molina, H. L. Chávez-García, J. G. Tinoco-Ruiz, J. A. Guzmán-Torres	
DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD	
Durabilidad y Módulo de ruptura (MR) del concreto hidráulico adicionado con fibras inorgánicas	191
N. Díaz, E. M. Alonso, W. Martínez, H. L. Chávez, E. G. Navarro, R. M. Grajeda, J. A. Velázquez	
Comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de concretos sustentables con altos contenidos de agregados reciclados y 20 % de ceniza de bagazo de caña de azúcar	185
I A. Landa-Sanchez, J. A. Paat-Estrella ¹ , S. Márquez-Montero, Y. Rivera, R. Croche-Belin, M. A. Baltazar-Zamora	
Sustitución parcial del agregado fino por partículas de PET reciclado en una matriz base cemento Portland	197
B. F. Arce-Vázquez, J.M. Mendoza-Rangel, P. Castro-Borges	
Análisis de mezclas asfálticas en caliente con adición de concreto reciclado en un 20 % y 30 % como sustitución de agregado pétreo natural	205
C. U. Espino González, H. Luis Chávez García, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, R. Ruiz Ruiz, S. C. Arguello Hernández, M. Sánchez Arreola	
Estudio de la carbonatación del concreto con agregado reciclado modificado con adición de bacteria <i>Sporosarcina pasteurii</i>	213
J. R. Nahuat Sansores, L.F. Jiménez	

Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de Cemento Portland con agregado vegetal lignocelulósico de Agave	221
F. Rosas-Díaz, C. Juárez, D. García	
Control de la corrosión del concreto con inhibidores de extractos de plantas	235
J. R. Torres Hernandez, F. E. Corvo Perez, E. Del Angel Meraz	
PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO	
Zonificación de patologías basado en la identificación de zonas de riesgo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	247
F.A. Alonso Farrera, R. Rodríguez F., E. Rodríguez O., J.A. Ramírez V., J.J. Cruz Solís	
Análisis de resistividad eléctrica y la cristalización de sales en muros interiores de la iglesia de San Roque, Campeche	255
A. Montes Sariñana, J. Reyes Trujeque, N. Rosado Cruz, I. Silva Leon	
Conservación del Patrimonio Inmueble de La Habana: Edificaciones del Malecón Habanero	247
C. Valdés, J. Contreras, R. Machado, A. Portero, A. Castañeda	
Cal de construcción para uso en restauración de monumentos históricos	257
E.G. Navarro-Mendoza, E.M. Alonso-Guzmán, A. Sánchez-Calvillo, M.A. Navarrete-Seras, W. Martínez-Molina, H.L. Chávez-García, N. Díaz-González	
ENSAYOS SEMI Y NO DESTRUCUTIVOS	
Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y atenuación espacial con la resistencia a la compresión de concretos	267
V. A. Franco, M. A. Maldonado, J. M. Mendoza, P. Montes	
Análisis del estado de conservación de estelas prehispánicas intemperizadas de roca caliza de Campeche y Yucatán mediante la técnica de transmisión de ultrasonidos	277
K. J. Pérez Ostos, J. Reyes Trujeque, S. N. Fajardo Reyes, M. R. Domínguez Carrasco	
CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO	
Espectroscopia de impedancia electroquímica aplicada a la evaluación de un sistema acero – concreto ternario (CBCA – CV)	291
A.E. Landa-Gómez, G. Fajardo-San Miguel, R. Orozco-Cruz, R. Galván-Martínez	
Comportamiento de corrosión del acero al carbono AISI 1018 en reparaciones localizadas de morteros con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería	303
E. Maldonado-Bandala, N. Higuereado-Moctezuma, D. Nieves-Mendoza, C. Gaona-Tiburcio, H. Hernandez-Martínez, F. Almeraya-Calderón	

Patologías de Estructuras. Reforzamiento estructural con muros de corte en el Centro Médico Tipo C denominado el Paraíso, ubicado en el Cantón Machala Provincia del Oro-Ecuador	319
T. Morocho	
Evolución de la corrosión en traveses de concreto reforzado bajo ciclos de mojado y secado: Efecto del diámetro del acero de refuerzo a tensión	337
N. Vega, J. Moreno, P. Castro Borges, J. Varela	
Extensión empírica a 100 años de la vida de servicio de un edificio de concreto reforzado con valor histórico	
P. Castro Borges, T. Pérez López, J.A. Briceño Mena, M.G. Balancán Zapata	
Comportamiento electroquímico de traveses a escala real con carga sostenida variable, contaminadas con cloruros	361
R. Visairo-Méndez, J. Varela-Rivera, P. Castro-Borges	
Comparación de potenciales de corrosión a 10 años en especímenes de concreto armado expuestos en las costas de Campeche	371
T. Pérez López, M. Sosa Baz, A. Y. Gómez Pérez, J. A. Paat Estrella, A. Torres-Acosta, O. Troconis de Rincón	
Evaluación de la corrosión de aceros AISI 1018 y galvanizados embebidos en concretos ternarios	383
A.Y. López-López, A.E. Landa-Gómez, G. Fajardo-San Miguel, R. Orozco-Cruz, R. Galván-Martínez	
Análisis del proceso de corrosión mediante el uso de la técnica de ruido electroquímico en probetas de concreto reforzado fabricadas con agregados calcáreos y expuestas en un medio marino	393
C. A. Balan-Ortiz, M. Luna-Brito, T. Pérez López, R. J. Camacho-Chab	
Efecto de la condición superficial de la varilla en el proceso de corrosión de estructuras de concreto reforzado con y sin la adición de iones cloruro	409
D. G. Reyes Chan, T. Pérez López, J. D. Sáenz López	
Comparación de impactos ambientales entre concreto convencional y reciclado mediante ACV. Caso de estudio: concreto con $f'c$ de 35MPa elaborado con agregados de Morelia, Michoacán	419
R. Ruiz Ruiz, W. Martínez Molina, E.M. Alonso Guzmán, H.L. Chávez García, C.U. Espino González, M. Arreola Sánchez	
Efecto de la carbonatación en la condición de la interfase concreto-acero durante el proceso de carbonatación acelerada	429
T. Torrez Pérez, T. Pérez López, J. A. Paat Estrella, D. Nieves-Mendoza	

CONTROL DE CALIDAD

Ceniza de bagazo de caña como MCS: Necesidades de investigación	439
M. A. Maldonado-García, V. A. Franco-Luján, P. Montes-García	
Análisis del comportamiento de Isla de Calor Urbana Superficial en ciudades puerto de México con clima cálido húmedo durante el COVID19	453
E.Limón-Yedra, E.Alonso-Guzmán, J.Santamaria-López, R.Grajeda-Rosado	
El comportamiento térmico de ciudades costeras mexicanas del Pacifico en relación con sus Áreas Verdes	463
A. Ramírez-Romero, A. García-Ruíz, J. Velázquez-Pérez, M. Mondragón-Olán, W. Martínez-Molina	
Diseño, construcción y validación de una cámara de carbonatación acelerada	475
T. Pérez-López, J. A. Paat-Estrella, D. Nieves-Mendoza, E. Maldonado-Bandala, T. C. Torrez-Pérez	

Presentación

Los acontecimientos alcanzan relevancia a través del tiempo cuando se tiene el cuidado de registrarlos. Es el caso de la ardua labor de investigación en el área de la construcción, tal como lo fue el IX Congreso Nacional ALCONPAT México 2020 en que se logró reunir de manera virtual a estudiosos del campo de la durabilidad de infraestructura en diversos ejes temáticos. Una parte importante de las actividades, es la recopilación de los trabajos presentados y su edición como memoria, que sea factible consultar en cualquier momento y dejar constancia de la generación y aplicación del conocimiento.

Es grato presentar, a nombre de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, las memorias del IX Congreso Nacional ALCONPAT 2020, documento que agrupa los trabajos en extenso presentados durante el foro.

El espíritu de compartir es el centro de las reuniones académicas y profesionales en la búsqueda de alcanzar desarrollo tanto en el aspecto técnico científico, como en el de ejercicio profesional, siempre con la intención de mejorar las prácticas de construcción desde un punto de vista de sostenibilidad, que incorpore aspectos en los ámbitos social, económico y de protección al medio ambiente.

Agradezco el invaluable apoyo recibido del Mtro. José Román Ruiz Carrillo, Rector de la Universidad Autónoma de Campeche, para la realización del Congreso. De igual manera, al Mtro. Juan Carlos Limón López, Director General de Estudios de Posgrado e Investigación y al Mtro. Guadalupe Manuel Estrada Segovia, Director de la Facultad de Ingeniería de la UAC. A las dependencias universitarias que apoyaron la realización del congreso. De manera particular, a mis compañeros del Comité Organizador, en especial a la M. en C. Josefa de los Ángeles Paat Estrella, por su incansable trabajo en todas las etapas del desarrollo del Congreso.

Dr. Tezozomoc Pérez López
Presidente del Comité Organizador
IX Congreso Nacional ALCONPAT México 2020

• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Materiales y Nanomateriales





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



Carbonation Effect on the Chloride Profile

C. Andrade¹ y P. Castro²

¹CIMNE: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería-. UPC. España-

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida

Autor de Contacto: candrade@cimne.upc.edu

Resumen

En muchas estructuras situadas en ambientes marinos, el perfil de cloruros es anómalo ya que no presenta el máximo de concentración en la superficie del hormigón, sino unos mm o cm hacia su interior siendo la concentración superficial de cloruros menor o incluso nula en la superficie. Este resultado se ha atribuido a diversa causas. En el presente trabajo se presentan los resultados de ensayos sobre probetas sin carbonatar sometidas al ensayo de difusión natural pero con solución aireada y sin desairear, así como sobre probetas carbonatadas previamente. Los resultados permiten ver la coincidencia del máximo en el perfil de cloruros con mínimo de la calcita y el comienzo de la disminución de la portlandita.

Abstract

In natural marine exposures, the chloride profile may have a maximum in the concrete surface (surface concentration) or this maximum may appear some mm or even centimeters, in depth. This fact has been attributed to different mechanism. In present paper results are given with specimens tested with solutions aerated and deaerated as well as specimens previously carbonated. The results show the coincidence of the maximum in the chloride profile with the changes in those of calcite and the decrease in the portlandite.

Keywords: Concrete, chlorides, profile, maximum, carbonates.

1. Introducción

El cloruro es la principal causa de corrosión de la armadura en medios marinos. Su penetración se modela normalmente mediante la ecuación conocida como de “la función de error” (Ngala V.T., Page C.L., 1997). Así, de la ecuación diferencial [1] de flujo en estado no estacionario, con las condiciones de contorno de concentración exterior y coeficiente de difusión constantes se deduce la ecuación [2].

$$-J(x) = \frac{\partial C(x)}{\partial t} = D_{ap} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [1]$$

$$C_{th} = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}}\right) \quad [2]$$

Los perfiles que se obtienen con esta ecuación deben ser todos decrecientes, ya que la difusión se produce por un gradiente de concentración. Sin embargo en la realidad se encuentran perfiles del tipo de los mostrados en la figura 1 (Castro P. *et al.*, 2001) donde aparece un máximo en el interior del hormigón (Andrade *et al.* 1997, Andrade *et al.* 2015).

Este tipo de perfiles anómalos se han atribuido a varias causas (Baroghel *et al.*, 2012; Qiang Yaun *et al.*, 2011; Lianfang *et al.*, 1999; Ngala *et al.*, 1997; Galan *et al.*, 2015): 1) a un “lavado” superficial debido a la acción continua del agua de mar, 2) a ciclos convectivos de mojado-secado por el oleaje y las mareas, 3) a la

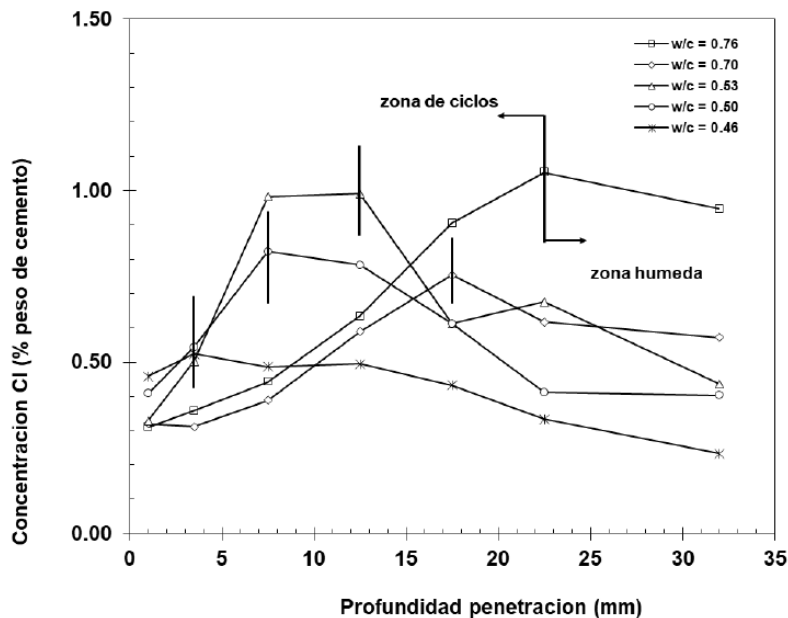


Figura 1. perfiles en exposición real (REF Pedro).

lixiviación de los iones calcio, 4) la diferente microestructura de la pasta superficial y 5) a la carbonatación de la superficie. Los mecanismos se ha discutido pero la justificación todavía no tiene una verificación experimental. la principal consecuencia de esta falta de explicación es que no es posible predecir a largo plazo mientras no se pueda modelar también esta zona de la piel del hormigón.

En el presente trabajo se parte de la hipótesis que la mayor influencia la ejerce la carbonatación de la piel del hormigón, pero una carbonatación que no solo es por el gas dióxido de carbono sino también por los bicarbonatos y carbonatos que están en disolución. Los resultados muestran que la carbonatación previa no elimina la combinación de cloruros ni su penetración y que los coeficientes de difusión que se obtienen en los ensayos difieren si la disolución se desairea. Finalmente se muestra como se sugiere hacer el ajuste de la ecuación [2] cuando un perfil presenta un máximo

2. Procedimiento

Se utilizó un cemento Portland puro (CEM I 52.5 N-SR) cuya composición se muestra en la Tabla 1.

Las probetas fueron de pasta para evitar la presencia de los áridos en los análisis. Se amasó con una relación a/c = 0,4. La geometría fue cilíndrica de 200mm de altura y 150 mm de diámetro. Las probetas se curaron durante 7 días en una cámara húmeda (> 95% de HR y 23°C). Después se cortaron por horizontalmente por la mitad de la altura para obtener dos probetas idénticas y exponer la misma cara a las disoluciones de cloruros.

Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- Se colocó un depósito en su superficie con una solución de 30 g/l de NaCl durante 90 días
- Igualmente se colocó un recipiente con una solución de 30 g/l de NaCl durante 90 días pero des-carbonatada por ebullición que expelle los gases disueltos (aire). Durante este periodo se puso una lámina plástica tapando el recipiente y se hizo burbujear N₂ de vez en cuando para minimizar que el CO₂ pudiera volver a disolverse.
- Las otras probetas se dejaron secar hasta llegar a los 28 días de la fabricación y luego se introdujeron en una cámara de carbonatación al 100 % de CO₂ durante otros 30 días. Finalmente se les colocó el recipiente con la solución de 30 g/l NaCl durante 90 días también con el burbujeo periódico de N₂ y la lámina plástica tapando el recipiente.

Una vez pasado el período de 90 días de exposición a los cloruros, se retiraron los recipientes y las probetas se pulieron mm a mm para obtener las muestras de la zona en contacto con la disolución. En esas muestras se analizaron los cloruros solubles en ácido y en agua (Castellote *et al.* 2002, Castellote *et al.* 2002a, EN-12390-11 2009). También se realizaron análisis termo-gravimétricos para obtener la portlandita y calcita.

Tabla 1. Composición química del cemento (%) CEM I 52.5 N-SR 5.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SrO
19.868	3.751	64.356	4.052	0.65	0.624	0.65	0.051

3. Resultados

Los perfiles de las cuatro probetas ensayadas se muestran en la figura 2. Todas las probetas muestran la aparición de un máximo en los perfiles. Las cantidades totales de cloruros que han penetrado son bastante diferentes en las muestras carbonatadas que en las no carbonatadas, pero también difieren las probetas que no carbonatadas entre sí.

Entre las dos probetas que no estaban previamente carbonatadas la mayor cantidad de cloruros se encuentra en la que la disolución era normal, es decir sin desairear. La que fue ensayada con disolución desaireada (con menos especies carbónicas) además tiene un perfil con mayor disminución en su frente. En cuanto a los cloruros solubles en agua resultan ser aproximadamente del 10 % de los totales y en el caso de la probeta no desaireada presenta también el máximo.

En el caso de las probetas carbonatadas, las cantidades de cloruros son mucho menores que en las no carbonatadas y los cloruros son también alrededor del 10 % de los cloruros totales.

En la figura 3 se muestra la proporción de cloruros solubles en agua (libres) frente a los totales en función de la profundidad de penetración. Todas las relaciones están alrededor de 0.1 (10 %) indicando una capacidad de combinación del cemento muy alta a pesar de que es bajo en C_3A . Esta alta proporción se atribuye no solo a la combinación de los cloruros con los aluminatos sino a su adsorción en el gel C-S-H y en la protlandita (Florea *et al.*, 2012). Se deduce que la relación disminuye ligeramente con la profundidad y es algo menor en la probeta carbonatada (la segunda probeta carbonatada llamada CO2-2 no se muestra al no haberse analizado cloruros libres en ella). Es importante resaltar la mayor proporción de cloruros libres que se ha encontrado cerca del máximo en las probetas con mayor cantidad de especies carbónicas (llamadas CL+CO₂ y solo-CO₂). Este hecho indica la capacidad de desplazamiento del carbonato hacia el cloruro induciendo mayor proporción de libres.

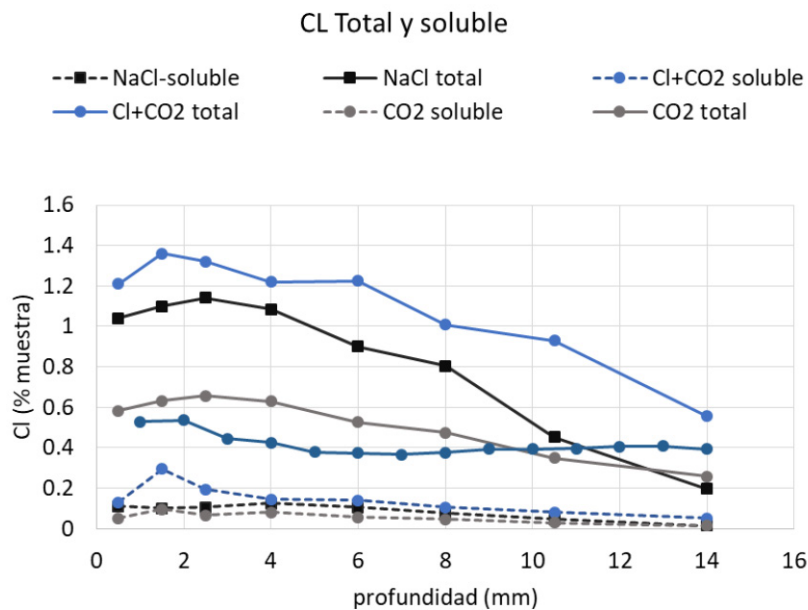


Figura 2. Perfiles de cloruros totales y solubles en agua.

El coeficiente de difusión ajustado desde el máximo según (Andrade C. *et al.*, 2015) se muestra en la figura 4 y la concentración en el máximo (C_s en la ecuación 2). Los valores de los coeficientes difieren entre sí y también difieren si se ajustan en el perfil de cloruros totales o el de los libres aunque guardan la misma proporción entre ellos. El coeficiente mayor se encuentra en la probeta con la solución normalizada y sin desairear y el menor en la misma condición pero con la solución desaireada.

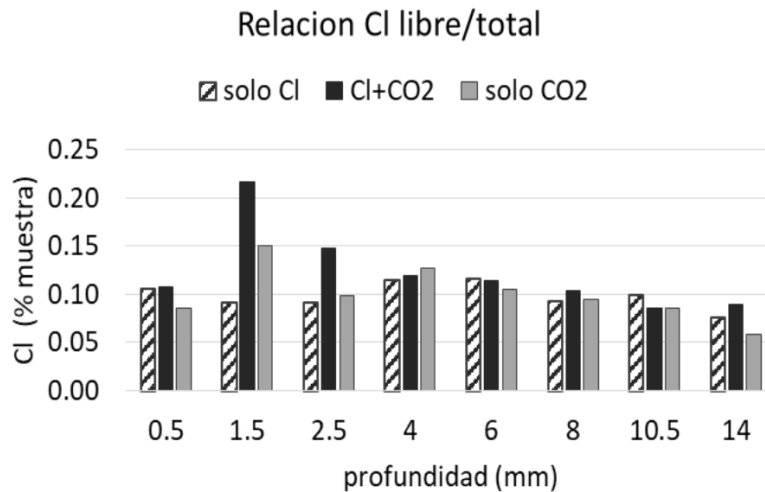


Figura 3. Proporciones de cloruros solubles en agua frente a los totales en tres series de probetas.

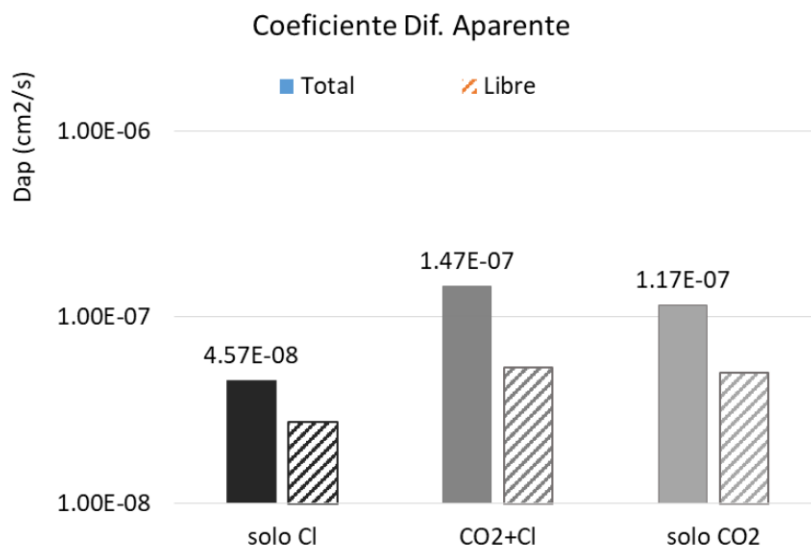


Figura 4. Coeficientes de difusión Aparente deducidos a partir del máximo (Andrade C. *et al.* 2015) en los perfiles de la figura 2.

En cuanto a las concentraciones de los máximos como ya se avanzó, es mayor igualmente en las condiciones standard y la menor en la probeta previamente carbonatadas.

Los resultados de la cantidad de calcita y portlandita se muestran en la figura 5 a 8 para las cuatro probetas ensayadas (tres de las analizadas con ATG y la otra -CO₂-2- mediante DRX). Una primera observación indica que la cantidad de calcita en la superficie es casi igual en la probeta aireada y desaireada por lo que se deduce que el tratamiento de desairear fue incompleto y no consiguió reducir completamente la presencia de CO₂ disuelto. Hacia el interior la calcita disminuye según aumenta la portlandita indicando que la calcita se ha formado principalmente a costa de la portlandita.

La probeta carbonatada (figura 7) muestra una mayor proporción de calcita lógicamente. El que exista un gradiente de calcita y portlandita confirma que la carbonatación ha sido imperfecta porque el interior permanece menos carbonatado. En la probeta llamada CO₂-2 se muestran la intensidad de la señal de DRX (semi-cuantitativo) y en el perfil se distingue bien como donde se cruzan los perfiles de portlandita y calcita hay otro pico de cloruros indicando el frente de cambio, confirmando que la formación de calcita desplaza el cloruro combinado y lo transforma en libre.

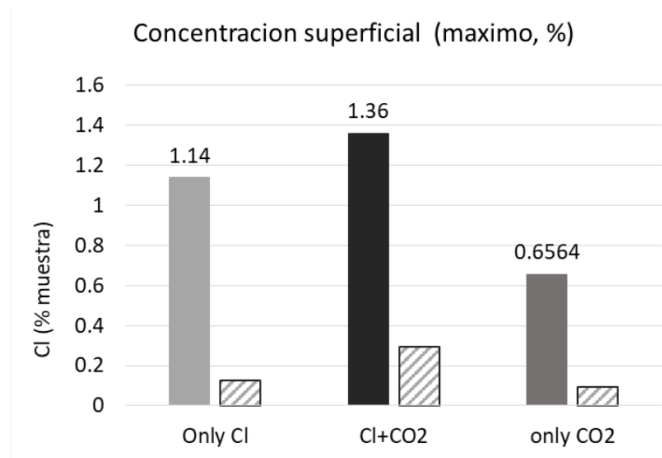


Figura 5. Concentración del máximo en los perfiles de la figura 2 (solo tres probetas).

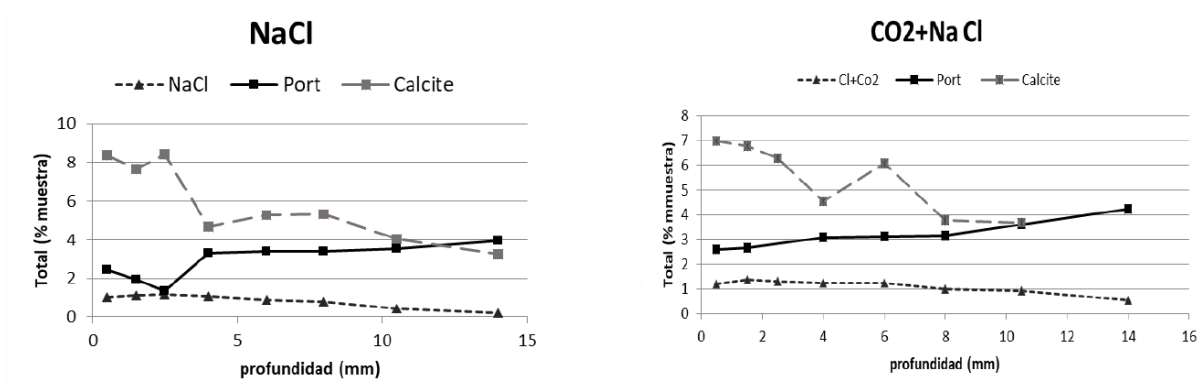


Figura 6. Perfiles de calcita, portlandita y Cl totales en la probeta con solución desaireada.

Figura 7. Perfiles de calcita, portlandita y Cl totales en la probeta con solución sin desairear.

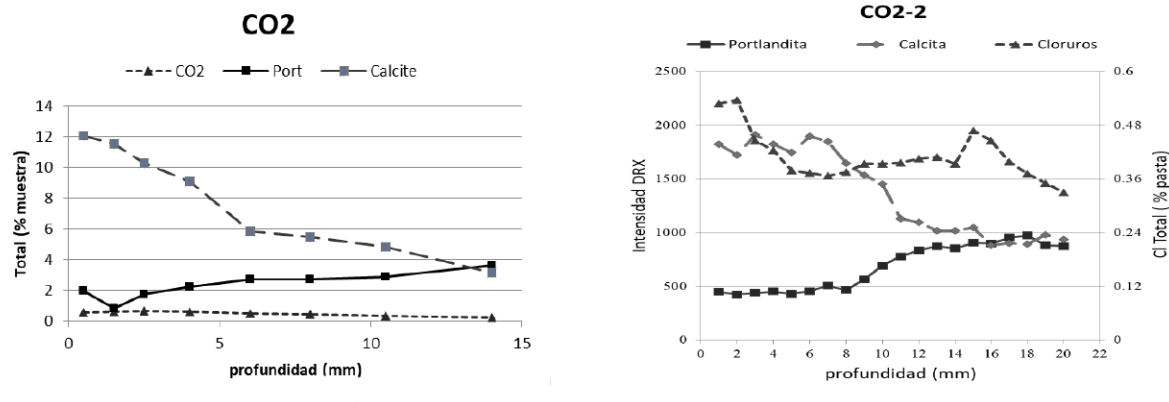


Figura 8. Perfiles de calcita, portlandita y Cl totales en las probetas previamente carbonatadas.

4. Discusión

Al haberse encontrado calcita en la superficie de la probetas con la solución de cloruros desde el principio, tanto en la previamente desaireada con en la que no se removieron los gases disueltos, la primera deducción a enfatizar es que la carbonatación también se produce en condiciones de inmersión y ello influye directamente en la aparición de un máximo en el perfil de cloruros.

Una cuestión particular de las probetas previamente carbonatadas es el cómo es posible que haya cloruros combinados en las muestras. La respuesta que se ha encontrado es que la carbonatación es imperfecta y por ello el cloruro encuentra menos sitios reactivos (menos OH para intercambiarse con ellos (en el gel C-S-H, la portlandita o en la inter-lamina de los aluminatos) pero todavía los hay, ya que la carbonatación ha sido superficial y no ha sido completa. Si esta carbonatación hubiera sido completa, existirían los OH correspondientes al pH neutro y por ello los cloruros combinados serían aun menores, pero tal vez no nulos.

Estas consideraciones se han deducido de la secuencia de perfiles en la figura 2 y tratan de entender por qué la concentración de cloruros es menor en las muestras con la disolución desaireada o previamente carbonatadas. Así, en la solución no desaireada la concentración del máximo es mayor aunque debería haber sido menor, dado que la presencia de carbonatos/bicarbonatos aumenta la fuerza iónica y debería hacer que el coeficiente de actividad del cloruro disminuya, pero parece que sucede todo lo contrario. Al transformarse el bicarbonato en carbonato y precipitar calcita, se estimula la entrada de cloruros y su progreso hacia el interior. Es decir la mayor concentración de especies carbónicas ($\text{CO}_3^{=}$) es mayor y con ello menor relación $\text{Cl}/\text{CO}_3^{=}$ en el caso de la no-desaireada. En el caso de la desaireada esta relación es mayor al haber menos especies carbónicas y lo que se obtiene es una menor entrada total de cloruros

En las probetas carbonatadas, por un lado su porosidad seguramente es menor y por ello el coeficiente de difusión se reduce, pero también es menor el número de sitios “reactivos” y la especie carbónica es predominantemente el bicarbonato. El resultado es una menor entrada de cloruros.

Con respecto al mecanismo que sustenta todo el proceso, se avanzaran unas hipótesis que será necesario confirmar en el futuro, distinguiendo el caso de las probetas carbonatadas previamente de las que su solución de poros es alcalina desde el principio. Por otro lado para entender estos procesos es necesario tener en cuenta los equilibrios carbonato/ bicarbonato que se muestran en la figura 9 y que indican que las especies carbónicas si el pH es neutro son principalmente bicarbonatos y si es alcalino, como en el hormigón, la única especie posible es el ion carbonato. Por otro lado es también importante resaltar que mientras el carbonato

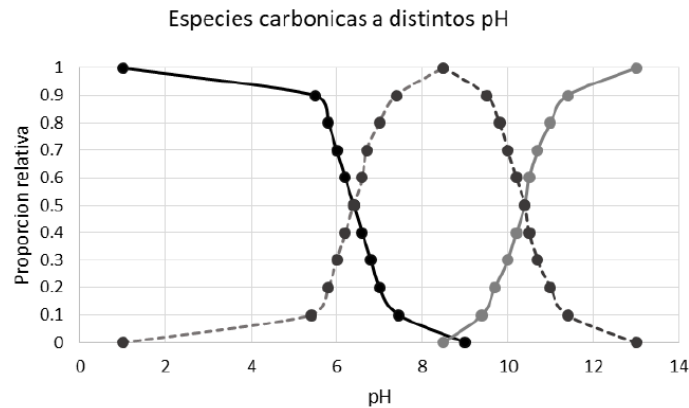


Figura 9. Proporción relativa de especies de carbono inorgánico a distintos pH.

cálcico es muy insoluble, el bicarbonato cálcico es soluble y el responsable de la formación de estalactitas cuando se produce el secado, por lo que su mecanismo de actuación es muy importante de ser tenido en cuenta.

• **Solución de poros alcalina:**

Cuando la solución de cloruros entra en contacto con el hormigón, en la solución no hay solo cloruros e iones sodio sino también bicarbonatos ya que el pH es neutro.

Entran pues a la vez el bicarbonato y el cloruro, pero al tener mayor movilidad iónica el cloruro, su velocidad de entrada es mayor y se iría combinado con los aluminatos o adsorbiéndose en la superficie del gel C-S-H.

El bicarbonato nada más entrar en contacto con la solución de poros alcalina se convierte en carbonato, que es el que progresa hacia el interior. En los sitios ocupados por el cloruro el carbonato lo desplaza y se combina con las fases de calcio para formar calcita por su menor producto de solubilidad.

El cloruro libre que se libera debe progresar hacia el interior por el gradiente de concentraciones.

El proceso se va repitiendo en cada paso hacia el interior del hormigón

• **Probetas previamente carbonatadas:**

En este caso la especie que avanza con el cloruro es el bicarbonato pues la solución de los poros ahora es neutra. Pero ambas, carbonato y bicarbonato al tener mayor volumen iónico que el cloruro tienen una menor movilidad y por ello avanzan por detrás del cloruro.

El bicarbonato solubiliza la calcita previamente formada y permite una proporción mayor de la original de bicarbonatos.

Los bicarbonatos parecen también desplazar a los cloruros previamente combinados por su mayor movilidad y el proceso básico será pues el mismo en ambos casos: el cloruro es desplazado por la especie carbónica correspondiente, al ser más estables termodinámicamente en la pasta de cemento las especies con carbonatos que las que combinan cloruros.

En resumen, el máximo se forma en la zona donde la calcita no ha precipitado es decir en la frontera entre las zonas carbonatadas y no carbonatadas. Las especies carbónicas actúan de “intensificador” del proceso al producir un frente de mayor concentración cloruros libres. En las zonas previamente carbonatadas la cantidad de cloruros que puede penetrar es menor al haber menos sitios reactivos y ser el equilibrio libres ↔ combinados el que controla la cantidad de libres en equilibrio. Por otro lado el equilibrio carbonato/bicarbonato juega un papel esencial en todo el proceso que necesita más investigaciones para ser completamente entendido.

5. Conclusiones

Las conclusiones que se han podido extraer del presente trabajo son las siguientes:

- Se produce carbonatación también en contacto con una disolución que contenga especies de carbono inorgánico.
- El contenido en CO_2 de la disolución de cloruros influencia el perfil que se forma
- Por un lado induce la formación de un máximo en el perfil condiciona el valor de las concentraciones de cloruros y
- con ello el valor del coeficiente de difusión.
- Al contrario de lo que se esperaba la condición más agresiva es en la que no se desairea la solución y es por ello la más recomendable para el ensayo normalizado.
- Si al probeta esta pre-carbonatada, las concentraciones que difunden son menores y el perfil cambia muy significativamente.
- El equilibrio $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ juega un papel muy importante en el proceso y debe ser estudiado en más profundidad.

6. Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Madrid y al Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” la realización de los análisis de las muestras.

7. Referencias

- Andrade C., Díez J.M., Alonso C., (1997)- “Mathematical modelling of a concrete surface “skin effect” on Diffusion in chloride contaminated media”. *Advances Cement Based Materials*, vol.6, 39-44
- Andrade C. Climent M. A., de Vera G. - (2015) -Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete Surface- *Materials and Structures* 48:863–869
- Baroghel-Bouny V., Wang X., Thierry M., Saillio M., Barberon F.. (2012) Prediction of chloride binding isotherms of cementitious materials by analytical model or numerical inverse analysis. *Cement and Concrete Research*, 42: 1207-1224.
- Qiang Yuan, Shi C., De Schutter G., Deng Dehua, He Fuqiang (2011)- Chloride Ion Concentration on the Surface of Cement-Based Materials in Chloride Solutions. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 39(3): 544-549.
- Lianfang Li , Sagües A. A. -(1999) - “Effect of chloride concentration on the pitting and repassivation potentials of reinforcing steel in alkaline solutions”- *NACE Corrosion Paper No. 567*.
- Ngala V.T., Page C.L (1997).- Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.7, pp 95-1007.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

- Galan I., Glasser F.P. (2015), Chloride in Cement. Advances in Cement Research – Vol. 27, no2, Feb, pp63-97.
- Castellote M. and Andrade C. - (2002)- Analysis of total chloride content.- RILEM Recommendation of TC-178-
"Testing and modelling chloride penetration in concrete".- Materials and Structures.- vol 35 pp 583-585.
- Castellote M. and Andrade C.- (2002a) - Analysis of water soluble chloride content in concrete.- RILEM Recommendation of TC-178-"Testing and modelling chloride penetration in concrete".- Materials and Structures.- vol 35 pp 586-588.
- Castro P. de Rincon O.T, Pazini E.J. (2001) Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. Cement and Concrete Research vol 31 529-737.
- CEN/TS 12390-11: 2009: Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete. Unidirectional diffusion
- Florea M.V.A., Brouwers H.J.H. - (2012) - Chloride binding related to hydration products Part I: Ordinary Portland Cement - Cement and Concrete Research 42 282-290.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



Análisis del comportamiento de Isla de Calor Urbana Superficial en ciudades Puerto de México con clima cálido húmedo durante el COVID19

E.Limón-Yedra¹, E.Alonso-Guzmán², J.Santamaria-López³,
R.Grajeda-Rosado¹

¹ FICH, Universidad Veracruzana, Programa Arquitectura

² FIC, PIDA, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

³ FICH, Universidad Veracruzana

Autor de Contacto: lgrajeda@uv.com

Resumen

El objetivo principal de la presente investigación es analizar el comportamiento de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) de diferentes ciudades puerto de México, ubicadas entre las latitudes 22° a 19°, considerando dos meses de los años 2019 y 2020. La selección de los periodos permite comparar dos meses del periodo cálido húmedo, entre el 2019, año "normal" en el comportamiento de las actividades antropogénicas y el 2020, que debido a la contingencia sanitaria COVID-19, presenta una disminución de la movilidad y comportamiento de los habitantes urbanos. La información fue obtenida del LandSat 8 y procesados a través del programa ArcGis. Los datos muestran variaciones de temperatura de 10 a 20°C en las superficies de las ciudades.

Palabras clave: Isla de Calor Urbana Superficial; Actividad Antropogénica; Teledetección.

Abstract

The main objective of this research is to analyze the behavior of the Island of Superficial Urban Heat (ICUS) of different port cities of Mexico, located between latitudes 22° to 19°, considering two months of the years 2019 and 2020. The selection of the periods makes it possible to compare two months of the warm humid period, between 2019, a «normal» year in the behavior of anthropogenic activities, and 2020, which due to the COVID-19 health contingency, presents a decrease in mobility and behavior of urban dwellers. The information was obtained from LandSat 8 and processed through the ArcGis program. The data show temperature variations of 10 to 20 ° C on the surfaces of cities.

Keywords: Surface Urban Heat Island, anthropogenic activity; remote sensing.

1. Introducción

La climatología por definición es el estudio del comportamiento a largo plazo de la atmósfera en un lugar geográfico determinado. Dentro de sus disciplinas más especializadas, está la climatología urbana, para el estudio de las modificaciones locales por las actividades humanas y sus asentamientos urbanos. Su aplicación es relevante en los temas relacionados con la planificación urbana, la calidad ambiental del medio urbano y los riesgos climáticos que afectan a las ciudades, permitiendo la rehabilitación, la restructuración o reconstrucción de estas para el confort de sus habitantes (Moreno García, 1997).

Además, es una puerta de posibilidades como indicador de la sostenibilidad de las ciudades, por estar íntimamente ligada al Cambio Climático mundial y a los nuevos procesos de planeación urbana necesarios para las ciudades que buscan ser sostenibles y resilientes. Su análisis y detección abarca el uso de estaciones meteorológicas, recorridos en auto (transectos) y teledetección satelital para crear mapas isotérmicos de las ciudades.

Es por tanto que el concepto de Isla de Calor Urbano (ICU), fenómeno de acumulación del calor presente en las ciudades, causado por distintas actividades que se realizan en el día a día por lo seres humanos; como a) el transporte en automóviles, camiones colectivos, motocicletas, b) la no planeación en la utilización de materiales fríos en las edificaciones (usando en su mayoría materiales con gran capacidad de almacenaje calorífico que luego es expedido al ambiente), c) actividades portuaria (en ciudades costeras), d) mínima superficie de áreas verdes, e) diseños de edificaciones, que generan cañones urbanos con perfiles cerrados que no permiten el movimiento del viento dentro de las zonas urbanas; por mencionar algunas son factores que aumentan la temperatura ambiental (Serricola and Martín-Vide, 2014).

Otro concepto que se desglosa de la ICU, es la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS), fenómeno que ocasiona un aumento en la temperatura superficial que se lleva a cabo por la ausencia de ventilación más el efecto de la radiación que reciben las superficies de la ciudad y que se disipan a la atmósfera, esto sucede por los mecanismos de calentamiento del aire como serían: a) la evapotranspiración de la vegetación, b) la humedad del suelo, c) la combustión de elementos fósiles por el transporte, d) la contaminación atmosférica, e) la limitada cantidad de superficies húmedas, f) el intercambio de calor debido a la turbulencia incrementada por los edificios, entre muchas otras actividades de nuestro día a día que afectan gravemente a nuestro medio (Barradas, 2016).

La ICUS se identifica como uno de los principales impulsores de calor extremo en los centros urbanos; por lo tanto, actualmente los investigadores están considerando opciones de movilidad que podrían reducir el impacto que tiene la movilidad en el cambio climático y el consumo de recursos como los combustibles fósiles.

El estudio de la movilidad en las grandes urbes, se vuelto una ciencia aplicada, se estudian variables como el volumen de tráfico, la velocidad, densidad, inventarios de infraestructura generando modelos de pronósticos, sin embargo, estos estudios han hecho a un lado factores como la equidad de social, valor económico y el medio ambiente (Quintero-González, 2017).

El sector de transporte urbano es por tanto un problema importante por resolver para el desarrollo sostenible en términos de usos de energía, emisiones de dióxido de carbono y ICUS (Kolbe, 2019).

La investigación de Kolbe (2019), realiza una comparación entre vehículos convencionales (uso de energía fósil) y eléctricos, alimentados con fuentes de hidrogeno y eólica a través de la cuantificación de sus emisiones de CO₂, sus resultados arrojan que, si la flota actual de vehículos es sustituida un 50 % con vehículos eléctricos de energía eólica, reduce 1°C la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

A través de la metodología de teledetección satelital, el presente documento busca ofrecer un panorama de cómo afecta la movilidad el comportamiento de las isothermas de la ICUS en las ciudades, a través de la comparación de varias urbes en diferentes periodos y ubicaciones.

2. Procedimiento Experimental

2.1 Áreas de estudio

Las ciudades analizadas, fueron seleccionadas porque en comparación poseen similitudes en el comportamiento de movilidad, usos de suelos y actividades antropogénicas.

Primeramente, son ciudades mexicanas, ubicadas entre las latitudes 22 a 19°, con longitudes entre 105 a 93° y una altitud sobre el nivel del mar de 10 m, por lo tanto, comparten un clima según la clasificación Köppen; cálido de húmedo a subhúmedo. La investigación con un enfoque cuantitativo busca la comparación de estas cuatro ciudades y puertos costeros de México en dos periodos mayo y junio del 2019 y del 2020 (Figura 1), meses representativos del periodo cálido y sobre todo cuando inicia de manera oficial la contingencia de resguardo del país.

Las ciudades estudiadas están clasificadas como ciudades y puerto, dos junto al océano Pacífico y dos en el Golfo de México, por su característica de ubicarse en una zona resguardada de gran oleaje, donde las embarcaciones pueden hacer maniobras para el embarque y desembarque de mercancías o pasajeros son consideradas como zonas portuarias importantes en México (SCT, 2020).

2.2 Método de procesamiento

Con el adelanto tecnológico, los científicos empiezan a utilizar instrumentos de medición más sofisticados, que permiten observar parte de la superficie terrestre y aplicarlos para saber cómo se comportan las islas de calor con respecto a puntos geográficos específicos. Es aquí, donde entra la detección por aviones y satélites por medio de fotografías térmicas, ediciones de ondas electromagnética de la radiación de calor. En este punto las mediciones son en zonas urbanas y regionales.

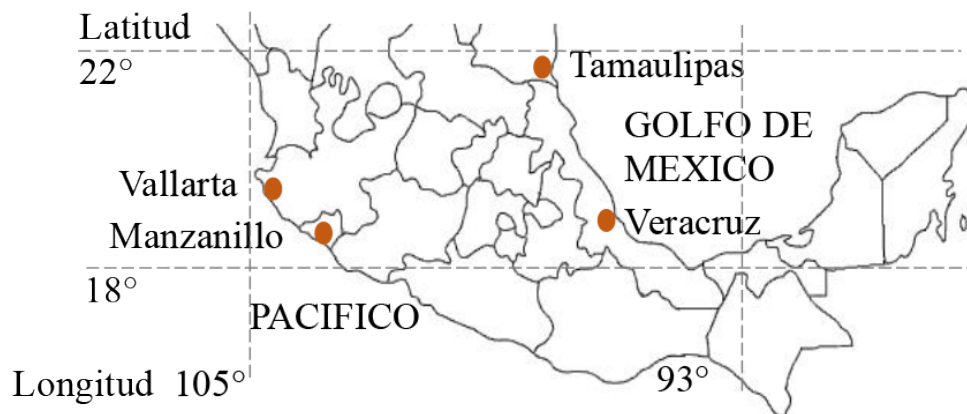


Figura 1. Ubicación de las ciudades puerto analizadas (SCT, 2020).

Debido a que los satélites sólo pasan por un mismo punto una vez cada determinado lapso de días, no registran información continua, por lo tanto, se analizaron varios días para asegurar que las condiciones climáticas sean estables. Es importante recalcar que esta herramienta es para el estudio de grandes áreas, pero no permite saber el comportamiento de la capa de dosel, se enfoca en estimar las temperaturas de las superficies como son los techos, pisos, pavimentos y tipos de suelo urbanos (Gartland, 2008). Por lo que la ICU estudiada con esta metodología es la llamada superficial.

Los avances en la aplicación de la teledetección térmica en las superficies urbanas mediante satelitales actuales han alcanzado alta resolución para la interpretación de las isotermas de la ICU superficial (Voogt and Oke, 2002).

Utilizando la información de las bandas térmicas 2,3, 4, 5, 10 y 11 del satélite Landsat 8 en la página web de libre acceso, de la organización científica del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), se procesan imágenes con el programa ArcGis para obtener las isotermas de la Isla de Calor Urbana Superficial, así como los metadatos para posteriormente ser examinados con software estadístico; permitiendo la creación de graficas para su análisis.

El software ArcGis maneja varias herramientas de procesamiento georreferenciado, de las cuales las usadas en esta metodología fueron: a) cálculo de la radiancia con las bandas TIR 10 y 11, b) obtención de la temperatura de brillo considerando su conversión en esta investigación de °F a °C, c) promedio de los resultados de la radiancia de las bandas 10 y 11, d) procesamiento del dato NDVI (Normal Difference Vegetation Index) usando las bandas 4 y 5, e) computo de la proporción de vegetación, utilizando los datos mínimos y máximos del NDVI, f) análisis del valor de emisividad ligado al porcentaje de vegetación con valores correspondientes a la emisividad de la vegetación y el suelo, y finalmente g) obtención de la Temperatura Superficial del Suelo (TSS) con la ecuación (1) (Grajeda *et al.*, 2020):

$$LST = BT / 1 + w (BT / p) * Ln (\epsilon) \quad (1)$$

Donde:

BT = Temperatura del brillo

w = Longitud de radiación de onda de las bandas 10 y 11

p = Radiación de onda electromagnética

Ln (ε) = Logaritmo en función de la emisividad final

3. Resultados

Los resultados finales de las cuatro ciudades por medio del ArcGis se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 5, indicando fecha de la toma satelital y temperatura máxima y mínima superficial, con una resolución de 60m por pixel, editados y cortados según municipio para identificar la zona específica de la ciudad.

3. 1. Puerto Vallarta y Nuevo Vallarta, Jalisco (Pacífico)

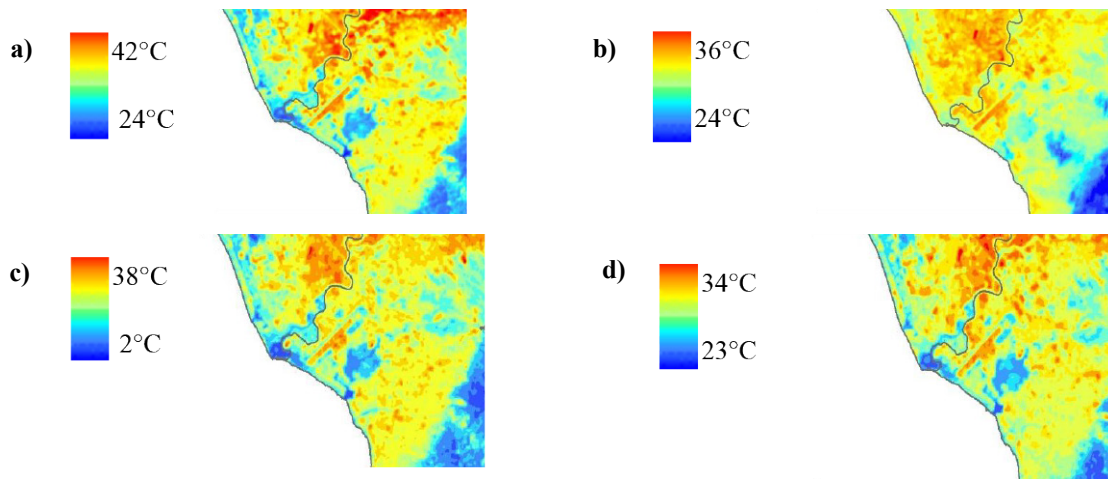


Figura 2. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis en la zona conurbada de Puerto Vallarta y Nuevo Vallarta, Jalisco.

- a)** TSS, maximos y minimos (01 de mayo del 2019). **b)** TSS, maximos y minimos (03 de mayo del 2020).
c) TSS, maximos y minimos (21 de junio del 2019). **d)** SS, maximos y minimos (06 de junio del 2020).

3.2 Puerto Manzanillo, Colima (Pacífico)

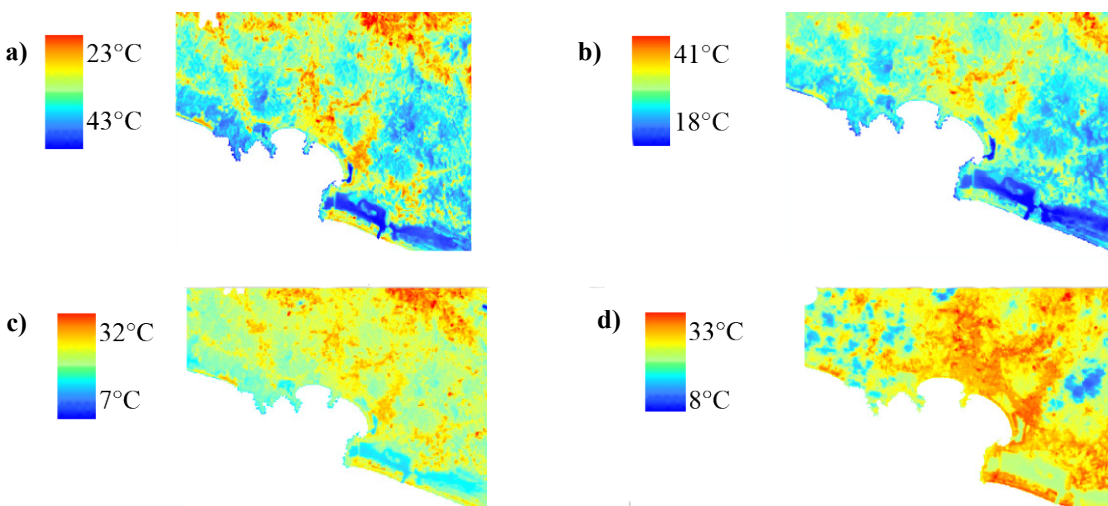


Figura 3. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis del pueto y ciudad de Manzanillo, Colima.

- a)** TSS, maximos y minimos (10 de mayo del 2019). **b)** TSS, maximos y minimos (28 de mayo del 2020).
c) TSS, maximos y minimos (11 junio del 2019). **d)** TSS, maximos y minimos (29 junio del 2020).

3.3 Tampico y Ciudad Madero (Golfo de México)

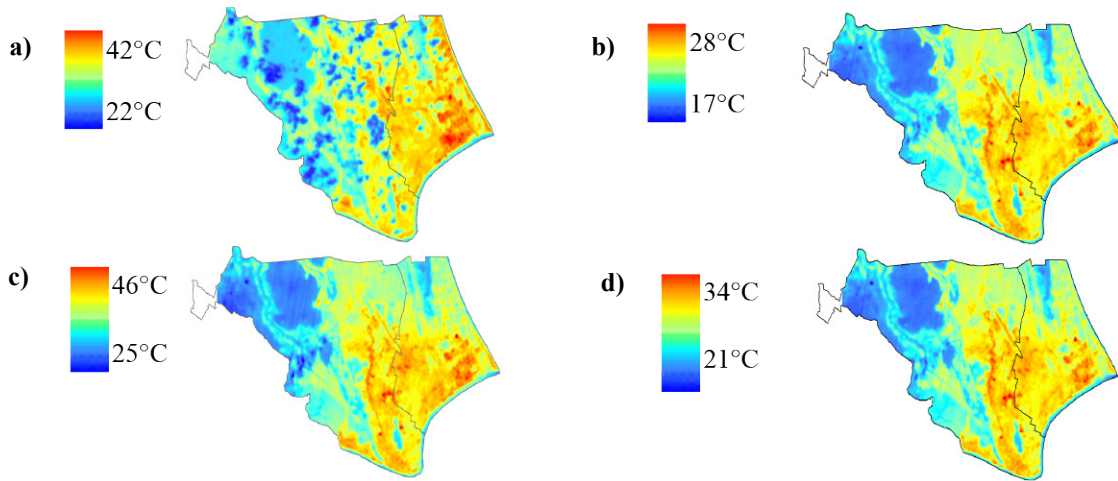


Figura 4. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis de la zona conurbadaa de Tampico y ciudad Madero.

- a)** TSS, maximos y minimos (21 de mayo del 2019). **b)** TSS, maximos y minimos (07 de mayo del 2020).
c) TSS, maximos y minimos (06 de junio del 2019). **d)** TSS, maximos y minimos (08 de junio del 2020).

3.4 Veracruz y Boca del Río, Veracruz (Golfo de México)

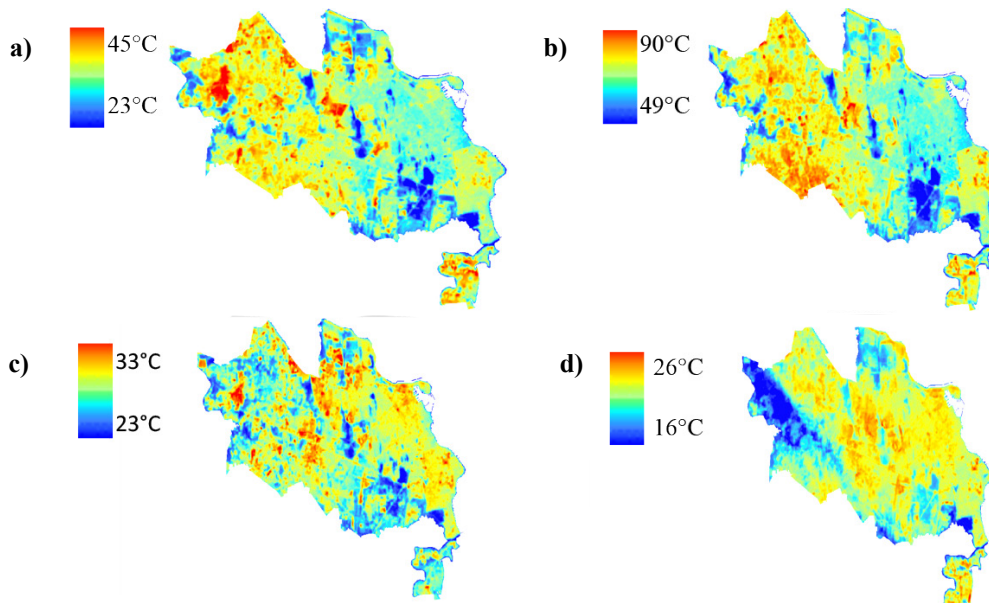


Figura 5. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis de la ciudad y puerto de Veracruz, Veracruz.

- a)** TSS, maximos y minimos (21 de abril 2019). **b)** TSS, maximos y minimos (23 de abril del 2020)
c. TSS, maximos y minimos (08 de junio del 2019). **d.** TSS, maximos y minimos (10 de junio del 2020).

Gracias a las imágenes y datos directos del ArcGis, podemos observar el comportamiento térmico de la ciudad en los días analizados. Del lado del Pacífico, en Vallarta se presenta una disminución en los máximos de temperatura de 6 a 4°C; sin embargo, en Colima la baja se presenta en las T_Mínimas solo en el 28 de mayo con 25°C.

Del lado del Golfo de México, en Tampico y Ciudad Madero la T_Máximas en el 2020 descienden de 14 a 18°C, al igual que las T_Mínimas de 5 a 4°C menos. Veracruz y Boca del Río no hay disminución en abril probablemente porque la cuarentana todavía no estaba activa; en comparación a junio, donde las T_Máximas y T_Mínimas registran descenso en ambas de 7°C.

Siguiendo la metodología y bajando los datos completos del programa la Figuras 6 muestra el comportamiento de la Temperatura de acuerdo con el área de ocupación, siendo las líneas punteadas las correspondientes a los meses del año 2020.

Al igual que las imágenes, el corrimiento de las temperaturas a números menores corrobora como la movilidad y actividad diaria se manifiesta directamente con la Temperatura Superficial del Suelo (TSS), sin embargo, las curvas de distribución si varían entre ellas.

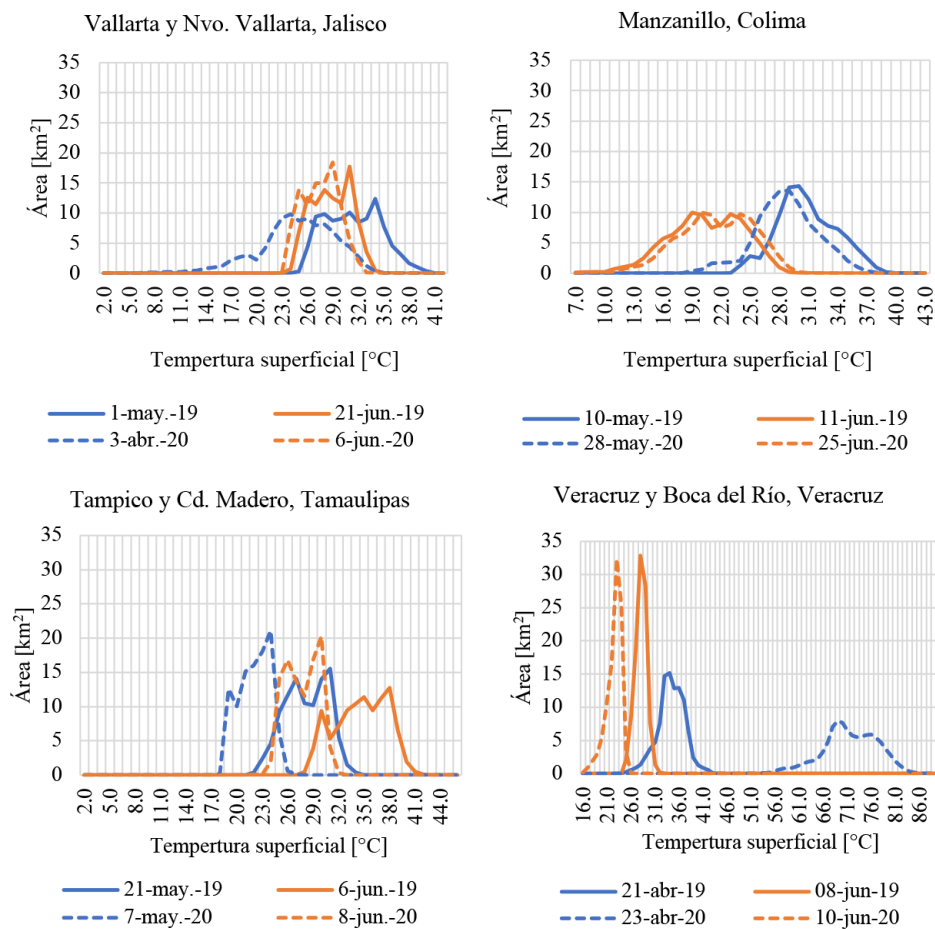


Figura 6. Grafica del comportamiento de temperaturas superficiales en las ciudades, correlacionando la temperatura con la extensión que esta abarca en la zona.

Por ejemplo, en Vallarta y Tamaulipas, la curva es más angosta por lo que los rangos de temperatura son más constantes dentro de la ciudad; Manzanillo y Veracruz disminuye, pero las curvas son parecidas, es decir la curva del mes de junio del 2020 es de 16 a 26°C (10°C) y en junio del 2019 de 21 a 31°C (10°C). Un que hubo un cambio significativo en las temperaturas, el comportamiento en la forma de las curvas, proyectadas en las gráficas, se mantienen con una forma parecida, pero de menor rango en cada ciudad.

4. Conclusiones

Con el análisis demostrado en este trabajo, y debido a la situación actual de confinamiento por la contingencia sanitaria del COVID-19, se puede observar que existe diferencia en las temperaturas superficiales entre los meses mayo y junio del 2019 y del 2020 de las cuatro ciudades puerto, las cuales oscilan entre los 10 y 20°C en sus superficies.

Se observa que las actividades escolares y laborales que generan movilidad, al ser detenidas por un lapso de meses genera una reducción en la temperatura superficial. Analizando los datos, se muestra que los valores de los rangos en los periodos de cuarentena son menores; corroborando que la movilidad, tiene un gran impacto en el entorno pues las máximas temperaturas de las ICUS dentro de las ciudades solo se observan en las áreas industriales.

Si bien, el crecimiento urbano es un hecho el cual no puede evitarse y con ello, habrá más demanda del espacio, del uso de transporte por las actividades laborales y educativas diarias, el aumentando la temperatura será inevitable; sin embargo, al buscar mejores alternativas para la movilidad urbana y control del tránsito vehicular, la temperatura atmosférica puede ser controlada en algunos puntos estratégicos de la planeación urbana.

El lograr entender cómo se comporta la temperatura superficial del suelo en relación con los fenómenos naturales climatológicos y los provocados por el hombre, antropogénicos; permite crear un acervo cultural general y universal, para la creación de políticas desde todos los ámbitos gubernamentales o privados. Al comprender qué es la movilidad no solamente está ligada a problemas de inadecuada gestión del tráfico, inaccesibilidad, exclusión social, y efectos económicos, sino también a las afectaciones ambientales, problemas de contaminación en el aire, contaminación de ruido, deterioro del paisaje urbano y ahora, con los datos arrojados por el estudio se puede abordar que genera un discomfort térmico que no solo repercute en la eficiencia energética de los edificios y del espacio urbano en general, sino sobre todo en la sensación que viven los peatones a la hora de su movilización o realizar actividades al aire libre.

Es por tanto que las políticas de movilidad deben ser analizadas desde diferentes perspectivas no sólo como una necesidad del hombre sino con su vinculación al medio natural, con esto se reafirma que porque uno de los puntos fuertes de la agenda ONU hábitat 2030 es la movilidad.

El trabajo busca apoyar como fundamentación en la justificación de nuevos planteamientos en el diseño de rutas en la movilidad urbana, como una herramienta de detección en los comportamientos térmicos de las ciudades y apoyo en el análisis y ordenamiento de los usos de suelo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen por todo el apoyo a CONACYT; PROMEP/PRODEP de SEP; Coordinación de la Investigación Científica, Facultad de Ingeniería Civil, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura (PIDA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Facultad de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Región Veracruz.

6. Referencias

- Barradas, V. (2016). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *UNAM, Oikos Publicación del Instituto de Ecología*, 1-4.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands, Understanding and mitigating heat in urban areas*. New York: Earthscan from Routledge.
- Grajeda, R., Alonso, E., Esparza, E., Martínez, W., Chavez, H., & Limón, E. (2020). Mapping the LST (Land Surface Temperature) with Satellite Information and Software ArcGis. *In Materials Science and Engineering Conference Series*, 811(1), 012045. doi: 10.1088/1757-899X/811/1/012045
- Kolbe, K. (2019). Mitigating urban heat island effect and carbon dioxide emissions through different mobility concepts: Comparison of conventional vehicles with electric vehicles, hydrogen vehicles and public transportation. *Transport Policy*, 80, 1-11. doi:10.1016/j.tranpol.2019.05.007
- Moreno García, M. (1997). Una propuesta de terminología castellana en climatología urbana. *Investigaciones geográficas*, 17(1997), 89-97. doi:10.14198/INGEO1997.17.08
- Quintero-González, J.-R. (2017). Del concepto de ingeniería de tránsito al de movilidad urbana sostenible. *Ambiente Y Desarrollo*, 21(40), 57-72. doi:10.11144/Javeriana.ayd21-40.citm
- SCT. (2020). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Obtenido de Sistema Portuario Nacional: <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- Serricola, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes terra-MODIS y análisis de componentes principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123-141. doi:10.4067/S0718-34022014000100009
- Voogt, J., & Oke, T. (2002). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8

• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Materiales y Nanomateriales





MATERIALES Y NANOMATERIALES

Evaluación del desempeño mecánico de concretos celulares autoclaveados para la elaboración de paneles ligeros

F.A. Alonso Farrera, I.A. Samayoa Aquino, J.F. Grajales Marín,
M. Nazar Beutelspacher

Cuerpo Académico de Construcción Sustentable, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Chiapas

*Autor de Contacto: alfa@unach.mx

Resumen

En los últimos años se han tenido grandes avances en la tecnología del concreto, por lo que se puede decir que existen concretos especializados para un uso o requerimiento necesario en la construcción. El Concreto Celular Autoclaveado (CCA), es un concreto ligero desarrollado en Europa y que con el tiempo se ha comercializado y distribuido a nivel mundial. En este proyecto se propuso como objetivo realizar un estudio técnico del diseño de mezclas de CCA usando materiales de la región, con la finalidad de producirlo de manera comercial como material prefabricado en la construcción. Se realizaron ensayos para conocer su resistencia mecánica, cuyos resultados indicaron que cumplen con lo especificado en las normas para este tipo de concretos.

Palabras clave: concreto; Curado; Autoclaveado; Ligero; Celular.

Abstract

Currently, there are many types of concrete, designed for different applications. Among these types is Autoclaved Aerated Concrete (AAC), a lightweight concrete developed in Europe and that over time has been marketed and distributed worldwide. The objective of this project was to carry out a technical study of the design of CCA mixtures in order to produce it commercially as a precast material in construction, using materials from the region. Tests were carried out to determine its mechanical resistance, the results of which indicated that they comply with what is specified in the regulations for this type of concrete.

Keywords: Concrete; Curing; Autoclaved; Lightweight; Cellular.

Resumo

Nos últimos anos ocorreram grandes avanços na tecnologia do concreto, podendo-se dizer que existem concretos especializados para um uso ou exigência necessária na construção. O concreto celular autoclavado (CCA) é um concreto leve desenvolvido na Europa e que ao longo do tempo foi comercializado e distribuído em todo o mundo. O objetivo deste projeto foi realizar um estudo técnico de dimensionamento de misturas de CCA a partir de materiais da região, a fim de produzi-lo comercialmente como um material pré-fabricado na construção. Foram realizados ensaios para averiguar a sua resistência mecânica, cujos resultados indicaram estar de acordo com o que está especificado nas normas para este tipo de betão.

Palavras-chave: Concreto; Curado; Autoclavado; Leve; Celular.

1. Introducción

El Concreto Celular en Autoclave (CCA) es un material ligero prefabricado, elaborado con materias primas naturales, perteneciente a la gama de concretos celulares, cuya composición se basa en el empleo de agregados de granulometría fina, cemento, cal, arena y agua, posee un proceso posterior al fraguado que consiste en su curado mediante un tratamiento en autoclave. Se ha utilizado en la fabricación de bloques para mampostería y para elementos reforzados prefabricados, cumpliendo con las exigencias de soporte estructural, aislamiento térmico, aislamiento acústico y protección contra incendios. En Latinoamérica existe un muro invisible para el desarrollo del concreto celular, ya que se opta por los sistemas tradicionales pesados, es por esto, que la divulgación del concreto celular debe comenzar a partir de sus propiedades mecánicas y bondades económicas (Luzardo y Arraga, 2004). De acuerdo a Jiménez (2014), la demanda de soluciones habitacionales integrales es vigente y se encuentra en pleno apogeo, el nuevo reto de la industria se enfoca en lograr soluciones prefabricadas de alto estándar y buen desempeño en relación con el costo. Actualmente, pocos contratistas están familiarizados con la producción y uso de concretos celulares y deben adaptarse a su uso en lugar del mortero tradicional a base de cemento, que requiere menos precisión en su aplicación (Schnitzler, 2006). La normativa del ACI 523.3R-14 presenta una guía detallada para la elaboración de concretos celulares en autoclave y aunque el proceso de fabricación del CCA ya se encuentra definido y se ha usado para la construcción de viviendas (Luzardo y Arraga, 2004), es importante conocer las características del CCA en cuanto a su elaboración a un nivel regional, para ser usado como material de construcción en Chiapas.

2. Procedimiento

Para la elaboración de CCA con materiales propios de la región se sigue lo establecido en la normativa del ACI 523.3R-14, realizando los ajustes necesarios para obtener los resultados que se buscan, el esquema para secuencia de mezclado se muestra en la figura 1.

Como se aprecia en la figura 1, esta mezcla requiere de un agente espumante que se añade a la mezcla en una relación agua-jabón de 1:40. En este proyecto, este proceso se hizo por medio de un dispositivo fabricado con tubos y conexiones de PVC hidráulico y manguera de alta presión (figura 2) capaz de soportar las presiones inducidas por un compresor de aire (50 - 100 PSI de presión). La capacidad de almacenamiento del dispositivo diseñado es de un litro aproximadamente.

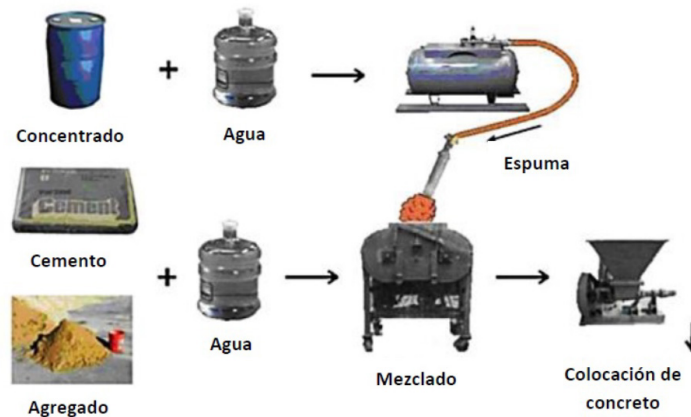


Figura 1. Esquema de secuencia de mezclado (ACI 523.3R-14).



Figura 2. Dispositivo generador de espuma (Elaboración propia).



Figura 3. Ensayos de caracterización de la arena (Elaboración propia).

Para el diseño de mezcla del CCA, fue necesario conocer la densidad de la espuma y la caracterización de la arena obtenida del banco de Santo Domingo (figura 3), bajo las normas NMX-C-077, NMX-C-165 y NMX-C-166.

De acuerdo a la normativa ACI 523.3R-14, una densidad adecuada de espuma siempre oscila de 32 - 80 kg/m^3 , la tabla 1 muestra la densidad de la espuma obtenida con un shampoo de marca conocida y la figura 4 muestra el proceso de obtención del agente espumante.

Se diseñaron 7 distintas mezclas de acuerdo a lo que establece la normativa ACI 211.1, usando cemento portland compuesto (CPC) por las adiciones que contiene. En la Tabla 2 se muestra la dosificación de la mezcla 7 que fue la que proporcionó mejores resultados,

Tabla 1. CDosificación Mezcla 7.

Densidad shampoo de marca conocida 50 ml (vaso plástico)	
Volumen del contenedor (m ³)	0.00025
Peso contenedor + espuma (kg)	0.0155
Densidad espuma (kg/m ³)	62
Elaboración propia	



Figura 4. Medición del agente espumante (Elaboración propia).

Tabla 2. Dosificación Mezcla 7.

Volumen requerido (m³)	0.018
Cemento CPC (Kg)	6.993
Agua (Lts.)	2.840
Arena (Kg)	19.096
Espuma (Kg)	0.351
Elaboración propia	



Figura 5. Simulación de curado en autoclave (Elaboración propia).

Para cada diseño de mezcla se realizaron 32 especímenes cilíndricos, 8 especímenes rectangulares y 8 paneles de 2.5*50*100 cms de acuerdo a lo establecido en Alonso *et al.* (2017), reforzados con malla de acero galvanizado hexagonal de 50 mm, que fueron curados en una simulación propuesta de autoclave (figura 5), para la realización de ensayos de resistencia a compresión (figura 6), flexión (figura 7), módulo de elasticidad y prueba de carga (figura 8). La elaboración, curado y ensayo de especímenes se realizó de acuerdo a las normas NMX-C-083, NMX-C-109, NMX-C-159, NMX-C-414 y NMX-C-191.



Figura 6. Elaboración de especímenes cilíndricos y su ensayo a compresión (Elaboración propia).



Figura 7. Elaboración de especímenes rectangulares y su ensayo a flexión (Elaboración propia).



Figura 8. Elaboración de panel rectangular y su ensayo a carga y descarga (Elaboración propia).

3. Análisis de Resultados

En lo referente a la resistencia a compresión, a los resultados de los especímenes ensayados de cada mezcla, se les realizó una prueba estadística, siendo la mezcla 7 la que obtuvo mejores resultados con una media de $f^c=13.79$ MPa, $s = 0.2807$ y un intervalo de confianza IC 95 % (13.65, 13.93), en la figura 9 se muestran los resultados en promedio de los cilindros ensayados para cada mezcla.

Como se puede apreciar, con los diseños de mezcla 6 y 7 se obtuvieron resistencias mayores de 13 MPa, resultados muy satisfactorios para concretos ligeros, con pesos volumétricos menores de 1,800 kg/m³, de acuerdo a lo establecido en la normatividad y a los obtenidos por Almada *et al.* (2006) y Medina y Yáñez (2014).

Con respecto a los ensayos a flexión, la mezcla 7 resistió en promedio una carga de 1,050.00 kg, lo que equivale a una resistencia a flexión de 1.4 MPa, resistencia aceptable para CCA de acuerdo a la normativa. Los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad en promedio para cada una de las mezclas se presentan en la figura 10, se pueden observar que estos son muy bajos por los vacíos que se presentan en el CCA.

Por último, el comportamiento de la placa, diseñada con la mezcla 7 y reforzada con malla, fue bueno cuando se le aplicaron 3 ciclos de carga y descarga, teniendo un desplazamiento aceptable (tabla 3).

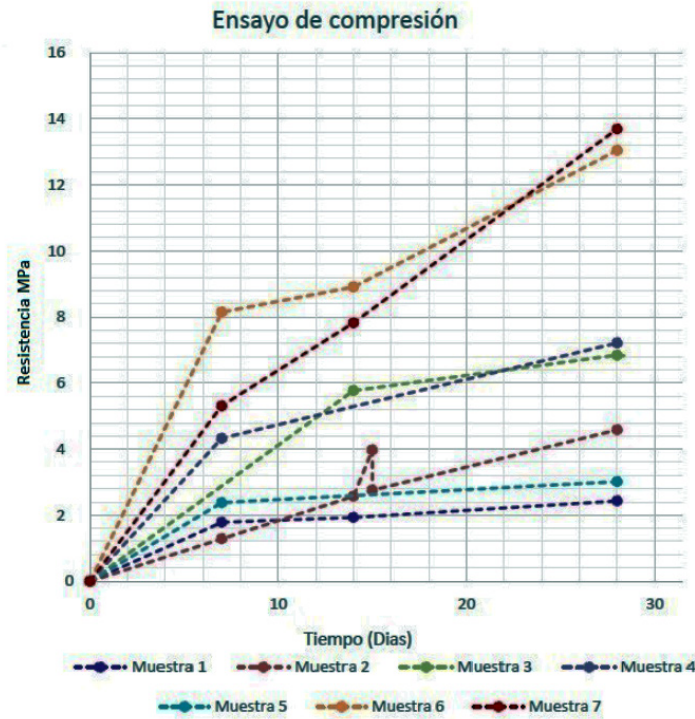


Figura 9. Gráfica de resistencias a compresión (Elaboración propia).

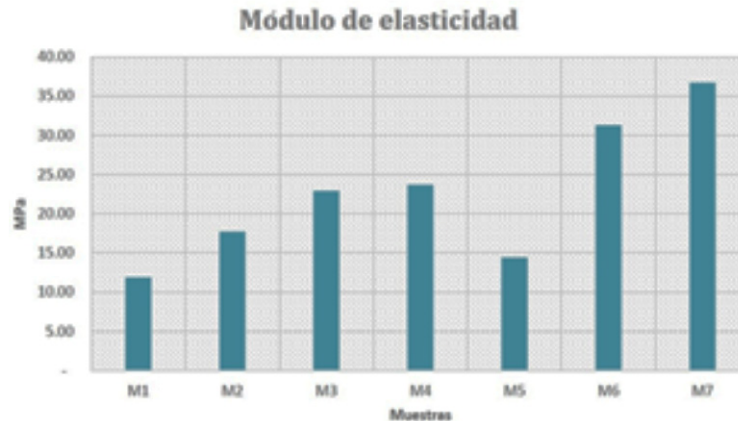


Figura 10. Resultados de Módulo de elasticidad (Elaboración propia).

Tabla 3. Ciclo 1, 2 y 3 de la placa 7.

Ciclo 1	Carga (Kg)	Deformación (mm)
1	15	1.674
2	15	2.238
3	15	Falla
Elaboración propia		

4. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto fue evaluar el desempeño mecánico de CCA para poder ser utilizado en la elaboración de paneles ligeros para la construcción de viviendas modulares, como se puede apreciar en los resultados obtenidos de los ensayos realizados, es posible elaborar CCA con materiales de la región, cumpliendo con los valores requeridos por las normas para este tipo de concreto.

Es importante considerar que en este estudio se hizo una simulación de curado en autoclave cuyos resultados fueron comparados con especímenes de CCA curados de manera convencional, a pesar de que se obtuvieron resultados satisfactorios, este proceso debe ser mejorado para obtener resultados mayores a los alcanzados en este estudio, así como también es necesario mejorar la tecnología empleada en el dispositivo para producir el agente espumante.

5. Referencias

- Almada, D., Yeomans, F., Nungaray, C. and Elizondo, A. (2006). Caracterización de concreto celular a base de espuma preformada. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. SMIE
- Alonso, F., Reynosa, L., Castellanos, E., Nazar, M. and Cruz, J. (2017). Estudio técnico para la elaboración de viviendas modulares a base de paneles elaborados con concreto ligero reciclado. La investigación universitaria y sus contribuciones en Mesoamérica. Ed. CLACSO
- Jiménez, R. (2014). Concreto Aireado en Autoclave, Estado Actual de la Técnica y Perspectiva de Futuro (Tesis Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Luzardo, J. y Arraga, R. (2004). Análisis del Concreto Celular y sus Aplicaciones en la Fabricación de Paneles Livianos (Tesis de Licenciatura). Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.
- Medina, D. and Yáñez, S. (2014). Análisis de viabilidad para el uso del mortero celular en Colombia a partir de la revisión del estado del arte. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.
- Schnitzler, S. (2006). Autoclaved Aerated Concrete as a Green Building Material. UC David Extension.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Desempeño por ductilidad de compuestos cementantes ingenierizados reforzados hibridamente con fibras de PVA, basalto y vidrio

M. Cabrera-Leal, A. Durán-Herrera

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: martin-leal1993@hotmail.com

Resumen

El estudio presentado tiene como objetivo evaluar a manera de una comparación técnicamente más justa el desempeño dúctil de los compuestos cementantes ingenierizados (ECC) reforzados hibridamente con fibras de PVA, basalto y vidrio. Mediante un procedimiento de incorporación de las fibras en base al área superficial correspondiente a la adición de un ECC típico con 2 % de fibras de PVA, como referencia. Los resultados indican que esta dosificación permite que tanto las propiedades en estado fresco, como a compresión se mantengan similares. Sin embargo, la resistencia a la flexión varía debido a que las propiedades mecánicas y geométricas de las fibras juegan un rol importante en la ductilidad de las mezclas. **Palabras clave:** ECC; SHCC; HPFRCC; PVA; basalto; Vidrio.

Abstract

This study aims to evaluate, as a technically fairer comparison, the ductile performance of engineered cementitious composites (ECC) with a hybridized reinforcement with PVA, basalt and glass fibers. Through a process of incorporating the fibers based on the specific surface area corresponding to the addition of a typical ECC with 2% of PVA fibers, as a reference. The results indicate that these additions allow the fresh state and compressing strength properties to remain similar. However, flexural strength differs because the mechanical and geometric properties of the fibers play an important role in the ductility of the composites.

Keywords: ECC; SHCC; HPFRCC; PVA; basalt; Glass.

1. Introducción

El concreto es un material que se utiliza principalmente por su resistencia a la compresión, sin embargo, por ser extremadamente frágil, su resistencia a la tensión/flexión es extremadamente baja, por lo que inclusive para fines prácticos se llega a considerar nula. En la actualidad, la necesidad de mejorar la ductilidad adicionando fibras, se está tornado un tema prioritario para extender el uso del concreto a otras aplicaciones, su vida útil y su resiliencia ante catástrofes naturales. Las investigaciones sobre concretos fibro-reforzados (CFR) en los que se utilizaron diversos tipos de fibras aparecieron en 1960 (Romualdi y Batson, 1963). Esta investigación demostró por primera vez que el uso de fibras de acero reducía la naturaleza frágil del concreto, al incrementar su resistencia a la tensión. Estas investigaciones continúan hasta nuestros días con el uso de otras fibras, como las de vidrio, carbón, sintéticas y naturales. En años recientes los concretos fibro-reforzados híbridos, combinan las propiedades mecánicas y geométricas de diferentes tipos de fibras con el objetivo de lograr un desempeño sinérgico en los efectos que por separado tienen en las propiedades mecánicas del concreto y por consiguiente optimizando la respuesta mecánica y la ductilidad del compuesto (Li *et al.*, 2001).

El interés en mejorar el desempeño de los CFR, inicio en los años ochenta. Sin embargo, se observó que, al incrementar la tenacidad, no se incrementa la ductilidad, la cual se define como la capacidad que tiene un material de deformarse bajo carga, pero sin llegar a romperse. Esta es una característica típica del acero dúctil, pero no del concreto (Manish y Kewalramani Osama, 2017).

Con el objetivo de alcanzar una ductilidad en los concretos, Lankard y Naaman comenzaron a estudiar la densidad de la matriz cementante y el volumen óptimo de adición de fibras de acero para lograr una resistencia a la tensión superior a la del concreto normal. Además, Las investigaciones en refuerzos con mallas textiles y morteros para incrementar la ductilidad, constituyen los primeros antecedentes de lo que hoy se conoce como compuestos cementantes fibro-reforzados de alto desempeño (HPFRCC, por sus siglas en inglés) (Manish y Kewalramani Osama, 2017).

Los HPFRCC, son materiales que presentan un endurecimiento por deformación al someterse a esfuerzos de tensión directa y/o de flexión. Este comportamiento se presenta debido a que al deformarse el material se propagan múltiples grietas a lo largo de la zona de falla y a este tipo de comportamiento es al que se le atribuyen los beneficios en términos de ductilidad. Los compuestos cementantes ingenierizados (ECC) son el más claro ejemplo de un HPFRCC, el cual fue diseñado principalmente en función de la micro mecánica y del mecanismo de fractura (Keitetsu, 2008). Con estas investigaciones Víctor C. Li, demostró que el uso de fibras de PVA en compuestos cementantes es una alternativa para producir concretos con características especiales, abriendo un amplio campo de investigación, que rápido cobro mucho interesen el mundo (Manish y Kewalramani Osama, 2017).

Los ECC proporcionan un desempeño por ductilidad extraordinariamente alto, comportamiento que surge como resultado del trabajo de una matriz densa reforzada con fibras de PVA, típicamente dosificadas a razón de 2% con relación al volumen del concreto (Li y Kanda, 1998). Estos concretos dúctiles están diseñados principalmente por fundamentos micromecánicos, adquiriendo propiedades mecánicas de ductilidad debida a un endurecimiento por deformación. El enfoque de estos diseños va orientado al desempeño estructural, a la ductilidad y a una multi-fisuración a lo largo del área de falla. El ECC típico adquiere una resistencia a la compresión en un rango de 500 a 600 kgf/cm² y sus compuestos principales según Víctor C. Li, tienen la siguiente proporción típica en masa: Cemento 1.0, Ceniza Volante 1.2, Arena silica 0.8, Agua 0.58, Aditivo

superfluidificante 0.013 y una dosificación de fibras de polivinilo del alcohol (PVA) en una dosificación en relación a la fracción del volumen del 2 % (Li y Kanda, 1998).

Los ECC pueden ser clasificados como una familia de materiales que se pueden ajustar dependiendo de las demandas que se proyecten para la estructura en términos de resistencia a la compresión, de resistencia a la tensión y de ductilidad. Así mismo, además de sus características comunes de tensión, ductilidad y multifisuración, estos compuestos representan una familia de materiales con diferentes funcionalidades (Kong *et al.*, 2003), por ejemplo:

- El ECC autocompactable (ECC-M45) está diseñado para usarse a gran escala en el lugar de la obra (Kong *et al.*, 2003).
- El ECC de altas resistencias tempranas (HS-ECC) está diseñado para estructuras que requieren un endurecimiento acelerado, por ejemplo; las autopistas que requieren una apertura rápida para que los vehículos puedan transitar (Wang y Li, 2003).
- El ECC aligerado (LW-ECC) que está diseñado principalmente para aplicaciones donde la carga muerta de la estructura necesite ser minimizada (Wang y Li, 2003).
- El ECC amigable con el medio ambiente (G-ECC) el cual se utiliza con fines de sustentabilidad ambiental y para minimizar la huella de carbono del material cementante (Wang y Li, 2003).
- El ECC autorreparable (SH-ECC) el cual se recupera en un cierto porcentaje respecto a su estado inicial después de sufrir un daño en sus propiedades mecánicas (Wang y Li, 2003).

La aplicación de estos compuestos está enfocada para los usos específicos de la ingeniería civil, que necesiten un comportamiento mecánico dúctil, en atención a los esfuerzos a los que estarán sometidos y a asegurar un agrietamiento distribuido en multi-fisuras. Las propiedades del ECC son en gran parte debidas al desempeño de las fibras de PVA y por el puente de adherencia entre la matriz cementante y la fibra, lo que conduce a una falla de múltiple micro-agrietamientos. Sin embargo, estas fibras presentan un elevado costo en comparación con otro tipo de fibras, lo que representa una de las limitantes de los ECC en muchas de las aplicaciones normales de la ingeniería civil (Li y Kanda, 1998) (Lu *et al.*, 2018) (Esmaeeli, 2012).

En la actualidad las fibras de basalto y vidrio han sido utilizadas como microfibras para concreto, debido a sus buenas propiedades mecánicas y bajo costo, en comparación con las fibras de PVA y acero. En el presente trabajo, el ECC de estudio se reforzó con adiciones híbridas de fibras de PVA/Basalto y PVA/Vidrio, poniendo especial énfasis en la tecnología de la dosificación por área superficial, con el objetivo de mantener las propiedades en estado fresco y resistencias a la compresión similares. De esta manera es posible comparar en laboratorio, de una manera más directa el desempeño por ductilidad que estas fibras le confieren al ECC. Debido a que las fibras de vidrio y basalto tienen propiedades geométricas y mecánicas muy similares a las de PVA y a que representan una tercera o cuarta parte del costo de las fibras de PVA, estas fibras representan una alternativa muy atractiva para investigar su incorporación como opciones para reforzar, en combinación con las fibras de PVA a los ECC y para detonar su aplicación en un mayor número de soluciones en proyectos de ingeniería civil. (Li *et al.*, 2001) (Holubova, 2017) (Rybin *et al.*, 2016) (Kanda *et al.*, 1998)

2. Procedimiento

Con el objetivo de evaluar el efecto a ductilidad que los sistemas híbridos de adición de fibras de basalto/PVA y vidrio/PVA le confieren a los ECC, A continuación se describen las actividades que se ejecutaron

para este fin, como son: el procedimiento de cálculo para adicionar las fibras de basalto y vidrio en relación al área superficial correspondiente al 2% de fibras de PVA, el proporcionamiento de las mezclas, el procedimiento de mezclado, la obtención de las propiedades en estado fresco, la elaboración de los especímenes y la medición de sus propiedades en estado endurecido.

2.1 Calculo de la adición de fibras en base al área superficial

Como ya se mencionó anteriormente, los ECC son reforzados típicamente con un 2 % de fibras de PVA en relación al volumen de un metro cubico. Dando como resultado, que por cada metro cubico de ECC se adicionan 25.98 kg de fibras de PVA. En el presente trabajo se plantea un procedimiento de cálculo para adicionar las fibras de basalto y vidrio en relación al área superficial que correspondiente a 25.98 kg de fibras de PVA, lo cual tiene el objetivo de conservar la misma fluidez y extensibilidad en las mezclas fibro-reforzadas con basalto, vidrio y los refuerzos de fibras híbridos de PVA/ basalto y PVA/vidrio.

La adición por área superficial, tiene por objetivo que la fracción en volumen de adición de fibras sea la misma, con el fin de poder comparar de mejor manera el desempeño que le atribuye cada fibra al ECC y la sinergia provistas por la fibra de PVA en combinación con fibras de basalto y/o vidrio, así como el de conservar las mismas propiedades en estado fresco del ECC (Fluidez, Contenido de aire y extensibilidad). Por lo tanto, el cálculo del área superficial se realizó, idealizando a las fibras como un cilindro perfecto. El cálculo matemático se describe a continuación:

El área superficial de un cilindro está dada por la siguiente formula:

$$A.S=2\pi rl+2\pi l^2 \quad (1)$$

Donde l es la longitud, y r el radio del cilindro.

Calculamos el área superficial de una fibra de PVA considerando las fibras completamente cilíndricas, con un diámetro de $36 \mu\text{m}$ y una longitud de $8.00\text{E}03 \mu\text{m}$ obtenidos a partir de los promedios obtenidos de la medición de 30 fibras de PVA, utilizando como herramienta de medición a las imágenes provistas por los análisis de microscopia electrónica de barrido, como las que se pueden observar en la figura 1.

De la ecuación (1) se tiene que el área superficial AS de una sola fibra de PVA es:

$$\begin{aligned} A.S &= 2\pi \cdot 8.00 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot (18 \mu\text{m}) + 2\pi (8.00 \times 10^3 \mu\text{m})^2 \\ A.S &= 906814.43 [\mu\text{m}^2] \quad (1.1) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Para conocer la masa de un filamento de fibra de PVA se utiliza la siguiente ecuación

$$m = \rho v \quad (2)$$

Conociendo la densidad de un filamento de fibra de PVA (ρ)

$$\rho = 1.29 \times 10^{-12} [\text{g}/\mu\text{m}^3]$$

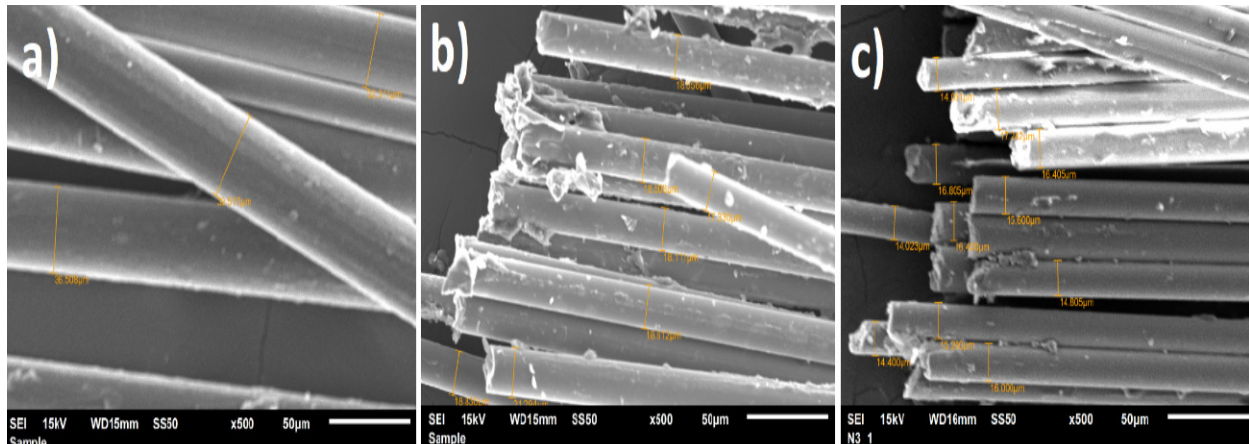


Figura 1. Morfología de las fibras a) fibras de PVA (diámetro de 36 µm), b) fibras de vidrio (diámetro de 17 µm), fibras de basalto (diámetro de 17 µm).

Y calculando el volumen de un filamento de fibra de PVA, volviendo a considerarla perfectamente cilíndrica

$$\begin{aligned}
 V &= l\pi r^2 \\
 V &= (8.00 \times 10^4 \mu\text{m}) \pi (18 \mu\text{m})^2 \\
 V &= 8143008.15 [\mu\text{m}^3] \quad (3)
 \end{aligned}$$

La masa de un filamento de fibra de PVA es de:

$$\begin{aligned}
 m &= (1.29 \times 10^{-12} \left[\frac{\text{g}}{\mu\text{m}^3} \right]) (8143008.15 [\mu\text{m}^3]) \\
 m_{\text{PVA}} &= 1.05 \times 10^{-5} [\text{g}] \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Partiendo de que es necesaria una masa de 25.98 kg de fibras de PVA para un metro cubico de ECC, se calculó el número de filamentos (N.F.) correspondientes, como se indica a continuación:

Se divide la masa de un 2% de fibras de PVA (25.98 kg) entre la masa de un filamento de fibra para conocer el número de filamentos presentes en el ECC.

$$\begin{aligned}
 \text{Núm. Fibras} &= \frac{\text{Masa necesaria}}{m_{\text{PVA}}} \\
 \text{N.F.} &= \frac{25980.0 \text{ g}}{1.05 \times 10^{-5} \text{ g}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\text{N.F.} = 2.473 \times 10^9 \quad (4.1)$$

Conociendo el número de filamentos de fibra de PVA y el área superficial de cada filamento, se puede calcular el área superficial total (A.S.T.) de las fibras en el ECC:

$$\begin{aligned} A.S.T. &= (N.F.PVA)(A.S.PVA) \\ A.S.T. &= 2.473 \times 10^9 \# (906814.43) [\mu m^2] \\ A.S.T. &= 2.243 \times 10^{15} [\mu m^2] \end{aligned} \quad (5)$$

Esta área superficial es fundamental, ya que será el parámetro para dosificar cualquier otra fibra en un ECC, en este trabajo las fibras de basalto y vidrio.

Ahora para esta área superficial de referencia se calcula la masa correspondiente de fibras de basalto: Se calcula el área superficial que genera un filamento de fibra basalto con la ecuación (1)

$$A.S._{Basalto} = 1122002.53 [\mu m^2] \quad (1.2)$$

Se calcula el número de filamentos de fibras de Basalto

$$\begin{aligned} N.F. &= \frac{A.S.T.}{A.S._{Basalto}} \\ N.F. &= 1.999 \times 10^9 \end{aligned}$$

El volumen y la masa de un filamento de fibra de basalto se calculan con las ecuaciones (3) y (2)

$$\begin{aligned} V_{Basalto} &= 4766581.45 [\mu m^3] \\ m_{Basalto} &= 1.26 \times 10^{-5} [g] \end{aligned}$$

La masa requerida de fibras de basalto para producir un metro cubico de ECC se calcula multiplicando la masa de un solo filamento de fibra de basalto ($m_{Basalto}$) por el número de fibras (N.F.) necesarias para tener una área superficial total de $2.243 \times 10^{15} [\mu m^2]$

$$\begin{aligned} M_{Basalto} &= (m_{Basalto})(N.F.) \\ M_{Basalto} &= 1.26 \times 10^{-5} [g] \# (1.999 \times 10^9) \\ M_{Basalto} &= (25,248.88 [g]) \end{aligned}$$

Ahora, de la misma manera se calcula la masa de fibras de vidrio necesaria para generar el área superficial generada por la fibra de PVA ($2.243 \times 10^{15} [\mu m^2]$). (Se calcula el área superficial que genera 1 fibra de vidrio con la ecuación (1)

$$A.S._{Vidrio} = 1015188.38 [\mu m^2] \quad (1.2)$$

Se calcula el número de filamentos de vidrio dividiendo el A.S.T. de las fibras de PVA entre el A.S. de una sola fibra de vidrio.

$$N.F. = \frac{A.S.T.}{A.S. \cdot Basalto}$$

$$N.F. = 2.209 \times 10^9$$

El volumen y masa de un filamento de vidrio se calculan con las ecuaciones (3) y (2)

$$V_{Vidrio} = 4312621.31 \text{ } [\mu\text{m}^3]$$

$$m_{Vidrio} = 1.11 \times 10^{-5} \text{ } [g]$$

La masa requerida de fibras de vidrio para producir un metro cubico de ECC se calcula multiplicando la masa de una sola fibra de vidrio (m_{Vidrio}) por el número de filamento (N.F.) necesarias para tener una área superficial total de $2.243 \times 10^{15} [\mu\text{m}^2]$

$$M_{Vidrio} = (m_{Vidrio})(N.F.)$$

$$M_{Vidrio} = "1.11 \times 10^{-5} [g] \# (2.209 \times 10^9)$$

$$M_{Vidrio} = (24580.88 \text{ } [g])$$

En la tabla 1 se pueden ver los resultados de los cálculos realizados para obtener la masa necesaria para fabricar 1 m^3 de ECC con las fibras de PVA, basalto y vidrio, tomando como referencia un A.S.T. de .

2.2 Proporcionamiento de las mezclas de ECC

En la tabla 2 se muestran las 8 mezclas que se fabricaron en esta investigación. La mezcla 1 (ECC - 0 %) es una mezcla de ECC sin fibras, la mezcla 2 (ECC - PVA 2.0 %) es la mezcla de referencia de un ECC típico adicionado con un 2 % de fibras de PVA con relación al volumen de concreto.

Para cada una de las fibras de basalto y vidrio se fabricaron tres mezclas, en las cuales se substituyo la fibra de PVA en 25, 50 y 100 %, con relación al A.S.T. correspondiente a un 2.0 % de la fibra de PVA, en relación

Tabla 1. Resultados del cálculo para definir el área superficial de las fibras y la dosificación en masa por metro cubico de las fibras de basalto y vidrio, tomando como referencia el 2% de la fracción del volumen de fibras de PVA por metro cubico de ECC.

Fibra	Longitud (μm)	Diametro (μm)	Densidad (g/μm³)	Volumen (μm³)	Masa (g) de 1 fibra	Masa necesaria para 1 m3 (g)	A.S de una fibra (μm²)	A.S.T. del total de fibras (μm²)	Num. Fibras
PVA	8.00E+03	36	1.29E-12	8143008.158	1.05E-05	25980.00	906814.4363	2.243E+15	2.473E+09
Basalto	2.10E+04	17	2.65E-12	4766581.454	1.26E-05	25248.88	1122002.537	2.243E+15	1.999E+09
Vidrio	1.90E+04	17	2.58E-12	4312621.315	1.11E-05	24580.88	1015188.387	2.243E+15	2.209E+09

Tabla 2. Proporciones para un metro cubico de las mezclas.

No.	Nombre de la mezcla	Cemento (CPO) kg	Ceniza Volante (CV) kg	Arena silica (AS) kg	Agua L	(a/c)	Aditivo SP (%)	Fibras (X) [Y]		
								PVA (g)	Basalto (BAS) (g)	Vidrio (VID) (g)
1	ECC - 0 %	597	716.4	477.6	346	0.28	2.3	-	-	-
2	ECC - PVA 2.0 %							25980.0 (2%)	-	-
3	ECC - BAS 2.0* %							-	25248.8 [1]	-
4	ECC - PVA 1.5 / BAS 0.5* %							19485.0 [0.75]	6312.22 [0.25]	
5	ECC - PVA 1.0 / BAS 1.0* %							12990.0 [0.5]	12624.44 [0.5]	-
6	ECC - VID 2.0* %									24580.9 [1]
7	ECC - PVA 1.50 / VID 0.5* %							19485.0 [0.75]	-	6145.22 [0.25]
8	ECC - PVA 1.0 / VID 1.0* %							12990.0 [0.5]	-	12290.44 [0.5]

(No.) Dosificación de la fibra en volumen (%)
[No.] Los números indican la proporción con la que contribuye cada fibra para dosificar un área superficial total, igual a la correspondiente a la fibra de PVA (mezcla 2)

al volumen de concreto, la identificación para estas mezclas y las proporciones correspondientes aparecen en la tabla 2. Haciendo una lectura de izquierda a derecha, en esta tabla, el primer número que aparece en la identificación corresponde al volumen de fibra de PVA y el segundo al volumen de fibra de basalto (BAS) o vidrio (VID). El aditivo superfluidificante se utilizó para dar una fluidez objetivo a los concretos auto-compactables.

2.3 Procedimiento de mezclado

La adición de un aditivo superfluidificante es de fundamental importancia para lograr una dispersión homogénea de las fibras, pero teniendo cuidado de no sobre-dosificarlo para evitar una segregación. El procedimiento de mezclado se muestra en la figura 3, y se siguió tomando como referencia a los tiempos de mezclado de Victor Li. Para este fin se utilizó una mezcladora circular de eje horizontal con capacidad de 40 Litros. Ver figura 2.

Todos los ingredientes sólidos, incluyendo el cemento, arena silica, ceniza volante, se mezclaron primero durante 2 minutos. El 90 % de agua se añadió y se mezclaron durante 4 min. Después de agregar el resto de agua y aditivo, la mezcla se agitó durante otros 4 minutos. Cuando el ECC nuevo alcanzó un estado uniforme, se agregaron fibras lentamente y se mezclaron durante 2 minutos. Todo el proceso de mezcla se muestra en la figura 3. Posteriormente, las mezclas se colocaron en los moldes necesarios para realizar las probetas. Durante el proceso de colocación los moldes fueron vibrados durante 1 minuto, todas las muestras



Figura 2. Mezcladora de eje horizontal utilizada para fabricar las mezclas.

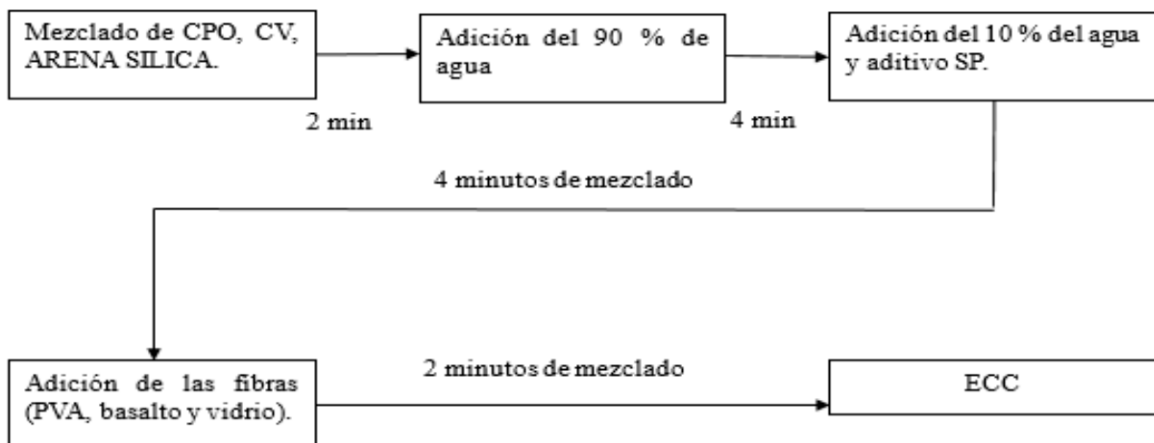


Figura 3. Procedimiento de mezclado del ECC.

se curaron durante 36 h en el cuarto de curado a una temperatura estándar de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del 95 ± 5 %. antes del desmolde. Después del desmolde, se curaron en la misma condición hasta la edad de ensayo (Soe *et al.*, 2013).

3. Metodos

En este apartado se describen los métodos utilizados para medir las propiedades en estado fresco y endurecido de los ECC.

3.1 Propiedades en estado fresco del ECC

Los métodos para medir las propiedades en estado fresco de las mezclas mencionadas en la tabla 3 se realizaron conforme a normativa. Las determinaciones de las propiedades en estado fresco permitieron evaluar el procedimiento de adición de las fibras en base al área superficial.

3.2 Propiedades en estado endurecido del ECC

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en probetas de cubos de 50 mm de acuerdo al procedimiento indicado en ASTM C 109, los cuales se ensayaron a compresión a las edades de 7, 14 y 28 días.

La ductilidad se midió conforme al método de ensayo ASTM C 78 pero con una geometría de los especímenes diferente al indicado por el método (100 mm de ancho, 400 mm de largo y 25 mm de espesor. La carga se aplicó a los tercios del claro libre de prueba. Se midieron los desplazamientos verticales con un LVDT. Con este ensayo registro tanto la resistencia a la flexión, como la deflexión de las vigas al centro del claro y el patrón de multi-fisuramientos a lo largo y ancho de la sección de la probeta, en su parte inferior.

4. Resultados

En la tabla 3 se observan que los valores de la masa unitaria de todas las mezclas, los cuales van de 1,855.0 a 1,865.0 kg/m³ son inferiores a 2450 kg/m³, por lo tanto, los ECC producidos en la presente investigación permiten ser clasificados como concretos ligeros de acuerdo al comité del ACI 213 [16]. Esta homogeneidad de la masa unitaria se debe a que la dosificación de fibras de PVA, basalto y vidrio es de 25.98, 24.254 y 24.34 kg respectivamente. Además, el gran contenido de C.V. presente en los compuestos con una densi-

Tabla 2. Resultados de las propiedades en estado fresco de las mezclas.

No.	Nombre de la mezcla	Propiedades en estado fresco del ECC					
		Fluidez ASTM C1437 (cm)	Contenido de aire UNE-EN 1015-7(%)	Masa Unitaria ASTM C138 (kg/m ³)	Extensibilidad ASTM C1611(cm)	T50 ASTM C1611	Índice de estab- ilidad visual ASTM C1611
1	ECC - 0 %	40	1.8	1855.0	-	-	-
2	ECC - PVA 2.0 %	23	3.3	1865.0	60	2.54	Alta estabilidad
3	ECC - BAS 2.0* %	23	3.3	1860.0	60	1.87	Alta estabilidad
4	ECC - PVA 1.5 / BAS 0.5* %	23	3.2	1862.5	60	2.48	Alta estabilidad
5	ECC - PVA 1.0 / BAS 1.0* %	23	3.4	1862.5	59	1.4	Alta estabilidad
6	ECC - VID 2.0* %	30	2.4	1858.8	81	0.89	Alta estabilidad
7	ECC - PVA 1.50 / VID 0.5* %	27	2.6	1860.0	67	1.8	Alta estabilidad
8	ECC - PVA 1.0 / VID 1.0* %	25	2.8	1857.5	74	1.67	Alta estabilidad

dad de 2.38 g/cm^3 permite reducir el peso de los ECC frente a los concretos convencionales. la diferencia promedio entre los pesos volumétricos obtenidos entre las mezclas estudiadas y este valor ($585 - 595 \text{ kg/m}^3$, 24 %) se debe principalmente a la diferencia en densidades entre la ceniza volante y el cemento portland, $1,855.0$ y $1,865.0 \text{ kg/m}^3$ respectivamente. Además, El incremento en el contenido de aire también influye, pero su efecto es de aproximadamente 18.55 kg por cada 1 % de incremento en el contenido de aire. En la figura 4 se observa que la dosificación de fibras reduce la fluidez de los ECC reforzados frente al ECC sin fibras. Para las dosificaciones realizadas por área superficial de las fibras de basalto frente a las fibras de PVA en las mezclas 3, 4 y 5 (ECC - BAS 2.0* %, ECC - PVA 1.5 / BAS 0.5* %, ECC - PVA 1.0 / BAS 1.0* %) presentan una fluidez de 23 cm que es igual a la fluidez presentada en la mezcla 1 (ECC -PVA 2.0 %), con lo cual es posible determinar que la variable del área superficial controlada en la dosificación, si determina la fluidez en los ECC.

En el caso de la dosificación de las fibras de vidrio en las mezclas 6, 7 y 8 (ECC - VID 2.0* %, ECC - PVA 1.50 / VID 0.5* %, ECC - PVA 1.0 / VID 1.0* %) se logró observar un incremento en la fluidez de 7, 4 y 2 cm respectivamente. Estos resultados varían de la misma manera respecto al refuerzo con fibras de basalto y los refuerzos híbridos PVA/basalto. Aunque las propiedades geométricas de las fibras de vidrio sean muy similares a las de basalto, las primeras presentan una aglomeración al momento de adicionarlas a los concretos (Vieira et al., 2009). Esa baja desfibrilación al momento de adicionarlas en el ECC reduce el área de contacto con la matriz cementante, lo cual ocasiona que la fluidez sea mayor a 23 cm, ya que en los otros ECC reforzados con fibras de PVA, basalto y PVA/basalto, las fibras si se dispersan homogéneamente en la matriz.

En la figura 5 se puede ver que para el ECC sin fibras el contenido de aire fue de 1.8 %, mientras que con la adición de fibras de PVA incrementó a 3.3 %, con lo cual se puede relacionar la adición de fibras con un incremento en el contenido de aire. Para las mezclas 3, 4 y 5 los contenidos de aire fueron de 3.3, 3.2 y 3.4

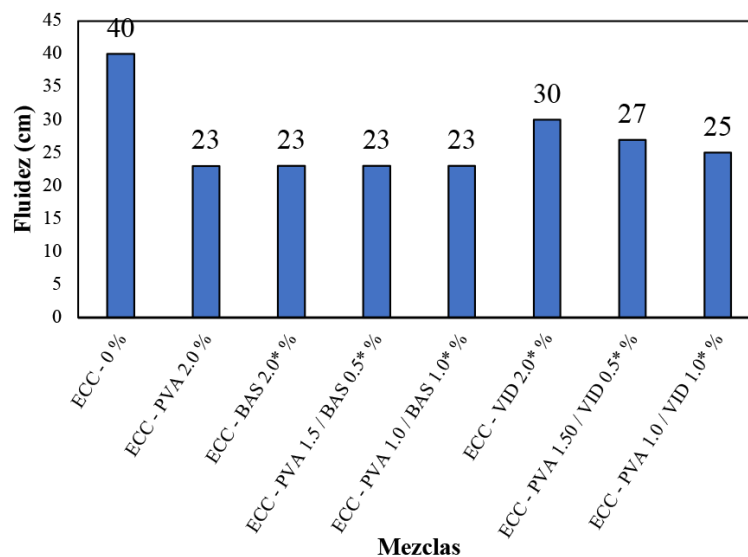


Figura 4. Comparación de la fluidez de las mezclas de ECC mediante el método ASTM C1437.

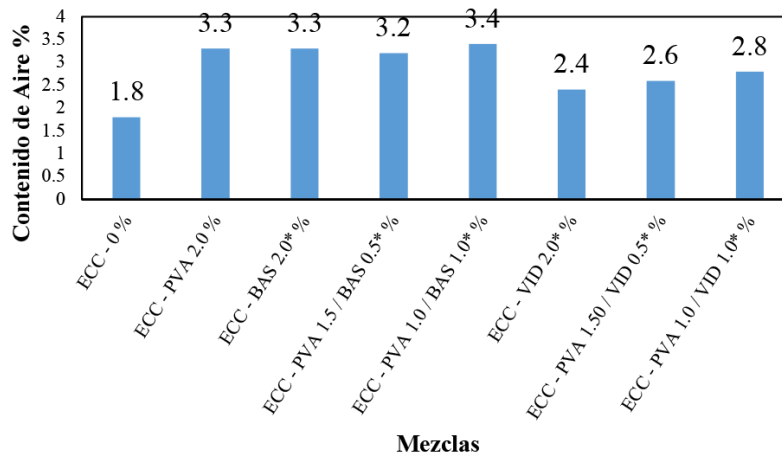


Figura 5. Comparación del contenido de aire de las mezclas utilizando el método de presión para morteros en un contenedor de 0.75 L, mediante la normativa UNE-EN 1015-7.

respectivamente, las cuales concuerdan con el comportamiento similar observado también en la fluidez, mientras que para las mezclas 6, 7 y 8, el contenido de aire fue de 2.4, 2.6 y 2.8%, con esto, se concluye que a mayor contenido de fibras de vidrio el contenido de aire es menor debido a que el área superficial de las fibras que está en contacto con la matriz del ECC es menor debido a la aglomeración que estas presentan.

Con los valores obtenidos de la extensibilidad, en la figura 6 se puede apreciar que según la norma ASTM C1611, todas las mezclas de ECC con fibras pueden clasificarse como auto-compactables, debido a que la extensibilidad que presentan es mayor a 50 cm. En términos de extensibilidad, se presenta un comportamiento similar que en los datos de fluidez. Dando, para las adiciones de ECC con fibras de PVA y basalto y los refuerzos híbridos PVA/basalto una extensibilidad de 59 cm para la mezcla 4 y para las restantes de 60 cm.

En el caso de las mezclas 6, 7 y 8, se observa que cuando el contenido de fibra de PVA es mayor que el contenido de fibra de vidrio, disminuye la extensibilidad. Determinando, que para la extensibilidad en los ECC a menor dispersión de fibras el diámetro es mayor.

En la figura 7 se observa que la resistencia a la compresión de los ECC es similar en todas las mezclas fibroreforzadas, pero no con el mortero de ECC sin fibras para el que se observa un aumento muy leve en sus resistencias. A diferencia de la resistencia a la compresión, es posible observar en los resultados a flexión una variación significativa debido a que la respuesta mecánica que las fibras le confieren al ECC es diferente dependiendo del tipo de fibra. EL ECC reforzado con 2% de fibras de PVA alcanzo una deflexión en el punto medio de 2.5 cm y una resistencia a la flexión de 8 a 10 MPa, al momento de que ocurriera el endurecimiento por deflexión.

En el caso de la dosificación de las fibras de vidrio en las mezclas 7 y 8 se logró observar una deflexión mayor que en comparación con las mezclas 4 y 5. Sin embargo, al comparar la deflexión de los refuerzos híbridos (mezclas 4, 5, 7 y 8) se observa que la mezcla de ECC típica con 2 % de fibras de PVA, tiene un mejor comportamiento dúctil, a excepción de la mezcla 7, la cual presento una deflexión de 2.0 a 2.5 cm, muy similar al ECC típico pero con una resistencia a la flexión en un rango de 6 a 8 MPa.

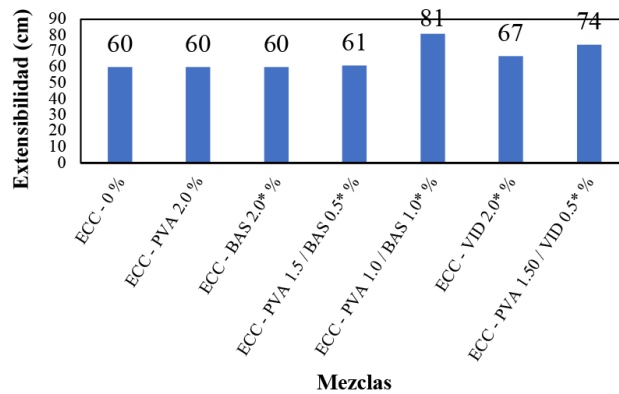


Figura 6. Comparación de los valores de extensibilidad (ASTM C1611) de las 7 mezclas con fibras.

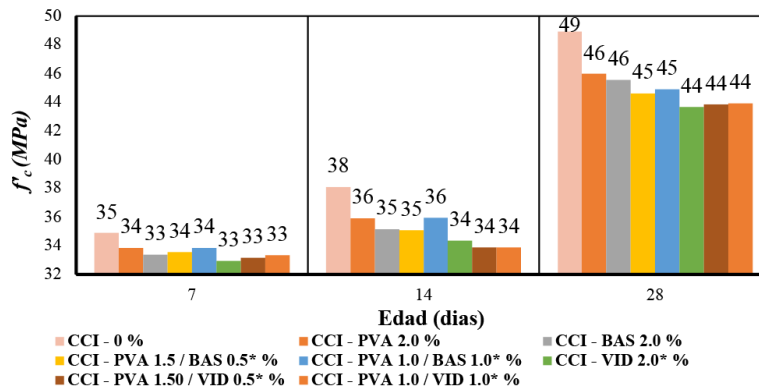


Figura 7. Resistencia a compresión de las mezclas de ECC.

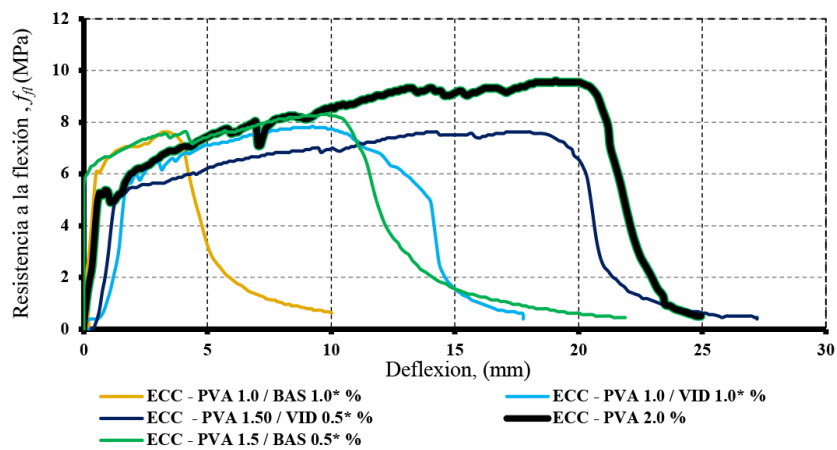


Figura 8. Comparación de la resistencia a la flexión en el ensayo de 4 puntos en las mezclas de ECC.

5. Conclusiones

Se encontró que la incorporación de las fibras en base a un área superficial de referencia, permite que las propiedades en estado fresco de las diferentes mezclas sean similares, así como la resistencia a la compresión en comparación con el ECC reforzado con un 2 % de fibras de PVA. de esta manera fue posible comparar entre sí las propiedades que las fibras de basalto y vidrio le confieren al ECC en términos de ductilidad.

El comportamiento a flexión de las mezclas híbridas de fibras podría clasificarse dúctil debido a que presentan un endurecimiento por deflexión. debido a que se desarrolla una multifisuración. La formación de éstas fisuras se debe a que las fibras se adhieren a la matriz cementante formando un puente de enlace. las propiedades mecánicas y geométricas que las fibras de basalto, vidrio y PVA juegan un rol importante en este puente y en la respuesta mecánica tan diferenciada que se tiene en todas las mezclas de la presente investigación. Es posible observar que la combinación de propiedades entre las fibras de PVA y vidrio tiene una sinergia mecánica muy superior a la que con los refuerzos híbridos con fibras de basalto se logra.

La resistencia a la flexión varía en gran medida debido a que las propiedades mecánicas y geométricas de las fibras juegan un rol importante en ductilidad de los ECC. pero esto no ocurre con la resistencia a la compresión, debido a que, las fibras trabajan a tensión en los concretos y las modificaciones en la resistencia a la compresión son debidos al procedimiento de adición y mezclado.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud al apoyo económico proveniente de los proyectos IT- 301307 y P/PROFEX-CE-2020-19MSU00 para nuestra participación en este congreso, al personal del laboratorio de tecnología del concreto de la Facultad de Ingeniería Civil-UANL y de la facultad de ingeniería civil de la Universidad de Sherbrooke, por su apoyo para la ejecución de los trabajos experimentales, así como por el suministro de materiales y equipos. M. Cabrera-Leal agradece a CONACYT por la beca que le otorgo durante el periodo 2018-2020 para la realización de sus estudios de maestría.

7. Referencias

- Esmaeeli, E. (2012). Effects Of Curing Conditions On Crack Bridging Response Of Pva Reinforced Cementitious Matrix (8th Rilem International (Ed.)). 8th Rilem International Symposium On Fibre Reinforced Concrete: Challenges And Opportunities, Guimarães, Portugal.
- Holubova, B. (2017). Corrosion Of Glass Fibres In Ultra High Performance Concrete And Normal Strength Concrete. *Ceramics - Silikaty*, 319–326. <https://doi.org/10.13168/Cs.2017.0031>
- Kanda, T., Lin, Z., & Li, V. C. (1998). Application Of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites To Shear Resistant Structural Elements” *Fracture Mechanics Of Concrete Structures Proceedings. Civil And Environmental Engineering*, 1477–1490.
- Keitetsu, R. (2008). Recommendations For Design And Construction Of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites With Multiple Fine Cracks(Hpfrcc) (2008 Sub-Committee, Recommendations For Design And Construction Of Hpfrcc, Concrete Committee, Japan Society Of Civil Engineers (Ed.); P. 1). Japan Society Of Civil Engineers. <https://doi.org/4810606406>
- Kong, H. J., Bike, S., & Li, V. C. (2003). Development Of A Self-Compacting Engineered Cementitious Composite Employing Electrosteric Dispersion/Stabilization. *Cement Concrete Composites*, 25(3), 301–309.

- Li, V. C., & Kanda, T. (1998). Innovations Forum : Engineered Cementitious Composites For Structural Applications. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 10(2), 66–69. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(66))
- Li, V. C., Wang, S., & Wu, C. (2001). Tensile Strain-Hardening Behavior Of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (Pva-Ecc). *Aci Materials Journal*, 98(6), 483–492.
- Lu, C., Yu, J., & Leung, C. K. Y. (2018). Tensile Performance And Impact Resistance Of Strain Hardening Cementitious Composites (Shcc) With Recycled Fibers. *Construction And Building Materials*, 171, 566–576. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.108>
- Manish, A., & Kewalramani Osama, A. (2017). Engineered Cementitious Composites For Modern Civil Engineering Structures In Hot Arid Coastal Climatic Conditions. *Procedia Engineering*, 180, 767 – 774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.237>
- Romualdi, J. P., & Batson, G. B. (1963). Mechanics Of Crack Arrest In Concrete. *Journal Of Engineering Mechanics*, 89, 147–168.
- Rybin, V. A., Utkin, A. V., & Baklanova, N. I. (2016). Corrosion Of Uncoated And Oxide-Coated Basalt Fibre In Different Alkaline Media. *Corrosion Science*, 102, 503–509. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.11.004>
- Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013). Material Properties Of A New Hybrid Fibre-Reinforced Engineered Cementitious Composite. *Construction And Building Materials*, 43, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.021>
- Vieira, C. A. B., Susin, S. B., Estevão, F., Amico, S. C., & Zattera, A. J. (2009). Characterization Of Hybrid Composites Produced With Mats Made Using Different Methods. *Materials Research*, 12(4), 433–436. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000400011>
- Wang, S., & Li, V. C. (2003). Materials Design Of Lightweight Pva-Ecc. In A. E. Naaman & Reinhardt (Eds.), *The Fourth Composites, International Rilem Workshop On High-Performance Fiber-Reinforced Cement (Hprfcc 4)* (Pp. 379–390.).

• **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020 San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Desempeño de un geopolímero a base de ceniza volante clase F con aditivos superplastificantes

S. Castro-Germánico, I. Flores-Vivián

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: ismael.floresvn@uanl.edu.mx

Resumen

Se fabricó un geopolímero a base de ceniza volante clase F activada alcalinamente con una combinación de hidróxido de sodio y silicato de sodio, y se incorporó porcentajes de super plastificante. El superplastificante se adicionó para obtener un material con propiedad autocompactable evitando modificar de manera considerable su resistencia a la compresión. Se realizó mezclas modificando la relación líquido/sólido (l/s), concentración molar del hidróxido de sodio, las proporciones de activadores alcalinos y porcentajes de aditivo super plastificante. Se determinó que con una l/s de 0.4, una concentración de 12M, 30% de hidróxido con 70% de silicato se obtiene un geopolímero de 26MPa de resistencia a la compresión a los 28 días luego de un curado a 60°C por 24h.

Palabras clave: Geopolímero; Ceniza volante; Resistencia a la compresión; Superplastificante.

Abstract

An alkaline activated class F fly ash-based geopolymer was manufactured with a combination of sodium hydroxide and sodium silicate, and percentages of super plasticizer were incorporated. The superplasticizer was added to obtain a material with self-compacting property, avoiding considerably modifying its resistance to compression. Mixtures were made by modifying the liquid/solid ratio (l/s), molar concentration of sodium hydroxide, the proportions of alkaline activators and percentages of super plasticizer additive. It was determined that with a l/s of 0.4, a concentration of 12M, 30% of hydroxide with 70% of silicate, a geopolymer of 26MPa of compressive strength is obtained at 28 days after curing at 60°C for 24h.

Keywords: Geopolymer; Fly ash; Compressive strength; Superplasticizer.

Resumo

Um geopolímero baseado em cinzas volantes de classe F alcalina ativada foi fabricado com uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio, e porcentagens de superplastificante foram incorporadas. O superplastificante foi adicionado para obter um material com propriedade autoadensável, evitando alterar consideravelmente sua resistência à compressão. As misturas foram feitas modificando a razão líquido/sólido (l/s), a concentração molar de hidróxido de sódio, as proporções de ativadores alcalinos e as porcentagens de aditivo superplastificante. Foi determinado que com um l/s de 0,4, uma concentração de 12M, 30% de hidróxido com 70% de silicato, um geopolímero de 26MPa de resistência à compressão é obtido aos 28 dias após cura a 60 ° C por 24h.

Palavras-chave: Geopolymer; Cinzas volantes; Força compressiva; Superplastificante.

1. Introducción

Este trabajo de investigación está centrado en la utilización de la ceniza volante clase F (CV) como precursor activado alcalinamente para el desarrollo de un geopolímero, que se lo puede considerar como material cementante alternativo. La CV es un subproducto industrial proveniente de la planta carboeléctrica de Nava-Coahuila. Con los aluminosilicatos presentes en la CV y, a través del proceso de reacción generado por una solución alcalina en el precursor, es posible obtener productos denominados geles N-A-S-H (aluminosilicatos de sodio hidratados). En esta reacción, ocurre una disolución de los enlaces existentes -de lo amorfo- y reacomodo de las moléculas – a una estructura- a condiciones ambientales, generándose cadenas largas de monómeros tipo polisilatos Si-O o Al-O. Por tal razón a este proceso se le denomina geopolimerización, y al cementante obtenido se le conoce como geopolímero por la no presencia de carbono en su cadena polimérica principal.

Para el desarrollo del geopolímero, es necesario tener en cuenta las relaciones líquido/sólido de la mezcla, concentración molar del activador alcalino, proporciones de activadores alcalinos -en caso de combinaciones-, entre otros; considerados parámetros esenciales para dicho fin. Cabe considerar que comúnmente la trabajabilidad del geopolímero demanda esfuerzo de manera significativa por la viscosidad que pudiera adquirir este con la utilización del silicato de sodio como activador. Por lo anterior, se utilizarán aditivos super plastificantes y se determinará el porcentaje adecuado en masa de CV que será adicionado a la mezcla, esto con el objetivo de proporcionar una trabajabilidad adecuada del geopolímero sin que afecte en mayor medida el desempeño su mecánico.

2. Procedimiento

La materia prima (CV) se cribó mediante la metodología estipulada en la norma (ASTM C 136, 2006) utilizando las mallas con aberturas de 0.15in y 0.075in (número 100 y 200 respectivamente), para separar la ceniza fondo e inquemados que se encuentran mezclados con la CV. Para esta investigación se consideró el material que pasa el tamiz 200, con la ayuda de un agitador mecánico -tamizador- Rotap 2600. El material tamizado se muestreó según (ASTM C 183, 2008) para obtener muestras representativas del material y proceder a la caracterización microestructural y física sobre la misma.

La distribución de tamaño de partícula -DTP-, se realizó con un equipo Microtrack modelo S3500. La densidad -DS- de la CV se efectuó con ayuda del Multipicnometer true density analyzer. El análisis composicional se lo ejecutó con una difracción de rayos X -DRX- marca PANalytical, modelo EMYREAM, tomando datos en cada ángulo 2θ entre 5° y 80°. El análisis elemental se realizó con una fluorescencia de rayos X -FRX- marca PANalytical, modelo Epsilon3, se añadió cera inerte en una relación de 1:10; es decir, 1g de cera para 10g de CV, para mantener unido el material. Las micrografías se obtuvieron con un

microscopio electrónico de barrido -**MEB**- Jeol modelo JSM-6510LV, como complemento a la información previa del DRX y el FRX. Adicional se obtuvo la imagen con un mapeo elemental mediante la espectroscopía de energía dispersiva -**EDS**-. El análisis termogravimétrico -**TGA/DTA**- se realizó con el analizador térmico simultáneo PerkinElmer STA 6000 tomando datos cada 10 °C/min con variaciones de temperatura entre los 30-1000 °C. El análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier -**FTIR**- se realizó con un equipo marca SHIMADZU modelo IRTracer-100 con 32 escaneos de aproximación 4cm⁻¹ entre las longitudes de 400-4000cm⁻¹ que se utilizarían en el desarrollo del geopolímero, para determinar los grupos funcionales presentes y que pudieren causar algún cambio en la estructura interna del geopolímero. Los plastificantes se caracterizaron con FTIR y el porcentaje de sólidos presentes.

Se consideraron como variables la relación L/S, concentración molar del hidróxido de sodio, porcentajes de activadores alcalinos -combinación de hidróxido de sodio y silicato de sodio-, tiempo de mezcla, temperatura y tiempo de curado; mismas que se fijaron en función de la mejor respuesta mecánica -resistencia a la compresión del geopolímero-. Cada una de las mezclas y consecuentes probetas fabricadas fueron sometidas a ensayos de compresión para evidenciar mejores prestaciones, afectaciones o cambios sufridos en el geopolímero. Luego de los ensayos de compresión se tomaron muestras de los especímenes para realizar los respectivos análisis microestructurales después de detener el proceso de hidratación con alcohol isopropílico durante 3 días mínimo y posterior secado a una temperatura de 40 °C por 24h.

Se fabricaron probetas utilizando como única variable la relación líquido/sólido (L/S) de 0.4 y 0.5; lo que sugiere una mezcla muy seca (nada trabajable y probablemente con resistencia alta) a una mezcla fluida (trabajable y probablemente con resistencia baja). Para la concentración molar del NaOH se fabricaron probetas con las concentraciones molares de 7M, 10M y 12M, las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia mecánica a diferentes edades. De los resultados obtenidos por el cambio de molaridad, se optó por utilizar una concentración molar de NaOH la que presente una mejor disolución de enlaces para promover mayor cantidad de estos en el proceso de geopolimerización. De los resultados obtenidos, se fijaron la relación L/S y concentración molar del NaOH; donde posteriormente se determinaron los porcentajes de los activadores alcalinos utilizados NaOH y Na₂SiO₃, para optimizar el desempeño del material. Para lo anterior, se fabricaron probetas con diferentes proporciones de hidróxido/silicato (H/S).

Se aumentó del tiempo de mezclado tomando en consideración lo propuesto por autores como (Davidovits, 2015) (Hardjito, 2005)(Á. Palomo y Fernández-Jiménez, 2007)(Puertas y Torres-Carrasco, 2017) (Criado *et al.*, 2007) referente a los factores que afectan en la fabricación del geopolímero. Por lo anterior, se determinó un aumento del tiempo de mezclado de hasta 10 min para permitir una mejor disolución de los enlaces presentes en la CV. Se determinó la fluidez del geopolímero en desarrollo con base la metodología estipulada en la norma (ASTM C 1437, 2007) -considerando el anillo cónico establecido en la norma (ASTM C 191, 2008). Lo anterior fue realizado por Nematollahi (Nematollahi y Sanjayan, 2014) para obtener un asentamiento relativo mediante la siguiente relación de igualdad de la ecuación (1) donde: rp: es el asentamiento relativo, d: diámetro del final de la mezcla, d₀: diámetro inicial o inferior del anillo.

$$rp = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

3. Resultados

Del análisis de DTP se determinó que la CV tamizada posee un tamaño promedio de 29.71 μm como se muestra en la figura 1. El tamaño del material, considerando la premisa que autores como (Huaquisto Cáceres y Belizario Quispe, 2018), es adecuado para la producción del geopolímero ya que establecen que el tamaño promedio de partícula con el cual se tiene una reactividad considerable oscila hasta los 40 μm . Consecuentemente se realizó la determinación de la densidad de la CV valor que se muestra en la figura 1, para distinguir una diferencia o cambio en el material, producto de la separación de la ceniza de fondo y de los inquemados.

Del análisis con el DRX como se muestra en la figura 2 se desprende que la CV posee compuestos de óxido de silicio por su intensidad en el ángulo 26° del 2 θ y gran presencia de este con menores intensidades en los ángulos 21°, 36°, 38°, 40°, 41°, 46°, 54°, 61°, 68°, consecuentemente en otros planos que poseen un arreglo estructural, así lo identifican autores como (Rendón Belmonte *et al.*, 2015). También se encontraron compuestos de aluminosilicatos con intensidades bajas en los ángulos 2 θ de 16°, 26°, 32°, 34°, 36°, 39°, 42°, 50°, 60°, 65°. Además, se observa un halo entre los 14° y 34° correspondiente a ciertas fases que no poseen un arreglo estructural u fase vítrea. Igual se identificaron materiales como el óxido de calcio en los ángulos cercanos a los 38° y 58° con intensidades menores. Mediante el FRX se determinaron los elementos presentes, donde los datos obtenidos se muestran en la tabla 1.

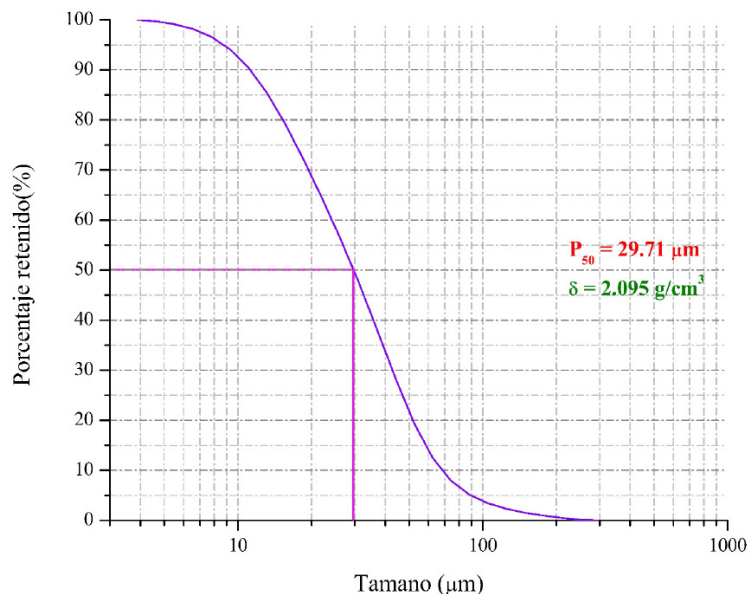


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula DTP de la CV; δ : Densidad de CV.

Tabla 1. Fluorescencia de rayos x FRX de la CV.

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Total
Procentaje (%)	72.5	10.6	0.5	1.4	2.9	1.5	9.1	0.6	99.1

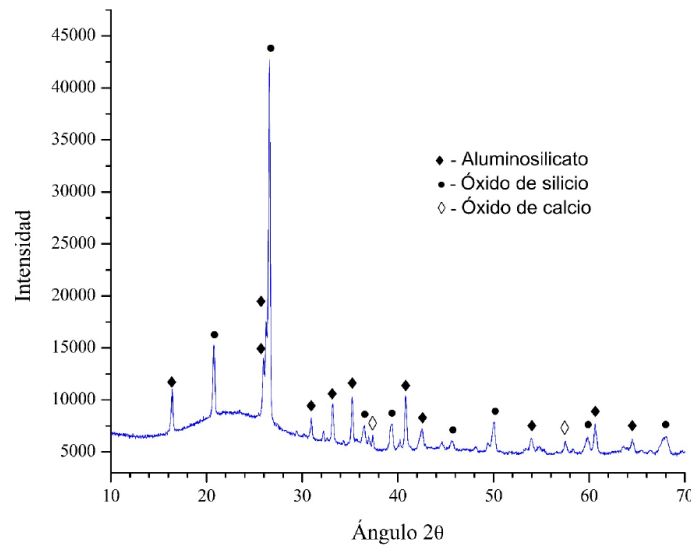


Figura 2. Difractograma de la CV después de separada de la ceniza de fondo e inquemados

Los elementos encontrados en la CV -especialmente los tres óxidos característicos en los cementantes- (tabla 1) dióxido de silicio, trióxido de aluminio y trióxido férrico, con lo cual, se realizó una verificación de esta mediante la norma (ASTM C 618, 2012). La norma especifica los tipos de CV existentes, basados en requerimientos químicos -este caso- y físicos; con lo cual se comprobó que la CV utilizada corresponde a una designación tipo F, en virtud que la suma de los óxidos da un total de 92.2 % -mayor al mínimo especificado 70 %- y el trióxido de azufre 0.5 %. De manera adicional la norma estipula -en su nota 3- que para ser considerada como clase F, el porcentaje de óxido de calcio debe ser inferior al 10 %, requerimiento que cumple esta CV con un 2.9%.

Para corroborar la información obtenida por medio del DRX y FRX, estas se complementaron mediante imágenes del MEB como se muestra en la figura 3, y a la par un mapeo con EDS como se muestra en la figura 4. De las micrografías se evidenció los elementos presentes en el material como el Si, C, Ca, Al, Fe, entre otros. La imagen del MEB de la morfología de la CV (Figura 3) y el EDS mapeo elemental (figura 4), se realizaron con una aproximación de 1000x, muestran la forma esférica o senoidal de las partículas de CV. Además, se detectaron ciertos materiales adyacentes de forma irregular a los cuales el EDS los detecta como C; lo que sugiere que pese al proceso de tamizado existen partículas pequeñas de inquemados.

Del análisis termogravimétrico TGA se obtuvo la curva de descomposición térmica o termograma como se muestra en la figura 6. Se identifica una pérdida de masa de material de 1.8 g que corresponde a 8.65 % de la masa inicial con el incremento de la temperatura, lo que sugiere que existe una descomposición del material en dos etapas. La primera descomposición está entre los 100 °C y 550 °C y la segunda descomposición ocurre a partir de los 550 °C hasta los 950 °C que se realizó la medición. La primera etapa se atribuye a la pérdida de humedad en el material. La segunda etapa, sugiere que los productos que se han descompuesto o en otras palabras probablemente incinerados corresponden a los inquemados o partículas de carbón aún existentes en el material y que fueron detectadas en proporciones pequeñas por otras técnicas de análisis. Conjuntamente se estableció un análisis diferencial de temperatura DTA (figura 6) en el cual se evidencia un pico característico a fusiones según lo comenta (Skoog *et al.*, 2008), el cual se presenta a los 325 °C.

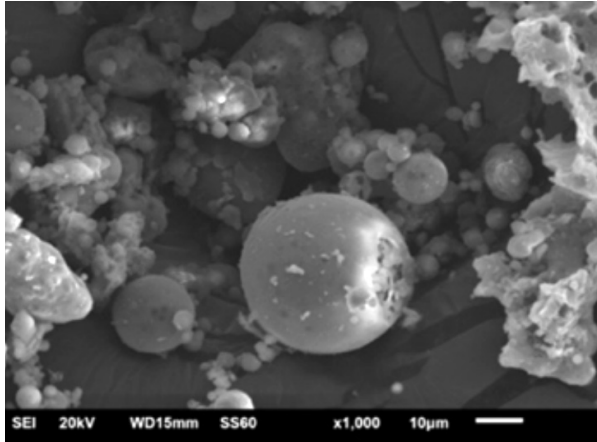


Figura 3. Micrografía electrónica de barrido MEB de la morfología de la CV.

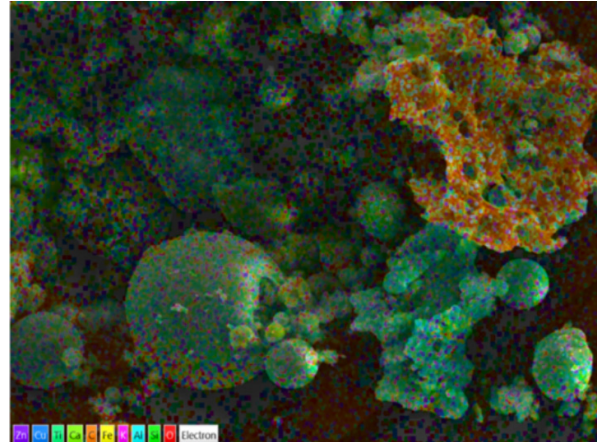


Figura 4. Espectroscopía de energía dispersiva EDS de la morfología de la CV.

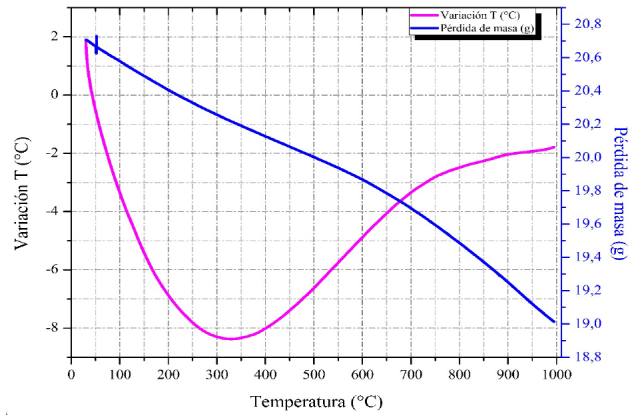


Figura 5. Termograma TGA/DTA de la CV.

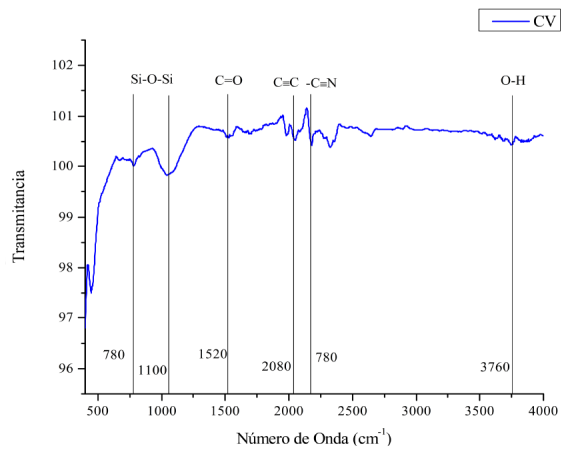


Figura 6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier FTIR de la CV.

En el análisis de FTIR a la CV se identificó la presencia de cuarzo en una serie de bandas: una alrededor de los 1100 cm^{-1} , una banda doble entre $796\text{-}777\text{ cm}^{-1}$ y una banda en 677 cm^{-1} . Estas bandas fueron reportadas por (Criado *et al.*, 2007) e (Ismail *et al.*, 2014) como aquella que proporciona información sobre el grado de cristalinidad de una muestra. Grupo OH en la banda de los 3750 cm^{-1} que denota algo de humedad, que hace aparecer la señal del agua al rededor 3710 cm^{-1} . Tensión del grupo de Nitrilo Conjugado: $2240\text{-}2210\text{ cm}^{-1}$ con triple enlace. Tensión del grupo de los alquinos $\sim 2100\text{ cm}^{-1}$ con enlace triple de C. Señal intensa, característica del grupo carbonilo generándose un estiramiento del carbonilo. Como se muestra en la figura 6.

De la misma manera se identificaron en los plastificantes un pico de vibración de estiramiento del éter de alquilo C-O-C, el cual aparece entre los números de onda $1140\text{-}1110\text{ cm}^{-1}$ para L y para N y P -un poco desplazado- los grupos C-C(O)-C entre $1300\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ como parte de las cadenas laterales que comprenden el enlace éter dialquil; al igual que el grupo C-O en la banda de los 1200 cm^{-1} de los éteres. La banda a $3450\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al grupo OH de los carboxílicos y en la banda de los 2900 cm^{-1} , el grupo perteneciente a los CH de los alcanos, en los $1730\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ el grupo C=O, como se muestra en la figura 7.

Davidovits y Quentin (1991), Hardjito (2005), Puertas y Torres-Carrasco (2017) reportaron en sus investigaciones las diferentes porciones de los materiales para el desarrollo de los geopolímeros. Para este trabajo se fabricaron probetas utilizando como única variable la relación líquido/sólido (L/S), aproximadamente entre 0.4 y 0.5; lo que sugiere una mezcla muy seca -nada trabajable y probablemente con resistencia alta-, a una mezcla fluida -trabajable y probablemente con resistencia baja- respectivamente. Estas fueron sometidas a pruebas de resistencia a la compresión como se muestra en la figura 8, donde se evidenció que la relación L/S que proporcionaba al sistema mejor respuesta a la sollicitación es de 0.4, por cuanto se fijó esa variable con ese valor.

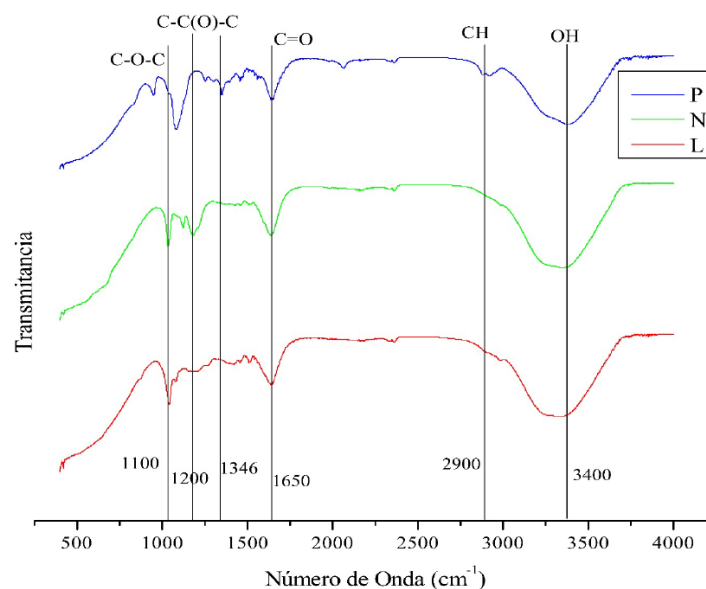


Figura 7. Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier FTIR de los plastificantes.

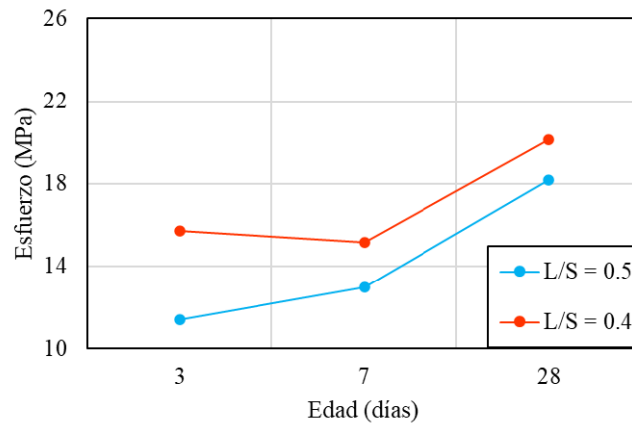


Figura 8. Resistencia a la compresión del geopolímero en función de la relación L/S.

Fernández-Jimenez *et al.* (2005) haciendo una diferenciación entre activadores alcalinos y sus concentraciones, concluyendo que el desempeño del geopolímero tiene estrecha relación con el tipo de activador alcalino y su concentración molar, además que el NaOH presta una mejor disolución de enlaces. La concentración molar del NaOH -activador alcalino- se consideró como segunda variable a determinar, para lo cual se fabricaron probetas con tres concentraciones molares 7M, 10M y 12M. La figura 9 muestra los ensayos de compresión de estas probetas con diferente concentración molar del hidróxido; estableciéndose que, la concentración molar del NaOH que le transfiere mejor capacidad de respuesta al geopolímero es de 12M.

Para la inclusión de los activadores alcalinos NaOH y Na_2SiO_3 , se establecieron dos porcentajes 40/60 y 30/70 respectivamente como se muestra en la tabla 2 y sus módulos, con la finalidad de establecer cuál de estos permite que el geopolímero presente mejor desempeño comparado entre ellos. Autores como Palomo *et al.* (2019) comentan el uso de estos de manera individual o en combinación y consideran un módulo entre los activadores (Hardjito y Rangan, 2005) (Leong *et al.*, 2016). Las probetas se sometieron a ensayos de compresión como se muestra en la figura 10, dando como evidencia que los porcentajes de activadores que le confiere al sistema un mejor desempeño es de 30 % NaOH y 70 % Na_2SiO_3 .

Se determinó el porcentaje de sólidos presentes en los plastificantes como se muestra en la tabla 3 para establecer la cantidad de aditivo a incorporar -en masa de CV- sin que se afecte la relación L/S previamente establecida.

Se realizaron mezclas con la inclusión de los aditivos plastificantes como lo comentan (Carabba *et al.*, 2016) para establecer afectaciones en la resistencia a la compresión, el punto de saturación de estos y a la vez el asentamiento relativo en función de lo descrito por (Nematollahi y Sanjayan, 2014). Se adicionaron porcentajes de 1-7% de aditivo en masa de CV como se muestra en la figura 11 estableciéndose el punto de saturación de estos P4%, N7% y L6%.

Pese a que los plastificantes son soluciones químicas fabricadas para ser usadas en mezclas cementantes base CPO, estos confieren al geopolímero un asentamiento relativo de 8.0 para P, 7.0 para L y 7.0 para N, que en términos de fluidez se traduce a 130 %, 120 %, 120 % respectivamente en un tiempo no mayor a 30 min, cabe aclarar para su punto de saturación. Lo que sugiere que este geopolímero no llegará a tener una propiedad autocompactable en términos de fluidez ya que se necesitaría una fluidez alrededor del 150 %, pero la fluidez lograda se considera un avance por los autores.

Tabla 2. Porcentaje de activadores incluidos en la mezcla para la reacción cementante de la CV y relación de activadores.

Activadores		Módulo H/S	Módulo S/H
NaOH	Na ₂ SiO ₃		
40 %	60 %	0.67	1.50
30 %	70 %	0.45	2.33

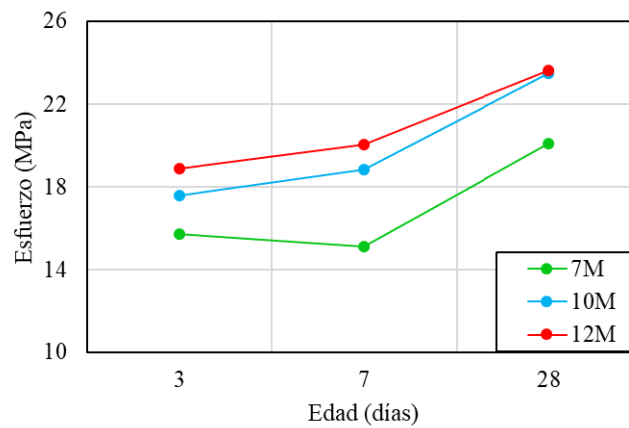


Figura 9. Resistencia a la compresión del geopolímero en función de la concentración molar del NaOH.

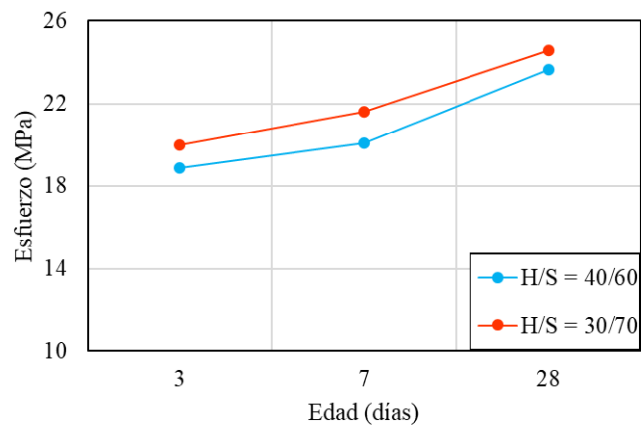


Figura 10. Resistencia a la compresión del geopolímero en función de los porcentajes de activadores NaOH y Na₂SiO₃ incluidos en la mezcla.

Con los parámetros establecidos se fabricaron las probetas con los respectivos porcentajes de aditivo superplastificante y ensayados a la compresión para determinar la posible afectación que puedan originar estos al geopolímero. Se fabricaron probetas con 2 % de P, 3 % de N y 1 % de L en masa de CV como se muestra en la figura 12 para determinar la resistencia a la compresión del geopolímero en función del tipo de superplastificante adicionado. En los resultados se evidencia una disminución del desempeño mecánico.

Tabla 3. Porcentaje de sólidos presente en los plastificantes.

Plastificante	Tipo	Sólidos (%)
L	Lignosulfonato	39.00
N	Naftaleno	34.26
P	POlicarboxilato	46.62

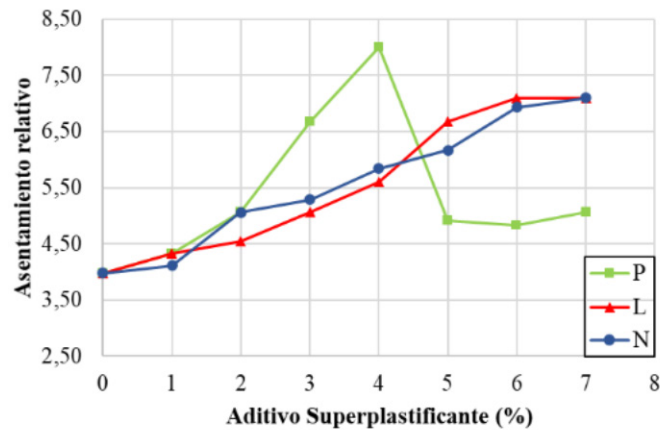


Figura 11. Asentamiento relativo del geopolímero en función del porcentaje aditivo incluido a la mezcla

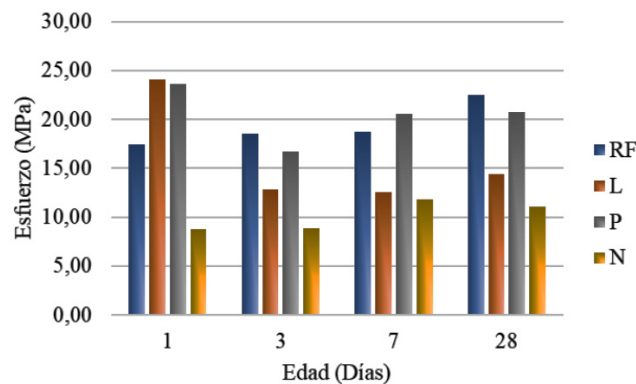


Figura 12. Resistencia a la compresión del geopolímero de referencia con los adicionados con aditivos superplastificantes

Se desarrolló un geopolímero con una resistencia a la compresión de 23MPa (RF) a los 28 días. Sin embargo, al incorporar aditivos superplastificantes, la resistencia a la compresión se ve afectada en función del tipo de plastificante: con una reducción de 39.1 %, 8.7 % y 52.2 %, para los aditivos L, P y N, respectivamente, en comparación al RF a los 28 días. Otras probetas fabricadas están a la espera de ensayos y análisis microestructurales antes mencionados que evidenciarán el comportamiento del geopolímero desarrollado desde su microestructura y podrán dar pie a una mejor compresión de este. Sin embargo, se observó una aceleración en la reacción del material para los aditivos L y P; ya que, en los ensayos a compresión a 1 día de fabricación, estos presentan un incremento por arriba del 30% en la resistencia a la compresión.

4. Conclusiones

La composición química de una CV la hace única debido a los porcentajes de óxidos presentes y que a través de una solución alcalina se logra su reacción cementante, es decir como su huella digital. Por ello la complejidad de la fabricación de un geopolímero. Los puntos de saturación de los plastificantes difieren uno del otro debido al porcentaje de sólidos presentes en cada uno de ellos, de esta manera se tiene 4%P, 6%L y 7%N; puntos en los cuales, el material sufría exudación y disminución en la resistencia a la compresión. El incremento en la fluidez se considera un avance por los autores, un que no llegará a tener una propiedad autocompactable en términos de fluidez ya que se necesitaría una fluidez alrededor del 150 %.

El geopolímero con el aditivo a base de policarboxilatos (P) tiene una menor afectación en su resistencia en comparación a los naftalenos (N) y lignosulfonatos (L); esto sugiere que a estos materiales cementantes se les puede adicionar plastificantes base P sin que haya una afectación considerable en la resistencia a la compresión a edades de 1 hasta los 28 días. Además, se observó una aceleración en la reacción del material para los aditivos L y P; ya que, en los ensayos a compresión a 1 día de fabricación, estos presentan un incremento por arriba del 30 % en la resistencia a la compresión.

5. Trabajos Futuros

Se esperan resultados de diferentes análisis microestructurales para determinar o establecer si existiese la formación de algún compuesto que hace que esta afectación se presente en el geopolímero en la parte macro; comparándolos con los preliminares aquí presentados. De ser así se pueden establecer mecanismos de corrección de fabricación del geopolímero.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y servicios brindados por el Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, de la Facultad de ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Al programa de CONACYT, por el apoyo económico brindado a lo largo de este periodo y al proyecto de CONACYT con CLAVE: CB 2017-2018 / A1-S-24552. A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo mediante el proyecto PAICYT 2020 con CLAVE: IT1348-20. Así como al número P/PROFEXCE-2020-19MSU00, por cubrir los cargos de las inscripciones.

7. Referencias

- ASTM C 1012, M. (2010). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a i, 1–6. <https://doi.org/10.1520/C1012>
- ASTM C 136, 06. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates 1. 3–7. <https://doi.org/10.1520/C0136-06.2>
- ASTM C 1437, 07. (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar 1. 1–2. <https://doi.org/10.1520/C1437-07.2>
- ASTM C 183, 08. (2008). Standard Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement 1. 1–7. <https://doi.org/10.1520/C0183-08.2>
- ASTM C 191, 08. (2008). Standard Test Methods for. i. <https://doi.org/10.1520/C0191-08.2>
- ASTM C 618, 12a. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0618>
- Carabba, L., Manzi, S., & Bignozzi, M. C. (2016). Superplasticizer Addition to Carbon Fly Ash Geopolymers Activated at Room Temperature. <https://doi.org/10.3390/ma9070586>
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, Á. (2007). Alkali activation of fly ash : Effect of the SiO₂ / Na₂O ratio Part I : FTIR study. 106, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.02.055>
- Davidovits, J. (2015). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. Geopolymer International Conference (Issue Iv).
- Davidovits, J., & Quentin, S. (1991). GEOPOLYMERS Inorganic polymerie new materials. 37, 1633–1656.
- Fernández-Jimenez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement : a descriptive model. 35, 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>
- Hardjito, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Curtin University of Technology, November, 94. <https://doi.org/10.1177/1049909113506980>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. In Research report GC. http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf
- Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Use of the flying ash in the dosing of the concrete as a substitute for the cement. 20(2), 225–234.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & vn Deventer, J. S. J. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES, 45, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006>
- Leong, H. Y., Leong Ong, D. E., Sanjayan, J. G., & Nazarib, A. (2016). The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer.
- Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. Materials and Design, 57, 667–672. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>
- Palomo, Á., & Fernández-Jiménez, A. (2007). Factores que afectan al desarrollo inicial de resistencias a compresión en hormigones de ceniza volante activados alcalinamente (sin OPC) Factors affecting early compressive strength of alkali activated fly ash (OPC-free) concrete. Materiales de Construcción, 57, 7–22.
- Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2019). Una revisión sobre la activación alcalina : nuevas perspectivas analíticas. 64(315), 1–26.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



Puertas, F., & Torres-Carrasco, M. (2017). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement : alkali activated cements or geopolymers La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland : cementos activados alcaliname. 32, 5–12.

Rendón Belmonte, M., Fernández-Jiménez, A., Palomo Sánchez, Á., Martínez Madrid, M., Torres Acosta, A., & Pérez Quiroz, J. (2015). Desarrollo de nuevos cementos : “ C ementos alcalinos y cementos híbridos .”

Skoog, D. A., James Holler, F., & Crouch, S. R. (2008). Principios de Análisis instrumental.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Mitigación de uso de aires acondicionados en edificaciones mediante la implementación de VO_2 /MWNTCS como PCM incorporado en matrices de yeso

C. Y. Fragoso F.¹, M. Z. Figueroa -Torres.¹, J. R. Gonzalez-López.¹,
A.A. Zaldívar-Cadena.¹, A. Toxqui -Terán.²

¹ Cuerpo Académico de Materiales Alternativos en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Autónoma de Nuevo León

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Unidad Monterrey

Autor de Contacto: celene_iq@yahoo.com.mx; m.zylila@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se preparó óxido de vanadio nanométrico (VO_2) en la fase monoclinica (M) y un nanocompuesto de VO_2 disperso sobre la superficie de nanotubos de carbono multiparedes (VO_2 /MWCNT) ambos, como materiales de cambio de fase (PCM) y se estudió el efecto de incorporar dichos nanomateriales en las propiedades térmicas y de resistencia a la compresión de un yeso comercial. Los materiales fueron caracterizados mediante difracción de rayos-X (DRX) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Así mismo, las propiedades térmicas fueron obtenidas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). Además, se llevaron a cabo las pruebas de resistencia a la compresión. Se encontró que el VO_2 nanométrico presentó una capacidad calorífica de (C_p) de $3183.98 \text{ KJ/Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ y un almacenamiento de calor de $9835.57 \text{ KJ/Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}$. De la misma forma, los análisis térmicos mostraron una temperatura de cambio de fase de $\sim 56 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión mostraron un incremento al incorporar los nanomateriales, los mejores resultados de conductividad se obtuvieron en la muestra C1 que presento una conductividad térmica de $0.45 \text{ Wm/}^\circ\text{K}$. Por lo que, las características térmicas que presentan estos materiales podrían contribuir a mantener el confort térmico al interior de las edificaciones y moderar el uso de los sistemas de aire acondicionado y calefacción.

Palabras clave; Materiales de cambio de fase; nanocompuestos; Confort térmico.

1. Introducción

Actualmente, el desarrollo del sector constructivo ha aumentado exponencialmente lo que trae como consecuencia la generación de gases que contribuyen al efecto invernadero y finalmente un incremento en la temperatura global. Debido a esto, es necesario innovar y construir edificaciones que satisfagan las necesidades de confort térmico de las personas sin necesidad del uso del aire acondicionado que puedan contribuir a la generación de calor y al incremento en el uso de energía eléctrica. Sin embargo, hoy en día el uso de aires acondicionados y calefacciones se ha incrementado, estadísticas reportadas por el Global Status Report for Buildings and Construction reportaron (2019), un 36 % de consumo energético global y 39 % de emisiones relacionadas con la energía (IEA, 2019). En la actualidad, el almacenamiento de energía térmica mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCMs) en matrices cementantes, se presenta como una alternativa atractiva en el sector de la construcción ya que estos materiales absorben el calor cuando la temperatura exterior es alta evitando su difusión hacia el interior de la edificación y, cuando la temperatura exterior disminuye o se encuentra por debajo de la temperatura de cambio de fase del material, se libera automáticamente el calor almacenado. Con ello, es posible mantener un confort térmico al interior (Jayalath *et al.*, 2011). Los PCMs suelen colocarse en las envolventes de las edificaciones como las paredes o el techo. Existen varios tipos de materiales de cambio de fase, la mayoría de ellos como las parafinas o las sales hidratadas presentan un cambio de fase del estado sólido al líquido con capacidades de almacenamiento térmico altos. Sin embargo, si estos materiales no se encapsulan antes de introducirlos en las matrices cementantes, se pueden presentar fugas y escurrimientos del PCM en los materiales de construcción, lo cual suele limitar su aplicación (Afshin Marani, 2019).

Existen diversos reportes donde se ha realizado la incorporación del PCMs en el concreto donde se observa con claridad una reducción en sus propiedades mecánicas (Liston *et al.*, 2014); Sahu, Mondloe, and Garhewal, 2017; Ramakrishnan *et al.*, 2017). Estas investigaciones se reportan una reducción en resistencia a la compresión hasta en un 30 % con respecto a su muestra control a 28 días, así mismo, establecen que a mayor cantidad de PCM dentro del material de construcción la resistencia disminuye hasta un 50 %. Mientras que, en los estudios reportados sobre la incorporación de los PCMs en yeso se observó un incremento en la conductividad térmica de 0.15 a 0.31 ($WM^{-1}K^{-1}$) al incorporar un 30 % del PCM en relación al yeso (H. Zhang *et al.*, 2012) y un aumento en el Cp que pasa de 0 (J/g) hasta 13.57 (J/g) (B. Zhang *et al.*, 2018). Otros autores reportan una disminución en la temperatura de cambio de fase de 5 °C (Oliver, 2012); por lo que el uso de yeso para la incorporación de los PCMs es una buena opción ya que, este material no está expuesto a grandes magnitudes de carga sino que suele utilizarse como material de acabado o para la preparación de prefabricados.

Adicionalmente, otra alternativa para evitar el encapsulamiento y el escurrimiento que se presenta en los PCMs con cambio de fase sólido-líquido, es el uso de PCMs con cambio de fase sólido-sólido. Entre ellos, destaca el óxido de vanadio (IV) (VO_2) el cual exhibe diferentes polimorfos presentándose una transformación reversible entre la fase de monoclinica (M) a tetragonal (T) la cual ocurre convencionalmente a 68°C. Sin embargo, se ha reportado que su temperatura de transición disminuye incluso hasta aproximadamente 35°C cuando se dopa con elementos como el W, el Mg o bien, el tamaño de sus partículas se encuentra en la escala nanométrica (Takai *et al.*, 2018)(Muramoto *et al.*, 2018) (Cheng *et al.*, 2020). Es por ello que, algunos autores lo han propuesto como un candidato para ser utilizado como PCM (Takai *et al.*, 2018; Muramoto *et al.*, 2018); Cheng *et al.*, 2020). Pese a esto, el VO_2 presenta una pobre conductividad térmica lo que podría incrementarse mediante el uso de nanotubos de carbono multipared MWCNTs (Wang *et al.*, 2010; Tang

et al., 2014; Cui *et al.*, 2011; Ji *et al.*, 2012) debido a sus fantásticas propiedades dentro de las que destaca su elevada conductividad térmica que se encuentra alrededor de $3000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Kim *et al.*, 2001). En esta investigación, se estudió la adición de VO_2 nanométrico y de nanocompuestos de VO_2 sobre MWNCTs en una matriz de yeso para construcción, con la finalidad de desarrollar un nuevo material con propiedades térmicas modificadas que pueda actuar como un regulador térmico en una edificación. Además, del efecto en la resistencia a la compresión del yeso al incorporar los nanomateriales en diferentes porcentajes.

2. Procedimiento

2.1. Preparación del VO_2 nanométrico por Hidrotermal

Se utilizaron como reactivos óxido de vanadio (V) (V_2O_5), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e idracina (N_2H_4) grado reactivo y se utilizaron sin previa purificación. Inicialmente, se mezcló el V_2O_5 con el H_2O_2 y agua destilada y se llevó al ultrasonido por 10 min. A continuación, esta mezcla se mantuvo en agitación durante 3h. Transcurrido el tiempo, se adiciono la hidracina y se dejó agitar por 15min. El precipitado obtenido se colocó en el reactor de hidrotermal por 24h a 220°C . El sólido fue filtrado y lavado con agua destilada y etanol. Finalmente se secó en vacío.

2.2. Preparación de los nanocompuestos de VO_2 /MWCNTS

El acetilacetato de vanadio ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{V}$, 97% de pureza) se utilizó sin previa purificación, los MWCNTs-OH funcionalizados (>95 wt % de pureza, diámetro de 20-30nm, longitud 10-30 μm) fueron adquiridos en US Research Nanomaterials. Primeramente, 0.17g y 0.13gr de MWCNTs y 0.24g y 0.43g (70/30 MWNCTs/ VO_2 y 50-50 MWNCTs/ VO_2) de acetilacetato de vanadio fueron mezclados en un mortero de ágata por 10min. Posteriormente, se realizó la gasificación del VO_2 en vacío a 180°C . Luego, el producto obtenido se colocó en un vaso de precipitados donde se vertieron 31 mL de etanol absoluto, se colocó en un baño de ultrasonido por 10 minutos y se mantuvo en agitación por 10min. Finalmente, se procedió a realizar la combustión del alcohol. Una vez concluida la combustión el producto fue recolectado.

2.3 Pruebas de fluidez

Para el desarrollo de pruebas de fluidez inicialmente se realizó el cálculo para una relación de agua/yeso (a/y) de 0.70 y 0.65. A continuación, se efectuó la dispersión de los nanocompuestos en el agua de mezcla, una vez dispersados los nanocompuestos se pesó el yeso y se colocó dentro de la mezcladora y se agregó el agua con los nanocompuestos ya dispersados en ella agitando para evitar la precipitación, se dejó reposar por 30seg. Posteriormente, se mezcló a 300 revoluciones por minuto (rpm), se detuvo por 15seg y finalmente se mezcló por 1min a 1500 r.p.m. Una vez obtenida la mezcla se colocó en un molde de 4cm de altura y 6.5cmX0.5cm de diámetro (EN- 13279-2-2006).

2.4 Preparación de nanosuspensiones

En la preparación de las nanosupenciones inicialmente, se adiciono 0.5%p de polivinilpirrolidona o bien, 0.5%p polietilenglicol-400 como dispersantes en el agua de mezcla y se dejó agitar durante 15 min. Una vez mezclado el dispersante, se añadió el nanomaterial en una relación de 1%p y 0.5%p con relación al peso del yeso. Estos se dejaron en ultrasonido por 45 min.

2.5 Incorporación de nanomateriales de VO₂/MWCNTs en yeso

Primeramente, se preparó una suspensión con los nanomateriales dispersándolos en la misma agua de la mezcla como se describió en el punto anterior. El yeso se colocó en una mezcladora y se adicionó la nanosuspensión para una relación yeso/agua de 0.65 y se dejó reposar durante 30seg, subsiguientemente se mezcló 30seg a 300 rpm. Posteriormente, se limpian las paredes de la mezcladora en 15seg y finalmente, se mezcla 60 seg más a 1500 rpm. La tabla 1 describe los detalles y las proporciones para las muestras preparadas en esta investigación. Una vez obtenida las pastas estas fueron colocadas en moldes cúbicos de 2.5cmX2.5cm X2.5cm, y se desmoldaron al siguiente día.

2.6 Caracterización

Las fases cristalinas de los nanomateriales fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX) usando un difractómetro de rayo X marca PANALITICAL en el intervalo de 15 a 75° 2 θ con radiación K α de cobre. La temperatura de cambio de fase, así como el Cp y almacenamiento de calor fueron obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el rango de temperatura de 20 a 100 °C con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 2°C/min en una atmosfera de N₂. La morfología de los productos fue observada mediante microscopia electrónica de barrido de alta resolución (SEM). Así mismo, los análisis de conductividad térmica fueron obtenidos mediante el medidor de conductividad térmica TEMPOS ICT INTERNATIONAL, donde se analizaron cilindros de 10cm×2cm realizando una perforación de 6cm para insertar el sensor térmico.

2.7 Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión fueron obtenidos mediante una prensa hidráulica internacional Modelo ADR-Auto range, Mca. Se prepararon cubos de 2.5cm×2.5cm×2.5cm con 1 %, 0.5% de nanomateriales y 0.5 % de dispersante.

Tabla 1. Proporciones de los componentes en el yeso.

Muestra	Clave	Dispersante	%p VO ₂	%p MWNTCs	%p VO ₂ /MWNTCs
Yeso	A1	-	-	-	-
Yeso/PVP	A2	0.5%		-	
Yeso/PEG	A3	0.5%		-	-
VO ₂ /Yeso	A7	-	0.5%	-	-
VO ₂ /Yeso/PVP	A4	0.5%	1%		
	A5	0.5%	0.5%	-	-
VO ₂ /Yeso/ PEG	A6	0.5%	0.5%	-	-
MWNTCs/Yeso	A11	-	-	0.5%	-
MWNTCs/Yeso/PVP	A8	0.5%	-	1%	-
	A9	0.5%	-	0.5%	-
MWNTCs/Yeso/PEG	A10	0.5%	-	0.5%	-
MWNTCs-VO ₂ /Yeso 70-30	C1	0.5%			0.5%
MWNTCs-VO ₂ /Yeso 50-50	C2	0.5%			0.5%

3. Resultados

Inicialmente se probó una relación a/y de 0.70 debido al uso de los nanomateriales y los dispersantes ya que estos podrían ocasionar que la fluidez del material disminuya, sin embargo, como se puede observar en la figura 1a la mezcla conserva su fluidez. Por lo que se ajustó la mezcla figura 1b para obtener los rangos de fluidez de 15cm a 20cm establecida por la norma EN 13279-2 para pastas de yeso. Como se aprecia en la tabla 2 no existe una diferencia significativa en cada uno de los resultados de las muestras realizadas tanto a 0.70 y 0.65 a/y por lo que los nanomateriales no tienen un efecto significativo en la fluidez de yeso. Estas relaciones fueron establecidas dado que el yeso tiende a absorber mas agua que el cemento y la incorporación de los nanomateriales podrían generar una mayor absorción de agua.

La figura 2 exhibe los patrones de DRX correspondientes al VO₂ (M) y a los MWNCTs así como el del nanocompuesto de VO₂/MWNCTs a una relación 30-70 y 50-50. En la figura 2a se expone el difractograma de los MWNCTs en donde se observa un triángulo indicando cada una de sus reflexiones y el 2b un círculo indicando las reflexiones del VO₂ fase monoclinica (M), además se observan los planos (110), (-211), (212), (220), (300), (102). De esta forma, en la imagen 2c se presentan los DRX de las muestras a una concentración de 30% VO₂ y 70% MWNCTs y (2d) 50% VO₂ y 50% de MWNTC. Como se logra apreciar en los difractogramas las intensidades de los picos del VO₂ incrementan conforme aumenta la cantidad de VO₂ presente en los nanotubos de carbono, lo que nos indica el éxito en el depósito del VO₂ (M) sobre los nanotubos de carbono.

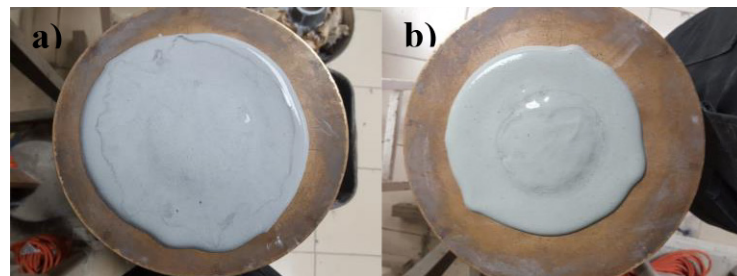


Figura 1. Pastas relación agua/yeso a) 0.70 y b) 0.65.

Tabla 2. Pruebas de fluidez.

Materiales	Fluidez relación a/y 0.70	Fluidez relación a/y 0.65
Yeso	20.50 cm	18.17 cm
VO ₂ /Yeso	20.35 cm	17.75 cm
VO ₂ /Yeso/PVP	18.85 cm	16.62 cm
MWNCTs/Yeso	19.67 cm	16.25 cm
MWNCTs/Yeso/PVP	17.50 cm	15.37 cm
MWNCTs-VO ₂ /Yeso	19.75 cm	16.75 cm
NCTs-VO ₂ /Yeso/PVP	19.37 cm	18.37 cm

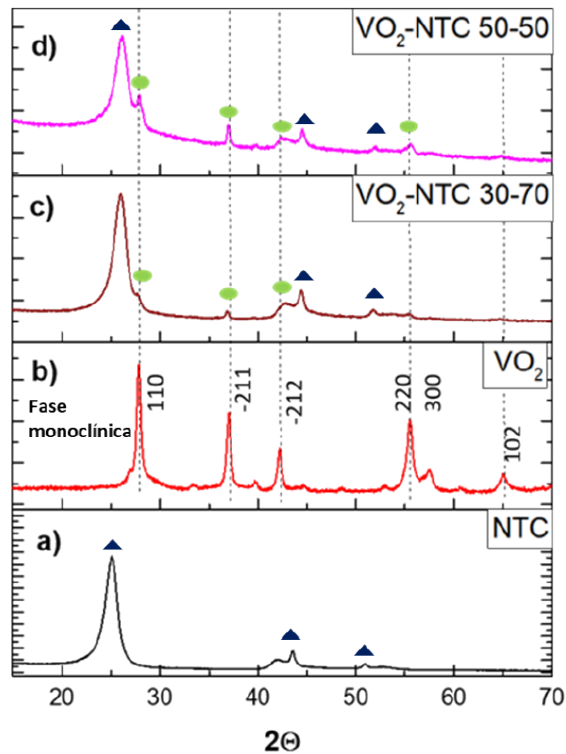


Figura 2. DRX de VO₂ (M) sobre los MWCNTs (a) VO₂ (M), (b) MWCNTs, (c) VO₂ (M)/ MWCNTs (30%-70%wt) y (d) VO₂ (M)/ MWCNTs (50%-50%).

Las imágenes de SEM de la figura 3 a) y b) muestran la morfología del VO₂ (M) obtenido por hidrotérmal y de los MWCNTs antes del depósito, como se puede observar estos presentan tamaños nanométricos y morfología tipo partícula y hojuela para el VO₂ (M). Por otra parte, se aprecia la morfología típica de los nanotubos de carbono. La micrografía c) revela el depósito del VO₂ sobre MWCNTs a nivel nanométrico de forma uniforme. Además, esto indica que estas partículas del VO₂ se encuentran en tamaños menores a 30 nm, dado que los nanotubos de carbono presentan un diámetro de 20-30 nm y una longitud de 10-30 μm.

Los datos provenientes del DSC de las muestras de VO₂ (M) Figura 4a), muestran un cambio de fase a 53.4 °C y 73.9 °C, como se mencionó anteriormente, convencionalmente la fase monoclinica presenta un cambio de fase a 68 °C, al tener el VO₂ en tamaño nanométrico se obtuvo una disminución en la temperatura de transición de alrededor de ~15 °C, lo que indica que existe una reversibilidad en el material lo cual ayuda a confirmar la obtención y la pureza del material, ya que se ha reportado que al no obtener esta fase pura no se presenta el fenómeno de reversibilidad del cambio de fase cristalina de monoclinica a tetragonal (sólido-sólido). Por otro lado, el cálculo de capacidad calorífica (Cp) arrojó un resultado de 3183.98 KJ/Kg⁻¹°K⁻¹ el cual fue calculado bajo la norma ASTM E1269-11 (Ec. 1) (American Society for Testing and Materials - ASTM E 1269-11) y es más alto que lo establecido para VO₂ en bulk. Es importante tener en cuenta que el Cp incrementa a medida que aumenta la cristalinidad y la histéresis térmica asociada es más pequeña por lo que un material más cristalino presentará mayor Cp lo que es deseable debido a que indica la cantidad de almacenamiento de calor.

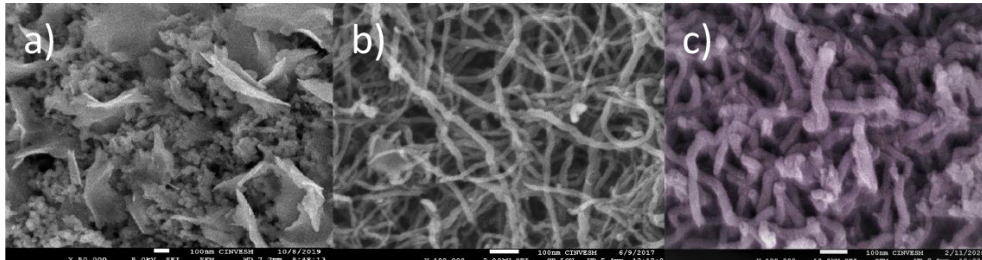


Figura 3. Imágenes de SEM de a) VO₂, b) MWCNTs y c) VO₂/MWCNTs (30-70 p%).

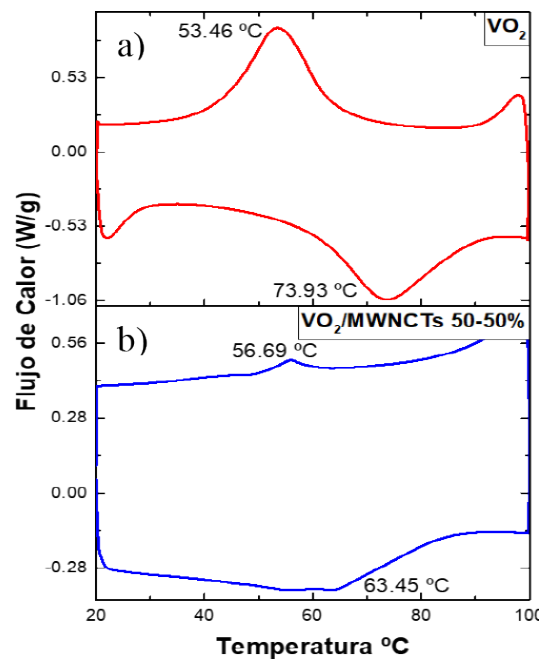


Figura 4. DSC de a) VO₂ y b) VO₂- MWCNTs 50-50 p%.

$$C_p(s) = C_p(st) \cdot \frac{D_s \cdot W_{st}}{D_{st} \cdot W_s} \quad (1)$$

Donde:

$C_p(s)$ calor específico de especimen medio ($J/g^{\circ}K$);

$C_p(st)$ capacidad de calor del estándar de zafiro ($J/g^{\circ}K$);

D_s desplazamiento vertical entre el portamuestras y las curvas térmicas DSC de la muestra e n una determinada temperatura, mW ;

D_{st} desplazamiento vertical entre el portamuestras y las curvas térmicas de zafiro DSC e n una determinada temperatura, mW ;

W_s masa de la muestra, mg ; W_{st} masa de zafiro estándar, mg .

Del mismo modo, los valores obtenidos de calor latente fueron de 14.39 J/Kg. Finalmente, la figura 4b) expone un cambio significativo en la temperatura de enfriamiento de ~10 °C en el nanocompuesto de VO₂ sobre los MWNCTs. De acuerdo a la literatura, la energía almacenada (J) durante el proceso de almacenamiento depende de la masa y de Cp (Ec. 2)(Farulla et al. 2020) obteniendo 9835.57 KJ/Kg⁻¹ °K.

$$Q_s = mC_p\Delta T \quad (2)$$

Donde:

M es la masa del medio de almacenamiento (kg);

C_p es la capacidad de calor de almacenamiento térmico del medio (J/Kg°K);

ΔT es el diferencial de temperatura (°C).

3.1 Análisis de conductividad térmica

A continuación, se muestran los resultados de conductividad térmica figura 5 y 6 donde se evaluaron los especímenes realizados a 0, 5, 7, 14 y 28 días. Como se logra apreciar en las gráficas a 0 días las muestras presentan una conductividad térmica hasta de 3Wm/°K en caso de la muestra A4 y a medida que transcurre el tiempo y la muestra presenta pérdida de agua la conductividad térmica disminuye en cada una de las muestras, hasta el día 14 donde se puede ver una estabilidad en el material esto es debido a que ya no existen pérdidas significativas de humedad. Lo que concuerda con la teoría ya que el agua al ser conductora esta puede incrementar la conductividad térmica de los materiales. Por lo que, una vez transcurrido los 28 días la muestra que manifestó una mayor conductividad térmica es la C1 con 0.42 Wm/°K. Adicionalmente, se puede observar una conductividad térmica mayor cuando es utilizado el PVP como dispersante esto podría deberse al estudio de los materiales en un futuro. Finalmente, comparando nuestros materiales con otros reportes de PCMs incorporados en yeso, el material sintetizado por nuestro grupo de trabajo presenta una mayor conductividad térmica sin la necesidad de utilizar grandes cantidades de material como es en el caso de los PCMs que existen en el mercado.

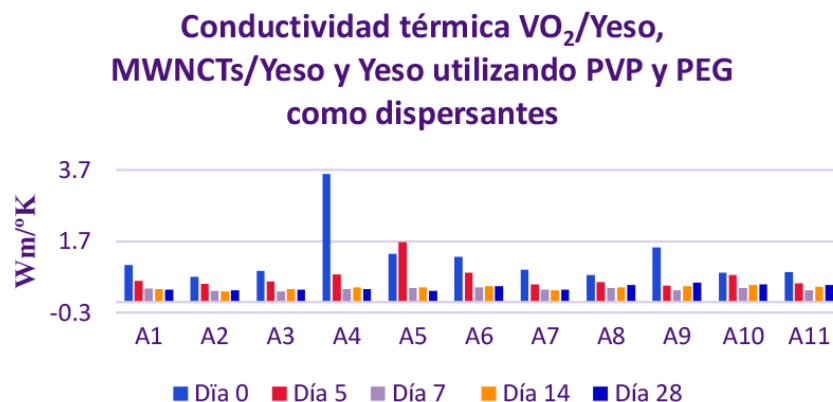


Figura 5. Conductividad térmica de VO₂, MWNCTs y Yeso a 1% y 0.5% utilizando PVP y PEG como dispersantes a 0, 7, 14 y 28 días.

3.2 Pruebas Mecánicas de compresión

De acuerdo con los resultados de las pruebas de compresión al incorporar (figura 7) el dispersante en el yeso comercial este presenta una pérdida de resistencia de $\sim 4 \text{ kg/cm}^2$ sin embargo al agregar los nanomateriales de VO_2 y MWNTs esta resistencia se mantiene. Sin embargo, los especímenes C1 mostraron las mejores propiedades de resistencia lo que nos indican que la incorporación del PCM tienen un efecto benéfico en el material, lo cual es atractivo ya que como se mencionó anteriormente, se ha reportado que la resistencia puede disminuir hasta un 50 % lo que ha limitado el uso de los PCM en el sector constructivo. De esta manera, estos nanomateriales podrían ser incorporados a otros materiales de construcción para estudiar su comportamiento. De acuerdo con los resultados obtenidos y teniendo en cuenta lo ya reportado estos materiales podrían competir con los que se encuentran en el mercado, los cuales ya han sido probados en el sector constructivo por lo que estos materiales podrían ser utilizados como PCMs para la mitigación de aires acondicionados.

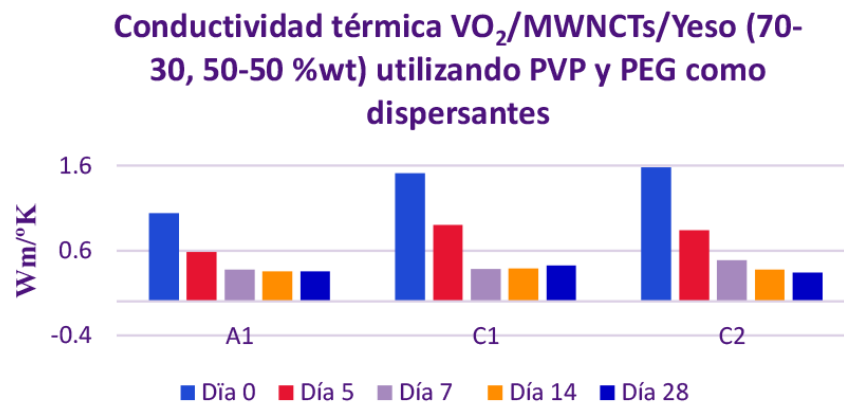


Figura 6. Conductividad térmica de los nanocompuestos a 1% y 0.5% utilizando PVP y PEG como dispersantes a 0, 7, 14 y 28 días a diferentes relaciones de VO_2 sobre los

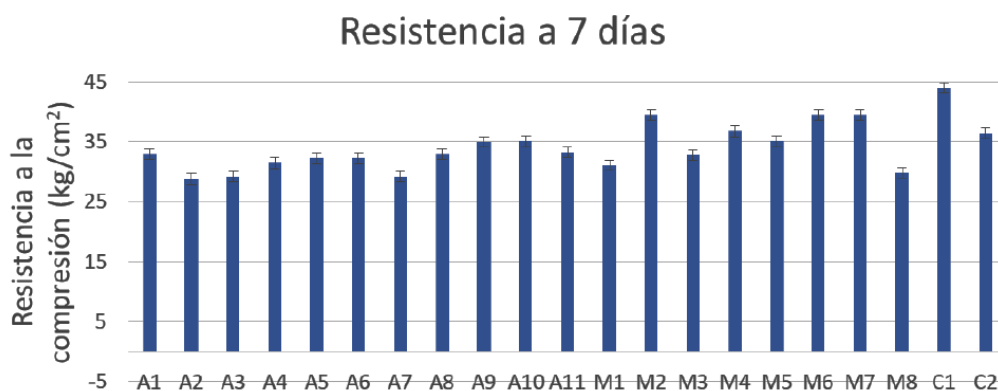


Figura 7. Pruebas de compresión a 7 días en función de la incorporación de los nanomateriales y dispersante.

4. Conclusiones

Los resultados de Cp así como la conductividad térmica experimentales mostraron un incremento en las propiedades térmicas de los materiales, además el almacenamiento de energía térmica el cual se encuentra en un valor de 9835.57 KJ/Kg⁻¹°K. Así mismo, la resistencia de los materiales no se ve afectada de forma negativa en los materiales de construcción por lo que este podría ser agregado en otro tipo de material y estudiar sus propiedades. De esta forma se puede observar que los mejores resultados se obtuvieron de la muestra C1 que contenía 0.5 % VO₂/MWNCTs al 70-30%p y 0.5 % de PVP cual presentó mejor resistencia a la compresión y conductividad térmica. Finalmente, estos materiales no solo presentaron buenas propiedades tanto térmica como mecánicas comparados con otros estudios si no al ser sintetizados mediante técnicas fáciles y versátiles podrían producirse y ser escaladas a nivel industrial.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo económico otorgado a través de los proyectos de Ciencia Básica No. A1-S-38327, Infraestructura No. IT-301307 y por la beca No. 277093. Así como, al proyecto P/PROFEXCE-2020-19MSU00 y AICYT UANL No. IT1345-20. Además, se agradece al Laboratorio de Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL por los servicios prestados y todas aquellas personas que contribuyeron para la realización de este proyecto.

7. Referencias

- Afshin Marani, Moncef L. Nehdi*. 2019. "Integrating Phase Change Materials in Construction Materials: Critical Review." *Construction and Materials* 217: 36–49.
- American Society for Testing and Materials - ASTM E 1269-11. 2011. "Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning." *Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry* i: 1–6.
- Cheng, Tianshu et al. 2020. "A Newly Designed Paraffin@VO₂ Phase Change Material with the Combination of High Latent Heat and Large Thermal Conductivity." *Journal of Colloid and Interface Science* 559: 226–35. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.033>.
- Cui, Yanbin, Caihong Liu, Shan Hu, and Xun Yu. 2011. "The Experimental Exploration of Carbon Nanofiber and Carbon Nanotube Additives on Thermal Behavior of Phase Change Materials." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(4): 1208–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.021>.
- Farulla, Girolama Airò, Maurizio Cellura, Francesco Guarino, and Marco Ferraro. 2020. "A Review of Thermochemical Energy Storage Systems for Power Grid Support." *Applied Sciences (Switzerland)* 10(9).
- IEA. 2019. *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
- Jayalath, Amitha, Priyan Mendis, Ranjith Gammampila, and Lu Aye. 2011. "Applications of Phase Change Materials in Concrete for Sustainable Built Environment: A Review." *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Construction and Management*.
- Ji, Peijun, Huanhuan Sun, Yunxia Zhong, and Wei Feng. 2012. "Improvement of the Thermal Conductivity of a Phase Change Material by the Functionalized Carbon Nanotubes." *Chemical Engineering Science* 81: 140–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.07.002>.

- Kim, P., L. Shi, A. Majumdar, and P. L. McEuen. 2001. "Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes." *Physical Review Letters* 87(21): 215502-1-215502-4.
- Liston, Leah C. et al. 2014. "Toward the Use of Phase Change Materials (PCM) in Concrete Pavements: Evaluation of Thermal Properties of PCM." *2014 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Innovations in Airport Safety and Pavement Technologies* (August): 1-13. <http://www.airporttech.tc.faa.gov/att2014/Papers/P10093 - Liston et al.pdf>.
- Muramoto, Kei et al. 2018. "VO₂-Dispersed Glass: A New Class of Phase Change Material." *Scientific Reports* 8(1): 1-8. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-20519-6>.
- Oliver, Alicia. 2012. "Thermal Characterization of Gypsum Boards with PCM Included: Thermal Energy Storage in Buildings through Latent Heat." *Energy and Buildings* 48: 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.026>.
- Ramakrishnan, Sayanthan, Xiaoming Wang, Jay Sanjayan, and John Wilson. 2017. "Thermal Energy Storage Enhancement of Lightweight Cement Mortars with the Application of Phase Change Materials." *Procedia Engineering* 180: 1170-77.
- Sahu, Likesh Kumar, Dilbag Mondloe, and Ajay Garhewal. 2017. "A Review on Thermal and Mechanical Properties of Concrete Containing Phase Change Material." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 04(05): 2154-65.
- Takai, Chika et al. 2018. "Chemical and Thermal Properties of VO₂ Mechanochemically Derived from V₂O₅ by Co-Milling with Paraffin Wax." *RSC Advances* 8(38): 21306-15.
- Tang, Qianqiu, Jun Sun, Shuangmin Yu, and Gengchao Wang. 2014. "Improving Thermal Conductivity and Decreasing Supercooling of Paraffin Phase Change Materials by N-Octadecylamine-Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes." *RSC Advances* 4(69): 36584-90. <http://dx.doi.org/10.1039/C4RA04225E>.
- Wang, Jifen et al. 2010. "Enhancing Thermal Conductivity of Palmitic Acid Based Phase Change Materials with Carbon Nanotubes as Fillers." *Solar Energy* 84(2): 339-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.12.004>.
- Zhang, Bo et al. 2018. "Thermal and Mechanical Properties of Expanded Graphite/Paraffin Gypsum-Based Composite Material Reinforced by Carbon Fiber." *Materials* 11(11).
- Zhang, Huanzhi et al. 2012. "Preparation and Thermal Performance of Gypsum Boards Incorporated with Microencapsulated Phase Change Materials for Thermal Regulation." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 102: 93-102.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Funcionalización de cementantes alternativos y comerciales por adición de SiO-TiO_2 y su evaluación fotocatalítica en la degradación de contaminantes en agua y aire

B. G. Esquivel-Alonso¹, I. Juárez-Ramírez, Isaías¹, A. Martínez-de la Cruz²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León

Departamento de Eco-materiales y Energía, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,

² Universidad Autónoma de Nuevo León,

Autor de Contacto: isaias.juarezrm@uanl.edu.mx

Resumen

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad es la contaminación ambiental y sus efectos. Una de las industrias que más contaminan es la industria de la construcción. Es por eso Por lo que, en este trabajo se busca aprovechar el vidrio y la ceniza volante para la elaboración de cementantes alternativos, a los cuales se les agregará un fotocatalizador para conferirles propiedades fotocatalíticas para llevar a cabo la conversión de NO_x en beneficio de la purificación del aire y degradación de sustancias orgánicas en medio acuoso. Para los cementantes alternativos se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y blanco con Ceniza y Vidrio Sódico Cálculo. A las distintas mezclas de cementantes se les agregó TiO_2 y SiC-TiO_2 en 3 y 5% para activar sus propiedades fotocatalíticas. Una vez transcurrido el tiempo de fraguado se le realizaron pruebas de resistencia mecánica y Difracción de Rayos-X. Además, estos materiales fueron evaluados en pruebas de degradación de NO_x y degradación del colorante Índigo Carmín en medio acuoso. En cuanto a los resultados, la resistencia a compresión de los cementantes alternativos se obtuvo 108 kg/cm^2 esta podría emplearse para elementos que no requieran tanta capacidad estructural o recubrimientos. Por otro lado, en las pruebas fotocatalíticas, el cementante CEMEX blanco con fotocatalizador SiC-TiO_2 , tuvo mejores resultados en media hora con 17% de actividad, mientras que la actividad fotocatalítica de los cementantes alternativos fue de 3%. Mientras que en la degradación del colorante IC, se alcanzó hasta un 85% de eficiencia. Además, como conclusión, se encontró que al emplear la mezcla de SiC-TiO_2 en proporción 20-80%, como fotocatalizador favorece la funcionalización de los materiales cementantes para la degradación de NO_x y la degradación de contaminantes orgánicos en medio acuoso.

Palabras clave: Fotocatálisis; Cementante alternativo; NO_x .

Abstract

Today one of the great problems facing humanity is environmental pollution and its effects. One of the most polluting industries is the construction industry. That is why, in this work we seek to take advantage of glass and fly ash for the production of alternative cements, to which a photocatalyst will be added to give them photocatalytic properties to carry out the conversion of NO_x in benefit of air purification and degradation of organic substances in aqueous environment. For the alternative cements, the partial replacement of the gray and white Cemex cement with ash and sodium calcium glass was carried out. TiO₂ and SiC-TiO₂ in 3 and 5% were added to the different cementitious mixtures to activate their photocatalytic properties. Once the setting time had elapsed, mechanical resistance and X-Ray Diffraction tests were carried out. In addition, these materials were evaluated in NO_x degradation tests and degradation of the dye Indigo Carmine in an aqueous medium. As for the results, the compressive strength of the alternative cements was obtained 108 kg/cm² this could be used for elements that do not require as much structural capacity or coatings. On the other hand, in the photocatalytic tests, the white CEMEX cement with SiC-TiO₂ photocatalyst, had better results in half an hour with 17% of activity, while the photocatalytic activity of the alternative cements was 3%. While in the degradation of the IC colorant, up to 85% efficiency was achieved. In addition, as a conclusion, it was found that by using the SiC-TiO₂ mixture in a proportion of 20-80%, as a photocatalyst it favors the functionalization of the cementitious materials for the degradation of NO_x and the degradation of organic contaminants in an aqueous medium.

Keywords: Photocatalysis; Alternative cementitious material; NO_x.

1. Introducción

1.1. Generalidades

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad a nivel mundial es la contaminación ambiental y sus efectos tales como: el rápido incremento del calentamiento global y el desarrollo de enfermedades cancerígenas, respiratorias, dermatológicas, etc. Este fenómeno es generado por las grandes ciudades, debido a la sobrepoblación que se concentra en ellas, por la industrialización y la explotación de los recursos naturales en zonas cercanas a estas.

La contaminación del aire se entiende como la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera a ciertas concentraciones que pueden provocar daños a la salud y contribuir al calentamiento global. Los contaminantes del aire se clasifican según su origen, pueden ser primarios o secundarios, los primarios son emitidos directamente a la atmósfera como el monóxido de carbono (CO) dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y Partículas (PM10 y PM2.5) (Urbilla *et al.*, 2017); y los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmósfera a partir de reacciones químicas como por ejemplo el ozono (O₃), formado por reacciones de contaminantes primarios (COVs y óxidos de nitrógeno (NO_x) ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Urbilla *et al.*, 2017).

Los gases NO_x tiene un efecto negativo en el medio ambiente ya que producen lluvia ácida, formación de ozono troposférico, fotoquímicos. Smog, efecto invernadero, entre otros. Además, afectan en la salud de los seres humanos y animales causando, irritación de la piel, dificultad para respirar, puede causar náuseas, y se les ha asociado con el desarrollo de cáncer (Luévano y Martínez de la Cruz, 2018).

En la actualidad existen varios estándares de calidad del aire en los países con el objetivo de proteger la salud (SDS-Nuevo León, 2015). En México, estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM señalan cuales son los límites permisibles para los contaminantes. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para

evaluar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire (Gobierno del Estado de México).

1.2 Contaminación provocada por la industria de la construcción

Se calcula que la construcción consume el 5.7 % de energía a nivel global y aporta el 6.8 % de los gases de efecto invernadero (Lia *et al.*, 2019), debido a los procesos de obtención del cemento. Esta contaminación se genera en las ciudades más desarrolladas y pobladas, y aunque el problema inicia siendo puntual en determinada área, termina afectando a todo el planeta en general.

Alrededor de 7 % de las emisiones totales de CO₂ del planeta son por los procesos de la industria concreta, se dice que por cada ton de cemento producido se arroja 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera (incluyendo la transportación) (Caijun Shi *et al.*, 2011).

Otro factor que impacta gravemente es la extracción de materias primas, ya que esta industria consume el 60% de las materias primas que se extraen de la tierra, en donde además libera emisiones de CO₂ y PM10 PM2.6, produce el 50 % de residuos (UZZAI Hossain *et al.*, 2018).

Por lo que con el tiempo el ser humano ha desarrollado la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación TAO's en los cementantes que ayudan a la purificación del aire, tanto en el interior como exterior de la construcción, además de tener propiedades de autolimpieza (Guerrini *et al.*, 2008); Lúevano-Hipolito y Martínez de la Cruz, 2014).

1.3 Tecnología de autolimpieza en cementantes: Fotocatálisis

El proceso de fotocatálisis se da cuando el semiconductor al recibir radiación de un determinado rango de longitud de onda genera pares electrón/hueco.

A causa de ello, los huecos fotogenerados, dan lugar en la superficie del semiconductor a las reacciones de fotooxidación y los electrones de la banda de conducción, dan lugar a las reacciones de foto-reducción (Sánchez Díaz, 2013).

1.4 Aplicación de la fotocatálisis para edificaciones sustentables

La fotocatálisis puede aplicarse en diferentes zonas de una construcción, usualmente al agregársele TiO₂, CdS, Fe₂O₃ y WO₃ a materiales de construcción (Ming-Zhi *et al.*, 2018). Permitiendo así desarrollar en propiedades de autolimpieza, purificación de aire y capacidad antibacterial. Los materiales son comúnmente expuestos a los contaminantes atmosféricos, con la finalidad de proporcionar superficies que permiten que ocurran reacciones fotocatalíticas heterogéneas que atacan a los NOx (NO y NO₂) provocados por los escapes de los vehículos y la industria (Ming-Zhi *et al.*, 2018).

Los contaminantes que son más comúnmente analizados para evaluar las propiedades de auto limpieza y descontaminación son colorantes naturales, compuestos inorgánicos (NO_x, SO_x, CO, entre otros), hidrocarburos, pesticidas y algunas bacterias, virus y hongos (Sánchez Díaz, 2013). Además, hoy en día ya se puede utilizar esta tecnología en muros de block, muros de exterior, muros de túneles, pinturas, morteros, asfaltos, impermeabilizantes, acabados exteriores, entre otras (Luévano y Martínez de la Cruz, 2018).

1.5 Discusión bibliográfica

Dentro de las fuentes contaminantes se pueden mencionar las actividades industriales, el gran aforo del parque vehicular, y las actividades domésticas, entre otros. Esto expone a la población enfermedades, uno

de los contaminantes del aire que han recibido especial atención en los últimos años se encuentran los NO_x , ya que son causantes de problemas de salud que van desde irritación en el tracto respiratorio, náuseas, dolores de cabeza, incremento de asma en niños respiratorias hasta enfermedades cancerígenas (Sánchez Díaz, 2013; Luévano-Hipolito, 2015) y también de provocar la llamada lluvia ácida (Angelo *et al.*, 2013). Por ello, es de gran importancia el llevar a cabo investigaciones que contribuyan con la limpieza del medio ambiente (Luévano y Martínez de la Cruz, 2018).

La presencia de los NO_x (comúnmente óxido nítrico, NO , y dióxido de nitrógeno, NO_2), es consecuencia principalmente de los gases liberados de la combustión de los combustibles fósiles empleados en los automóviles, y de algunas empresas dedicadas a la generación de energía fósil (Luévano Hipolito y Martínez de la Cruz, 2016; Luévano-Hipolito y Martínez, 2018). Por lo que, se hace necesario buscar disminuir los niveles de contaminación de estos óxidos, y además provocar su conversión a productos menos dañinos.

Una de las tecnologías que se está utilizando con grandes expectativas es la fotocatalisis heterogénea, ya que mediante esta técnica es posible provocar la oxidación de los NO_x , para pasar de NO a NO_2 , o a NO_3^- , estos últimos llamados nitratos, los cuales pueden llegar a formar ácido nítrico (HNO_3) (Luévano-Hipolito y Martínez, 2018), un compuesto que puede ser empleado como fertilizante.

El fotocatalizador más empleado en esta tecnología es el dióxido de titanio (TiO_2) (Luévano Hipolito y Martínez de la Cruz, 2016; Luévano-Hipolito y Martínez, 2018) el cual ha sido agregado en morteros, concretos, asfaltos, azulejos, etc., cuya actividad tiene la desventaja de ser limitada al ser irradiado con luz UV y luz solar (Ming-Zhi *et al.*, 2018). Debido a esta limitante actualmente se trabaja mezclándolo con otros compuestos para mejorar su actividad fotocatalítica.

Entre los compuestos con los que se ha estado trabajado se encuentra el SiC, el cual tiene una banda de Band-Gap de 3.0 eV, muy parecida a la del TiO_2 de 3.2 eV, además tiene alta termoestabilidad, alta resistencia mecánica y una alta conductividad eléctrica [15] además de haber sido probado para la degradación de rodamina B y azul de metileno alcanzando el 70 y 77 % de degradación (Juárez *et al.*, 2013; Vazquez, 2018). El SiC es de color oscuro a diferencia del TiO_2 lo cual nos ayudará a que el primero absorba la luz solar para después transferirla al TiO_2 de manera atenuada y así se pueda incrementar las reacciones de oxidación de los NO_x , evitando la recombinación de los huecos y electrones de nuestro semiconductor.

2. Procedimiento

2.1 Preparación de los materiales cementantes comerciales

Se utilizaron cementantes comerciales de la marca Cemex blanco, Cemex gris, Crest y Bexel y se elaboraron morteros conforme a la norma ASTM C 109. Se empleó Arena Silica estándar, ya que es la recomendada en la norma y una relación agua/cemento de 0.485. Una vez preparada nuestra mezcla, se vertieron en moldes de 5x5 cm con compactaciones conforme nos marcan la norma ASTM-C-109. Al terminar dichas compactaciones, se dejaron fraguando durante 24 horas, después fueron llevados a un cuarto de curado con una temperatura controlada de 25 °C, donde permanecieron para poder evaluar su resistencia a la compresión a los 7, 15 y 28 días. Adicionalmente, se les realizaron pruebas de resistencia mecánica, DRX y SEM.

2.2 Preparación de los materiales cementantes alternativos

Para la elaboración de nuestros cementantes se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y Blanco, en distintos porcentajes (tabla 1). Como suplemento parcial se incorporó Ceniza y Vidrio Sódico Cálculo, este último se obtuvo al pulverizar diferentes tipos de botellas residuales fabricadas de este material. Para la activación alcalina, se utilizó hidróxido de sodio, en solución con concentración 4 Molar.

Tabla 1. Proporcionamiento de cementantes alternos.

CP	Cementante	Vidrio	C.V
Gris	(%)	(%)	(%)
E2-G	20	10	70
E3-G	30	10	60
E4-G	40	10	50
E5-G	50	10	40
E1-G	100	0	0
Blanco			
E2-B	20	10	70
E3-B	30	10	60
E4-B	40	10	50
E5-B	50	10	40
E1-B	100	0	0
Crest			
E3 Crest	100	0	0
Bexel			
E-4 Bexel	100	0	0

2.4 Preparación de fotocatalizador

La preparación del fotocatalizador SiC-TiO₂ en diferentes proporciones se llevó a cabo mediante molienda mecánica de la mezcla de ambos materiales a 300 revoluciones por 10 minutos, en relaciones en peso de 20-80%, 80-20% y 50-50% de SiC-TiO₂, respectivamente. En este caso, se usó el TiO₂ P-25 comercial, así como SiC comercial de la marca Sigma-Aldrich. A cada uno de los morteros se les agregó TiO₂ y SiC-TiO₂ en proporciones de 3 y 5% para funcionalizarlos y evaluarlos fotocatalíticamente en pruebas de conversión de NO_x. Para estos cementantes, se utilizaron moldes de 5x10x2 cm para poder ser usados en el reactor.

2.7 Pruebas fotocatalíticas para la conversión de NO_x

La actividad fotocatalítica de los materiales cementantes preparados, se evaluó mediante la conversión de NO_x. Las pruebas se hicieron conforme a la norma ISO 22197-1 (ISO, 2007), usando una lámpara de luz UV con una longitud de onda de 365 nm.

2.8 Pruebas fotocatalíticas para la degradación de colorante

Las pruebas fotocatalíticas para medir la degradación de colorante fueron realizadas con una lámpara UV con una longitud de onda de 254 nm se empleó el colorante Índigo Carmín con una concentración inicial de 15 ppm.

3. Unidades

Las unidades de medición utilizadas son las del Sistema Internacional.

4. Uso de Marcas Registradas

- Cemex
- Bexel
- Crest

5. Abreviaciones y Acrónimos

- kg/cm² - Kilogramos por centímetro cuadrado.
- PM10 - Material particulado menor a 10 micras.
- PM2.5- Material particulado menor a 2.5 micras.
- COVs- Compuestos orgánicos volátiles.
- DRX - Difracción de rayos X.
- SEM- Microscopio electrónico de barrido.

6. Resultados

6.1 Resistencia en cementantes alternativos

Los resultados de la prueba de resistencia mecánica muestran que los cementantes comerciales preparados presentan valores de alrededor de 500 kg/cm² para las muestras con cemento blanco, 300 kg/cm², muy parecido al cementante Crest, 288 kg/cm² y Bexel, 270 kg/cm², tal y como se muestra en la figura 1, estos últimos empleados como boquilla en juntas de piso-azulejo.

Por otro lado, en el caso de los cementantes alternativos, se elaboraron los proporcionamientos mostrados en la tabla 2, donde se modificó la cantidad de ceniza volante, cemento, y fijamos en 10 % la cantidad de ceniza Volante. Lo anterior, en concordancia con el trabajo de Yahya Jani, quien comparó algunos resultados obtenidos al agregar entre el 10 y 20 % de vidrio borosilicato en sustitución del cemento, siendo el 10 % de sustitución el porcentaje más recomendado (Jani y Hogland, 2014). Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión se muestran en la figura 2.

Como se puede apreciar, la resistencia del cementante alternativo disminuyó a casi un tercio en comparación a la presentada por el cementante comercial. En este caso, la resistencia más alta alcanzada para el cementante alternativo conteniendo cemento gris fue de 99 kg/cm² mientras que el cementante alternativo elaborado con el cementante blanco fue de 108 kg/cm² (E-5). De acuerdo con estos resultados, se puede decir que estos cementantes alternativos podrían tener uso en elementos en donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo en banquetas, para la elaboración de blocks, morteros para recubrimiento, entre otras. Sin embargo, no podrían considerarse como elementos estructurales de alta resistencia.

6.2 Difracción de rayos-X Cementantes Comerciales (DRX)

Al analizar los materiales por Difracción de rayos-X, se detectó la presencia de fases presentes en el cemento convencional al ser hidratadas sus fases iniciales (alita, belita, ferrita y aluminato tricálcico), en este caso se puede apreciar como el pico de la alita (C3S) tiene mayor intensidad en los cementantes comerciales Cemex, Crest y Bexel, a diferencia de los cementantes alternativos, elaborados con ceniza volante y vidrio.

Tabla 2. Proporcionamiento de cementantes fotocatalíticos.

Nombre	Cementante	% Fotocatalizador	Fotocatalizador
Prisma E-12	C. Alternativo Blanco	0	
Prisma E-10	C. Alternativo Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-12	C. Alternativo Blanco	5	TiO ₂
Prisma E-12	C. Alternativo Gris	0	TiO ₂
Prisma E-10	C. Alternativo Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-12	C. Alternativo Gris	5	TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Blanco	5	TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Gris	5	TiO ₂
Prisma 11	Crest	0	
Prisma E13	Crest	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Crest	5	TiO ₂
Prisma 11	Bexel	0	
Prisma E-13	Bexel	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Bexel	5	TiO ₂

Cementantes comerciales-Resistencia a los 28 días

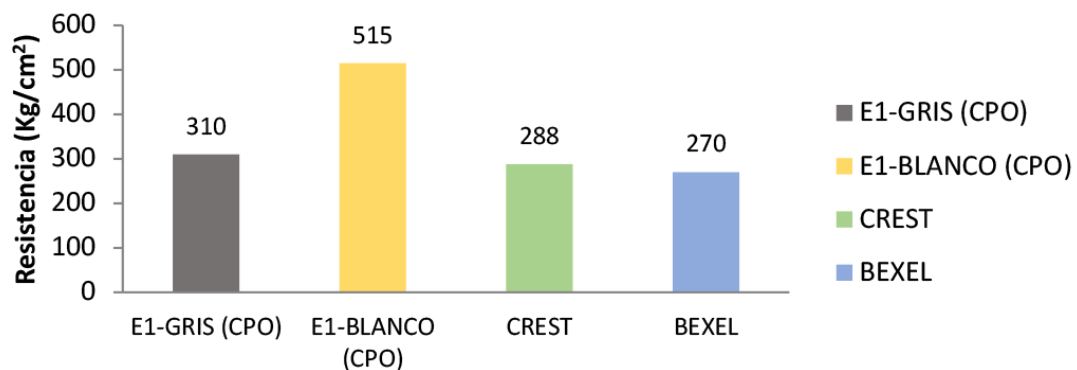


Figura 1. Resistencia de cementantes comerciales.

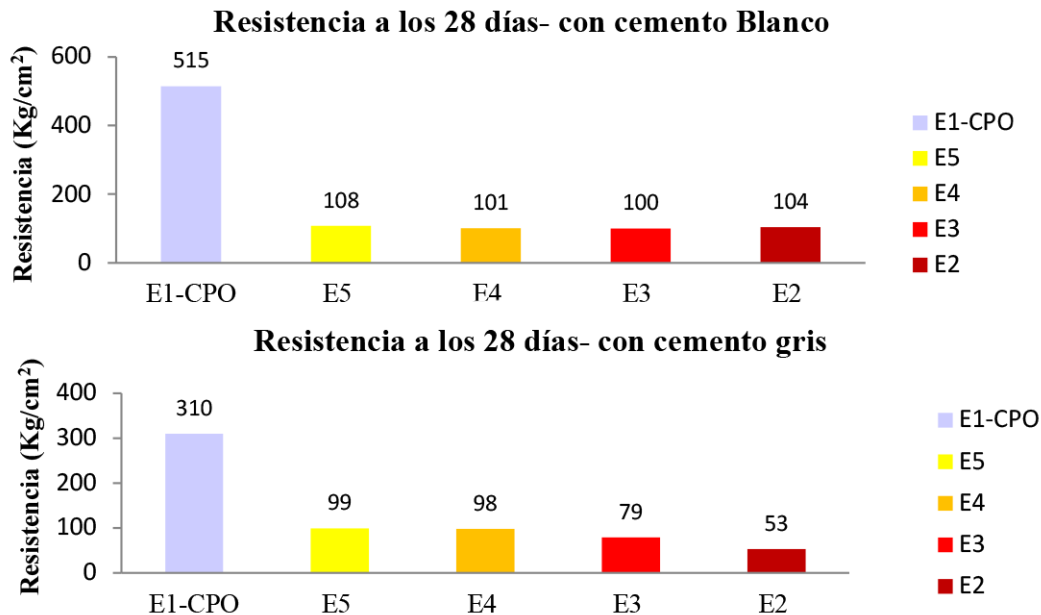


Figura 2. Resistencia de cementantes alternativos empleando cemento gris y cemento blanco para su elaboración.

Este resultado, corrobora el resultado de la baja resistencia presentada por los cementantes alternativos en comparación a los cementantes comerciales. Lo anterior, debido a que la variación de intensidades en las fases de los distintos cementos son las que le dan sus propiedades de resistencia a la compresión, ataque a los sulfuros y desarrollo del gel CASH durante el fraguado (Pierre, 2018).

En la figura 3 se puede observar claramente la intensidad de la fase C_3S del cemento Blanco, el cual tuvo una mayor resistencia a la compresión.

6.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB) en nuestros cementantes

Los materiales fueron analizados por microscopía electrónica de barrido, donde se pudo apreciar la morfología que presenta cada muestra. En las imágenes de la figura 4, se muestra cómo se incorporó el TiO_2 con el SiC mediante la molienda mecánica.

En las figuras 5 y 6, se muestra la comparación del cementante alternativo y el cementante comercial conteniendo el fotocatalizador. De acuerdo con lo observado, la morfología de nuestro cementante alternativo (E-12) cambia al agregarle el fotocatalizador, las partículas más finas de este fotocatalizador se aglomeran en la superficie del cementante y las partículas se ven menos angulares, más redondas y definidas. Sin embargo, no se aprecia lo mismo al agregarle el fotocatalizador al cemento comercial (E-30), pues no se aprecia ninguna morfología definida. Probablemente, las partículas de ceniza volante y vidrio estén también en la superficie y debido a la presencia de éstas la morfología cambia.

Por otro lado, podemos observar que existe un cambio de morfología en el cementante Cemex al utilizar TiO_2 y SiC- TiO_2 , donde se aprecia que al emplear SiC- TiO_2 se tiene una topografía más rocosa en donde se ve más rugosidad en la superficie ya que hay mucha variación en la intensidad de sombras de la imagen de la muestra E-35 gris y blanco.

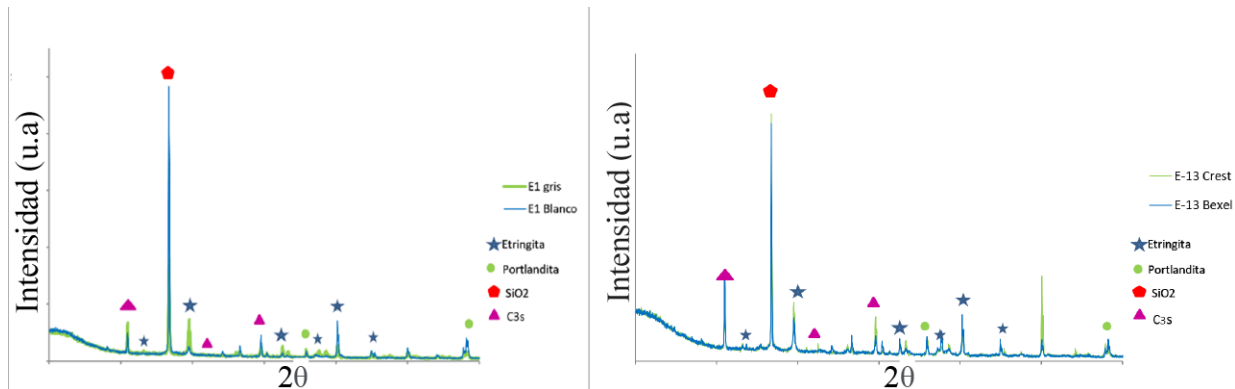


Figura 3. (a) DRX Cemex gris y blanco. (b) DRX Crest y Bexel.

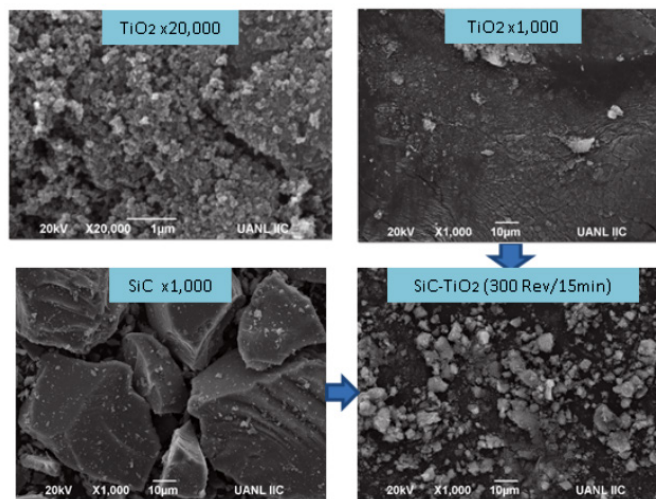


Figura 4. MEB de fotocatalizadores SiC, TiO₂ y SiC-TiO₂ en polvo.

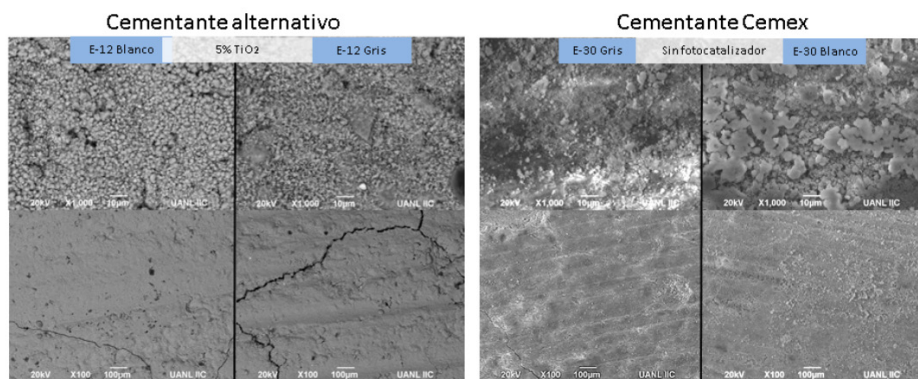


Figura 5. Cementante alternativo con fotocatalizador vs comercial sin fotocatalizador.

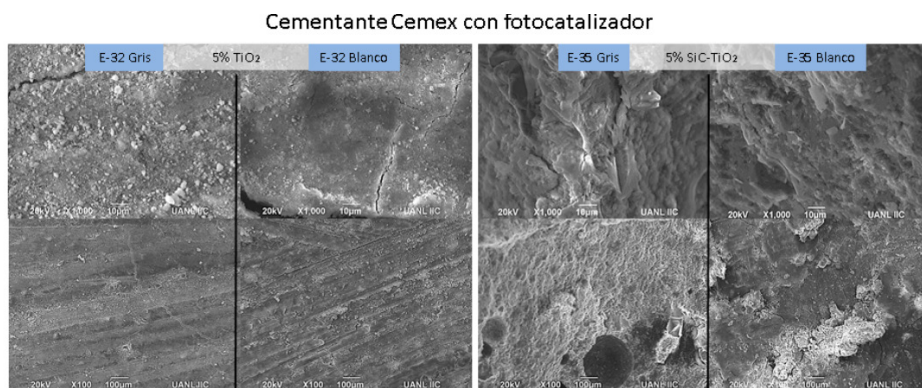


Figura 6. Cementante alternativo con fotocatalizador vs cementante comercial sin fotocatalizador.

6.4 Oxidación de NO_x

Inicialmente, se realizaron las pruebas en nuestros fotocatalizadores en polvo cubriendo un vidrio que se usó de soporte en el reactor, esto para medir la eficiencia de nuestros fotocatalizadores por sí solos. En la figura 7 se muestran los resultados de las mezclas de fotocatalizadores en diferentes proporciones: 80:20, 20:80, 50:50 SiC-TiO₂ y el TiO₂ por sí solo. La relación del fotocatalizador SiC -TiO₂ que dio los mejores resultados fue la mezcla de SiC-TiO₂ 20-80%. Por lo que se decidió continuar con esta relación para la elaboración de los cementantes fotocatalíticos.

Una vez seleccionada la mezcla SiC-TiO₂ 20-80%, ésta fue agregada en porcentajes de 3 y 5 %, debido a que las cantidades más usadas de fotocatalizador en cementante van de 1 % a 10 % (Hanus y Harris, 2013; Yang *et al.*, 2018).

En la figura 8 se muestran las gráficas de conversión de NO_x, donde se aprecia que el mortero elaborado con cemento Cemex blanco y conteniendo SiC-TiO₂, presentó un mayor grado de conversión (17 %) en 30 minutos, en comparación con los otros cementantes utilizados. Incluso, este valor está por encima de algunos reportes encontrados en literatura para cementantes conteniendo TiO₂ como fotocatalizador, donde mencionan conversiones de NO_x de 5.8 % en 24 horas (Ming-Zhi Guoa *et al.*, 2018). Mientras que, en otro trabajo se reporta que la adición de 1 % en peso de TiO₂ en estuco aplicado sobre un bloque presentó 57 % de conversión (Luévano-Hipolito y Martínez, 2018). Sin embargo, en nuestro caso, el fotocatalizador está incorporado directamente en la mezcla cementante, mientras que en la mayoría de los reportes se encuentra expuesto en la superficie como una pasta o recubrimiento, lo que provoca su fácil remoción, o daño físico. En este caso, los resultados muestran que en general, todos los materiales cementantes evaluados, comerciales y alternativos, lograron presentar actividad para la conversión de NO_x, por la presencia de los fotocatalizadores agregados, SiC y TiO₂.

6.5 Degradación de IC en cementante bajo luz UV

Debido a que los materiales presentaron resultados interesantes para la degradación de NO_x y debido a que la degradación de colorantes también puede ser llevada a cabo mediante un proceso fotinducido, se decidió probar estos materiales para la degradación de colorante IC bajo luz UV. De acuerdo con los resultados obtenidos y que son mostrados en la figura 9, se logró obtener hasta un 85 % de degradación del colorante al utilizar el cementante comercial Cemex Blanco conteniendo 5 % de SiC-TiO₂ como fotocatalizador. También, puede apreciarse que en estas pruebas nuestro cementante alternativo presentó buena actividad, llegando a

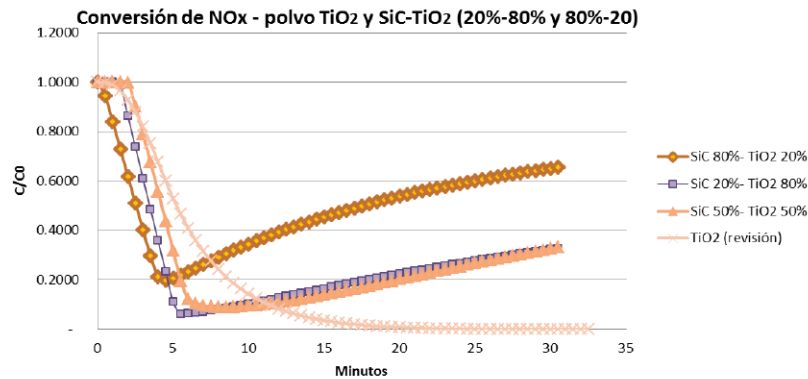


Figura 7. Conversión de NO_x en distintos fotocatalizador SiC-TiO₂ en polvo y TiO₂.

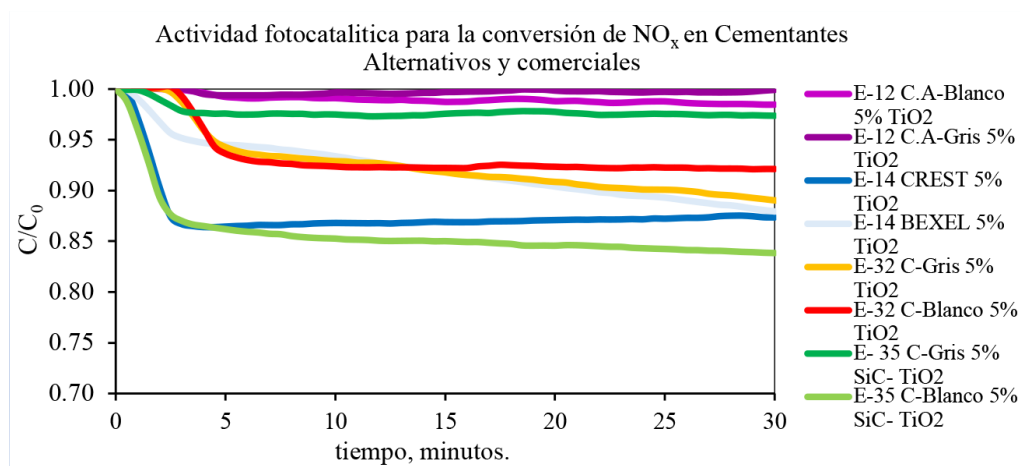


Figura 8. Conversión de NO_x en cementantes con 5% de fotocatalizador.

degradar hasta en un 50 % al colorante IC. Nuestros resultados son comparables a los obtenidos por otros autores, quienes reportan la degradación de rodamina B después de 60 minutos de reacción usando TiO₂ comercial alcanzando el 77 % de degradación (Juárez *et al.*, 2013), mientras que otros usando SiC-TiO₂ obtuvieron 45 % de actividad después de 4 horas de reacción para la degradación de IC (Vazquez, 2018).

En general, los materiales cementantes estudiados, tanto comerciales como alternativos, lograron ser funcionalizados por la adición de TiO₂ y SiC-TiO₂, ya que éstos por sí solos no presentan actividad fotocatalítica. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies autolimpiantes, y a la vez coadyuvar a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua. Asimismo, estos resultados nos permiten sugerir que la optimización de las proporciones de la mezcla del fotocatalizador, así como la cantidad incorporada a la mezcla cementantes, permitirán una mejora considerable en las propiedades de autolimpieza.

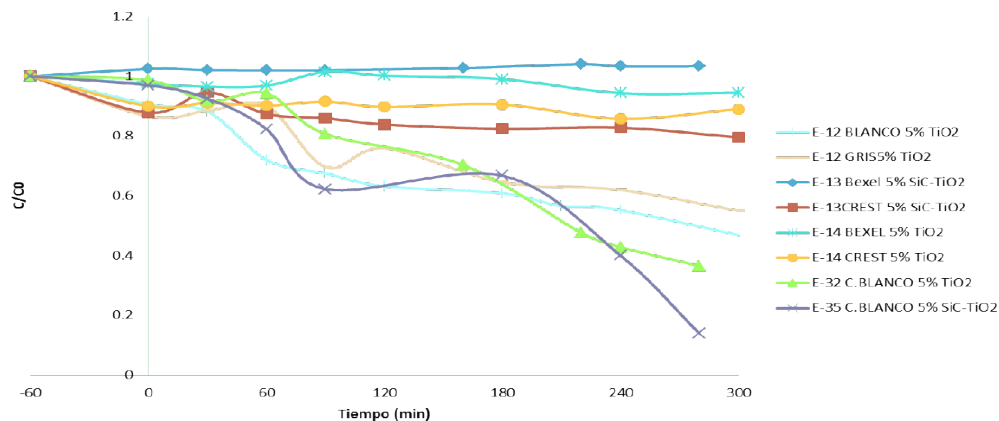


Figura 9. Degradación de IC en cementantes con fotocatalizador.

7. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que fue posible la elaboración de cementantes alternativos conteniendo ceniza volante y vidrio como sustituto parcial del cemento, los cuales presentaron resistencias mecánicas comparables a las de elementos estructurales donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo banquetas, blocks, morteros para recubrimiento, entre otras. Sin embargo, no podrían considerarse como elementos estructurales de alta resistencia, esto debido a que los alternativos presentaron parcialmente las fases principales del cemento. Asimismo, los resultados de las pruebas fotocatalíticas, tanto para la degradación de NO_x , como la degradación de colorantes en medio acuoso, corroboraron que la incorporación de TiO_2 y SiC-TiO_2 , permite la funcionalización de la gran mayoría de los materiales cementantes evaluados, mostrando actividad en la conversión de NO_x . En particular, el cementante Cemex blanco con 5 % de SiC-TiO_2 incorporado, presentó la mayor actividad (17 %). Mientras que en la degradación del colorante IC, se alcanzó hasta un 85 %, aunque en general todos los cementantes evaluados presentaron valores de degradación del colorante cercanos al 50 %, comparables a los reportados en bibliografía. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies autolimpiantes, y a la vez coadyuvar a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua.

8. Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (PAICYT IT1347-20), al CONACYT (PDCPN-2015-01-105, Fronteras de la Ciencias FC-1725, e infraestructura IT- 301307), a la SEP por el apoyo a través del proyecto P/PROFEXCE-2020-19MSU00, y por el apoyo al becario CVU 957479. A la Dra. Juana María Montoya y a la MC. Karen Reyna del laboratorio del CIIDIT-UANL, por el apoyo en las pruebas de degradación de NO_x , así como al Sr. Gumaro Tovar del laboratorio de Investigación en Materiales de Construcción (LIMC-FIC-UANL), por el apoyo en la elaboración de los morteros, y a todo el personal técnico del Departamento de Ecomateriales y Energía de la FIC-UANL, por el apoyo en los análisis de caracterización de DRX y SEM.

9. Referencias

- Ângelo, Joana, Andrade, et al. "An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement", *Environmental Management*, vol. 102, 2013, pp. 29-40.
- Caijun Shi *et al.*, "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 41, 2011, pp. 750-763.
- Gobierno del Estado de México, Normatividad en calidad de aire, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Yw>
- Guerrini. G.L. *al.*, "White cement and photocatalysis, Fundamentals". Arab International Conference and Exhibition on The Uses of White Cement, Vol. 1., 2008.
- International Standard ISO 22197-1 "Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials", First edition 2007-09-01
- Jani Yahya y William Hogland. "Waste glass in the production of cement and concrete" – A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, 2014. pp. 1767-1775.
- Juárez, I. *et al.*, "Short time deposition of TiO₂ nanoparticles on SiC as photocatalysts for the degradation of organic dyes", *Torres Research on Chemical Intermediates*, vol.39, 2013, pp.1523–1531.
- Lia, Y.L. M.Y. Hanb, et al., "Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multiscale, Perspective", *Building and Environment*, Volume 151, 2019, pp. 240-250.
- Luévano Hipólito, E. "Purificación de aire mediante oxidación fotocatalítica de gases contaminantes NO_x: estudio de los fotocatalizadores TiO₂ y ZnO". Nuevo León, Tesis Doctorado. FFIME-UANL, 2015.
- Luévano-Hipólito y A. Martínez. "Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real weatherism", *Construction and Building Materials*, vol. 174, 2018, pp. 302-309.
- Luévano-Hipólito E. y A. Martínez-de la Cruz. "Enhanced Photocatalytic Activity of TiO₂ Rutile by Coupling with Fly-Ashes for the Removal of NO Gases", *I&EC Research*, vol. 55, 2016, pp. 11512-11519.
- Luévano H. E. y Martínez de la Cruz, "Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real Weatherism", *Construction and Building Materials*, vol. 174, 2018, pp. 302-309.
- Ming-Zhi Guoa *et al.* "Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO₂ incorporated in cement-based materials", *Building and Environment*, vol. 144, 2018, pp. 412-418.
- Pierre P. "Binders for Durable and Sustainable Concrete", *modern concrete technology*, Taylor & Francis, Vol. 1, 2018.
- Sánchez Díaz, E. "Elaboración de materiales base cemento auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente", Nuevo León: Tesis Maest. FiC-UANL, 2013.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León", Pro Aire 2015-2025.
- Urbilla, C. *al.*, "Contaminación atmosférica, efectos en la salud respiratoria", *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol 28, 2017, pp. 111-118.
- Uzzal Hossain *al.*, "Global warming potential and energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong", *Building and Environment*, Volume 142, 2018, pp. 171-179
- Vazquez, M. "Empleo de la eucryptita (LiAlSiO₄) para el control de la expansión térmica de geopolímeros fabricados a partir de residuos vítreos y ceniza volante, para ser utilizados como soporte de películas de fotocatalizadores". Nuevo León: Tesis Maest. FiC-UANL, 2018.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



Yang Lu *et al.*, “Photocatalytic concrete for NO_x abatement: Supported TiO₂ efficiencies and impacts”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 116, 2018, pp. 57-64.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Síntesis de nanozeolita y su efecto como sustituto parcial del precursor de un geopolímero a base de metacaolín

M. López Morales, I. Flores-Vivián, G. Fajardo San Miguel

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: ismael.floresvn@uanl.edu.mx

Resumen

La nanozeolita tipo faujasita Y se sintetizó vía sol-gel a partir de hidróxido de sodio, silicato de sodio y aluminato de sodio. La zeolita fue utilizada como sustituto parcial del precursor para un geopolímero a base de metacaolín y se comparó con una zeolita natural tipo clinoptilolita. Se estudiaron los cambios a través del tiempo de los productos de reacción de policondensación mediante pruebas de resistencia a compresión y análisis microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) a edades de 3, 7 y 14 días. Se encontró que la incorporación de nanozeolita sintética ayudó a disminuir el período de estabilización de los productos de reacción, logrando un aumento de la resistencia en comparación con la pasta de referencia.

Palabras clave: Nanomateriales, nanozeolita, geopolímero base metacaolín, resistencia a compresión.

Abstract

Faujasite-type nanozeolite Y was synthesized via sol-gel from sodium hydroxide, sodium silicate and sodium aluminate. The zeolite was used as a partial substitute of the precursor for a geopolymer based on metakaolin and was compared with a natural zeolite type clinoptilolite. The changes through time of the polycondensation reaction products were studied by means of compression resistance tests and microstructural analysis by scanning electronic microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) at ages of 3, 7 and 14 days. It was found that the incorporation of synthetic nanozeolite helped to decrease the stabilization period of the reaction products, achieving an increase of resistance compared to the reference paste.

Keywords: Nanomaterials, nanozeolite, metakaoline-based geopolymer, resistance to compression

1. Introducción

El cemento portland (CP) es uno de los materiales de construcción más utilizados, el cual origina un alto grado de polución, debido a que la descarbonatación del CaCO_3 es intrínseca durante la fabricación del clínker. Aunado al consumo de combustibles, se ha estimado que 1 Ton de CP produce alrededor de 0.95 Ton de CO_2 , por lo cual se han buscado el uso de cementantes alternativos (Schneider *et al.*, 2011). Una de estas alternativas son los cementantes álcali-activados, los cuales han causado interés debido a su alta resistencia, durabilidad y bajo impacto ambiental. Se ha estimado que la sustitución del CP por cementantes álcali-activados pueden reducir las emisiones de CO_2 (Juenger *et al.*, 2011).

Los geopolímeros son cementantes álcali-activados los cuales se obtienen de la mezcla de un precursor sólido o fuente de aluminosilicatos, un activador alcalino (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, entre otros) y agua (Davidovits, 2013). Los productos de la reacción son geles de tipo R-A-S-H, ($\text{R} = \text{Na}^+$ o K^+) y que esencialmente consiste en una unidad repetitiva del monómero sialato (-Si-O-Al-O-) (Singh, Gupta, y Bhattacharyya, 2015). Para la fabricación de geopolímeros se pueden usar como precursores aluminosilicatos como metacaolín, escoria de alto horno, ceniza volante clase F, entre otros (Juenger *et al.*, 2011; Odler, 2000).

Las zeolitas son materiales de marco cristalino poroso de aluminosilicatos que se basan en una red tri-dimensional infinita de tetraedros de AlO_4 y SiO_4 unidos entre sí al compartir todos los oxígenos (Smith, 1984). Dados las fuertes similitudes entre la formación de geopolímeros y las síntesis de zeolitas, es posible que de la cristalización del gel de geopolímeros amorfos se obtengan zeolitas, habiéndose confirmado la presencia de faujasita en geopolímeros a base de metacaolín (Yun-Ming *et al.*, 2016; Palomo *et al.*, 1999). Por otro lado, diversos investigadores han encontrado que la incorporación de zeolitas en matrices geopoliméricas pueden ayudar a mejorar las propiedades como resistencia a la compresión cuando se agrega en bajas cantidades (Rozek, Król, y Mozgawa, 2019).

En este trabajo se investiga el efecto de la sustitución parcial del precursor por una nanozeolita en un cementante geopolímero a base metacaolín. El cementante fue modificado con nanopartículas de zeolita tipo faujasita Y, la cual fue sintetizada vía sol-gel, usando como precursores silicato de sodio, aluminato de sodio e hidróxido de sodio. Este trabajo se centra en estudiar los efectos de la adición de nanozeolita tipo faujasita Y en geopolímeros a base de metacaolín en el proceso de polimerización-condensación mediante pruebas mecánicas de compresión, micrografía MEB y análisis FT-IR.

2. Procedimiento

2.1 Materiales

Aluminato de sodio (NaAlO_2)

Para la síntesis de la zeolita se utilizó aluminato de sodio (NaAlO_2), proveniente de Sigma-Aldrich, con una composición de Al (Al_2O_3 50-56%) y Na (Na_2O 37-45%); con una densidad de 2.60 g/cm³.

Silicato de sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio fue obtenido de la empresa Silicatos Solubles de Monterrey S.A. de C.V. El material presentaba como características una composición de Na_2O al 8.9%, SiO_3 al 28.75%, relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3.23$ (grado N), porcentaje de sólidos del 37.65%, el H_2O al 62.37% y densidad de 1.39 g/cm³.

Hidróxido de sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio procede de la empresa ROT Química, S.A de C.V, en escamas con contenido de NaOH al 98.80%.

Metacaolín (MK)

Como precursor para el geopolímero se utilizó metacaolín Metaforce, elaborado por Grupo Cementos de Chihuahua S.A. de C.V. Con densidad de 2.55 g/cm³ y D₅₀ = 14.7 μm. La composición química del MK fue obtenida mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX). En la *Tabla 2.1*, se muestran los porcentajes de los componentes expresados como óxidos. Sus principales componentes son SiO₂ y Al₂O₃, presentes en proporción mayor al 90 %.

Zeolita natural (ZN)

La zeolita natural del tipo clinoptilolita fue obtenida de la mina San Francisco, ubicada en S. L. Potosí. El material fue sometido a molienda durante 120 minutos en molino de bolas con la finalidad de reducir su tamaño de partícula. Tras la molienda se obtuvo un D₅₀ = 30.4 μm. La composición química de la ZN fue obtenida mediante FRX. En la tabla 1, se muestran los porcentajes de los componentes expresados como óxidos.

2.2 Síntesis de nanozeolita

La síntesis de nanozeolita tipo faujasita Y (ZY) se llevó a cabo por el proceso sol-gel, mediante el método de *seeding*, el cual involucra tres pasos principales: *Seeding gel*, *Feedstock gel* y *Over all gel*.

Seeding gel

Este gel se preparó 24 horas previas a la preparación del siguiente paso, para permitir la formación de núcleos. Para la preparación del seeding gel se mezclaron en un vaso de precipitados de polipropileno: 1.05 g de aluminato de sodio, 2.04 g de hidróxido de sodio y 9.98 g de agua desionizada, agitando hasta disolver completamente a una velocidad de 1600 rpm, durante 5 minutos, con ayuda de una mezcladora de alto cizallamiento Silverson L4RT. Posteriormente, se agregaron 11.36 g de silicato de sodio y se continuó agitando constantemente hasta homogeneizar, durante 10 minutos.

Feedstock gel

Para la preparación del feedstock gel se mezclaron 6.55 g de aluminato de sodio, 0.07 g de hidróxido de sodio y 65.49 g de agua desionizada, en un vaso de precipitados de polipropileno, agitando hasta disolver a velocidad de 1600 rpm durante 10 minutos. Finalmente, se incorporaron 71.22 g de silicato de sodio sin dejar de agitar por otros 10 minutos, hasta obtener un gel suave.

Tabla 1. Composición química de los precursores.

Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O	MgO	K ₂ O	Otros
MK	78.9	17.0	-	0.2	0.9	0.1	0.2	2.8
ZN	86.6	6.2	2.936	1.458	-	0.214	1.591	0.923

Over all gel

Una vez obtenido el seed gel, se agregaron lentamente 8.25 g de éste al feedstock gel. Se agitó a 1600 rpm por al menos 20 minutos. Después de éste paso se procedió a la recuperación del producto.

2.3 Preparación del geopolímero y dosificación de los materiales

Se prepararon pastas de geopolímero base metacaolín (MK), con solución activadora alcalina constituida por una combinación de silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) con concentración 10M y agua destilada (H_2O). Se prepararon pastas con 0.1% de zeolita ZN y zeolita ZY en peso como remplazo del metacaolín, y pastas de referencia sin remplazo. Se realizó la dispersión las zeolitas en la mitad de agua de mezcla aplicando ultrasonido utilizando un desmembrador sónico marca Fisher Scientific, con frecuencia de 20KHz, por 20 minutos al 70 % de amplitud. Las pastas fueron colocadas en moldes cúbicos de 2.5x2.5x2.5 cm, se dejaron reposar 1 h a temperatura ambiente y posteriormente se sometieron a curado en mufla eléctrica a temperatura de 60 °C durante 22 h. La nomenclatura de las pastas y la dosificación de los materiales se despliegan en la tabla 2.

2.4 Resistencia a compresión

Los especímenes cúbicos fabricados fueron ensayados a compresión a las edades de 1, 3, 7, 28 y 90 días. Los ensayos se llevaron a cabo en una maquina universal INSTRON modelo 600 DX, a velocidad de aplicación de carga de 50 kg/s.

2.5 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

EL análisis FT-IR fue realizado en muestras en polvo en un espectrómetro FTIR Nicolet 380 con un dispositivo de reflexión total atenuada, en un rango del espectro electromagnético de 4000 a 400 cm^{-1} .

Tabla 2. Nomenclatura de las pastas y dosificación de materiales para a síntesis de geopolímeros.

Nomenclatura designada	MK (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)	H_2O (g)	ZN (g)	ZY (g)
REF	408.53	45.73	78.63	114.39		
GZN	408.12	45.73	78.63	114.39	0.41	
GZY	408.12	45.73	78.63	114.39		0.41

3. Resultados

3.1 Zeolita sintetizada (ZY)

Se sintetizó nanozeolita tipo faujasita Y (ZY) tal que se obtuviera un producto amorfo, lo cual se confirmó por medio de análisis por DRX, presentado en la figura 1. En el difractograma se puede apreciar una joroba o halo característico de los precursores amorfos de las zeolitas de tipo faujasita, la cual se encuentra centrada entre los ángulos 27° y 29° en 2θ (Provis, Lukey, & Deventer, 2005). La composición química de la zeolita ZY fue obtenida mediante FRX. En la tabla 3, se muestran los porcentajes de los componentes expresados como óxidos.

En la figura 2 se presenta una micrografía obtenida mediante el MEB de la zeolita ZY sintetizada, en la cual se puede observar la aglomeración de partículas de diferentes tamaños. Por otro lado, en la figura 3, se muestra la distribución de tamaño de partícula de ZN, la cual se obtuvo mediante dispersión de luz dinámica. En la figura se muestran dos picos principales donde el primer pico se encuentra centrado en 57 nm debido a las partículas individuales; mientras que el segundo pico centrado en 363 nm, es atribuido a partículas aglomeradas en el material.

3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia mecánica es un parámetro de especial interés cuando se habla de materiales de construcción, principalmente la resistencia a compresión. En la figura 4 se presenta la resistencia a la compresión a eda-

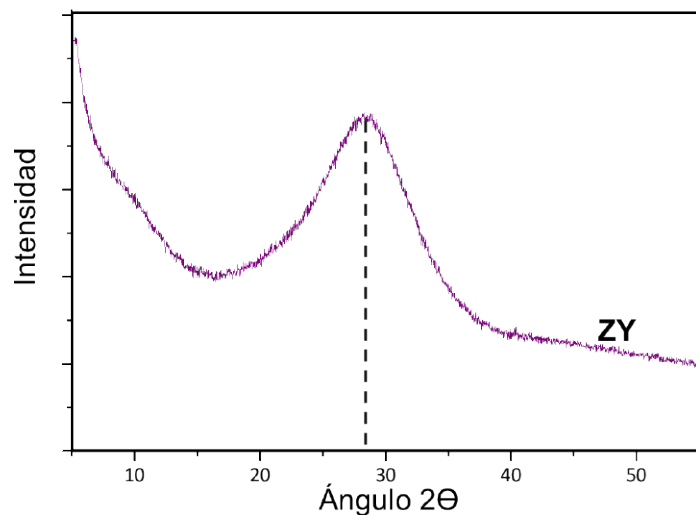


Figura 1. Difractograma de rayos X de la zeolita ZY.

Tabla 3. Composición química de la zeolita ZY.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O	CaO	Ag ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Otros
%	81.4	4.2	11.6	0.3	0.5	0.3	0.1	0.6	0.9

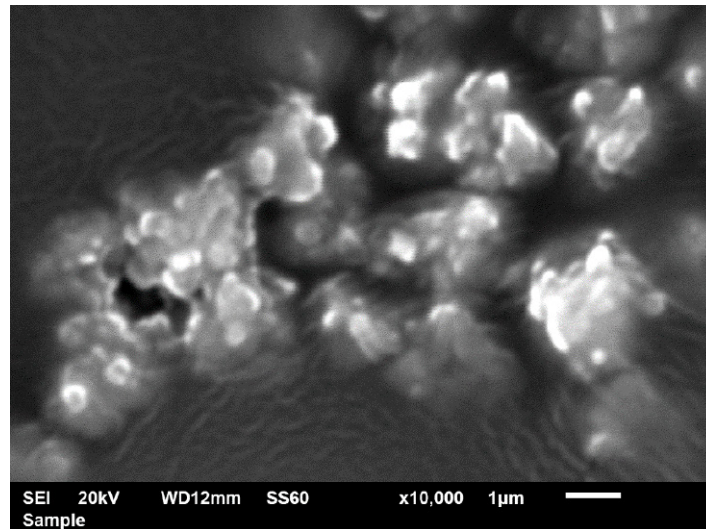


Figura 2. Micrografía MEB de la zeolita ZY.

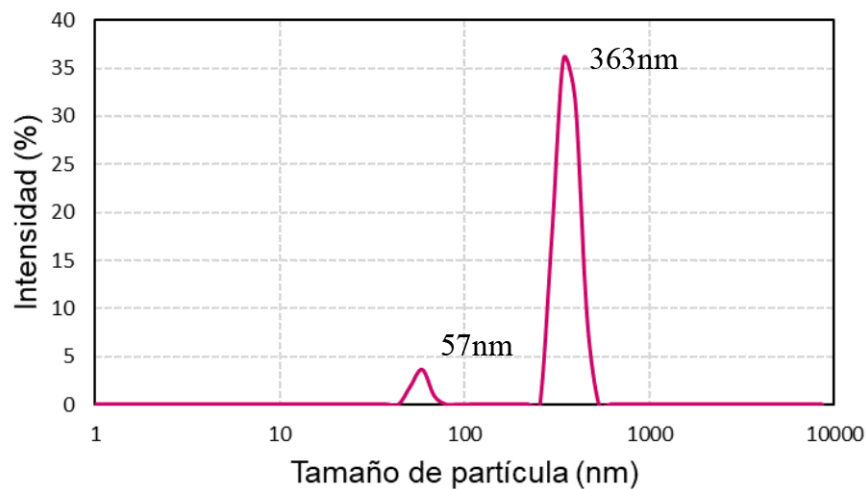


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de la zeolita ZY.

des tempranas de los tres sistemas geopolímeros presentados anteriormente. Los sistemas activados con hidróxido de sodio con una concentración de 10M y con una sustitución del MK en un 0.10 % por la zeolita sintética (GZY) y la zeolita natural (GZN) comparados con un sistema sin sustituciones (REF). A la edad de tres días GZY presenta una resistencia de 74.3 kg/cm², menor que los otros dos sistemas con 85.0 y 93.8 kg/cm² para REF y GZN, respectivamente. Sin embargo, a 7 días puede verse un decremento en REF con 63.5 kg/cm² y GZN tiene un pequeño incremento a 94.9 kg/cm², mientras que GZY incrementó su resistencia a 87.7 kg/cm². Además, el GZY continúa incrementando hasta 97.5 kg/cm² a los 14 días, mientras que a esta

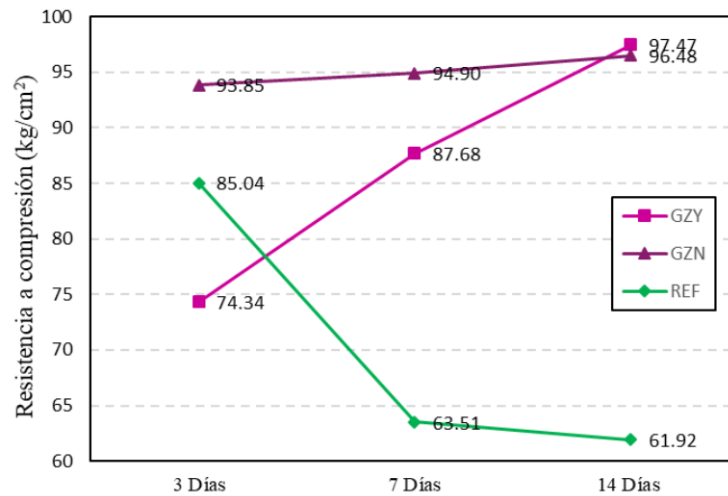


Figura 4. Resistencia a la compresión de geopolímeros base metacaolín activados con silicato de sodio e hidróxido de sodio 10M a edades de 3, 7 y 14 días.

edad GZN vuelve a incrementar su resistencia hasta 96.5 kg/cm² y REF continúa disminuyendo hasta 61.9 kg/cm².

Los geopolímeros tienden a desarrollar gran parte de su resistencia a compresión en los primeros días, la temperatura de curado ayuda a acelerar la disolución del precursor, dando lugar a la formación de una estructura rígida en las primeras fases de geopolimerización, puede ser debido a esto que a la edad de tres días los sistemas REF y GZN alcanzan una resistencia mayor (Al-shathr y Basil Salah, 2016). Por otro lado, la posterior disminución en la resistencia a la compresión puede ser atribuido al mecanismo de reacción de estos sistemas, donde se da una serie de reacciones simultáneas de polimerización-despolimerización de productos metaestables. Estos últimos tienden a estabilizarse al alcanzar una tasa de polimerización mayor que la de despolimerización, dando lugar a la formación y crecimiento de núcleos sobre los cuales se van condensando los geles (Rees *et al.*, 2008). La incorporación de la nanozeolita sintética en el geopolímero mostró un incremento de la resistencia a la compresión en el tiempo, comparable con estudios en los que se ha utilizado nanosílice y nanoalúmina en sistemas geopoliméricos. Los nanomateriales crean efectos de nucleación, disminuyendo el tiempo o periodo de inducción en el que los productos de reacción se estabilizan (Sumesh *et al.*, 2017 ; Rees *et al.*, 2008). Puede considerarse que la resistencia a compresión puede ser incrementada debido al aumento de contactos entre la zeolita y la fase amorfa (Álvarez-Ayuso *et al.*, 2008).

Por otro lado, valores de resistencia a compresión cercanos a los obtenidos se han reportado por De Rossi *et al.* (2019), en un sistema híbrido metacaolín-ceniza volante, usando como activador alcalino una combinación de Na₂SiO₃ y NaOH en concentración 10M, reporta una resistencia de 10.0 MPa (102.0 kg/cm²), con una ligera disminución de la resistencia a 9.8 MPa (99.7 kg/cm²), tras la formación de zeolita tipo P en la matriz (Rossi *et al.*, 2019). Mientras tanto, Zhang *et al.* (2014) reportan la formación de faujasita dentro de una matriz geopolimérica base metacaolín activado con Na₂SiO₃ resultó en el incremento de la resistencia a compresión de 16.3 MPa (166 kg/cm²) a 19.6 MPa (199 kg/cm²). En el presente caso, puede decirse que la incorporación de las zeolitas ZY y ZN también mostró favorecedora para la resistencia a compresión, mostrando GZY y GZN una resistencia alrededor de 14 % mayor a la máxima registrada por REF, aunado a esto,

GZY no sólo alcanza una resistencia mayor que la referencia, sino que evitó el decremento de resistencia a la edad de 7 días, en concordancia con lo reportado por los autores mencionados.

3.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

La técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) puede ayudarnos en la caracterización de grupos funcionales de geopolímeros y también puede usarse para proporcionar información sobre la transición de las vibraciones debido a pequeños cambios estructurales, por lo tanto, puede darnos información acerca del proceso de polimerización. La espectroscopia FT-IR fue utilizada para caracterizar los precursores, y para monitorear la evolución en el comportamiento de las pastas activadas, así como los efectos de las zeolitas adicionadas.

Los espectros FT-IR de las pastas REF, GZN y GZY a edades de 3, 7 y 14 días se muestran en la figura 5. En estos se puede observar la presencia de la banda de absorción ubicada en 1400 cm^{-1} , la cual se atribuye al Na_2CO_3 , producto debido a la carbonatación del sodio, proveniente principalmente del activador alcalino, al reaccionar con el CO_2 de la atmosfera (Belmokhtar *et al.*, 2017 ; Villa *et al.*, 2010).

La banda ubicada en 1108 cm^{-1} en el MK, es atribuida al estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O-Si, el desplazamiento de esta banda a frecuencias menores indica la disolución de éstos enlaces y la formación de nuevas fases ricas en aluminio (Belmokhtar *et al.*, 2017). Este desplazamiento se evidencia al comparar la posición de la banda inicial en el precursor (MK) contra la posición de las pastas tras la activación, 970 cm^{-1} , 973 cm^{-1} , 976 cm^{-1} en GZN, REF y GZY, respectivamente, a la edad de 3 días. Estos pequeños cambios, aunados a la variación de en la intensidad de los picos nos dan un indicio del avance del proceso de

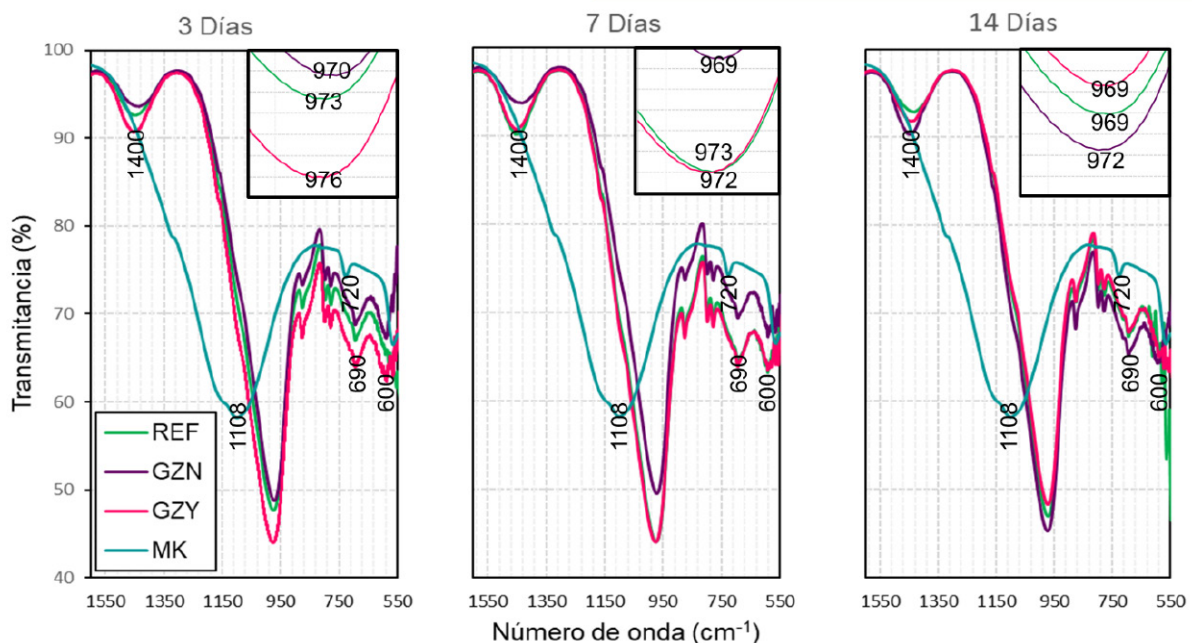


Figura 5. Espectros FT-IR de MK VS pasta de referencia (REF) y pastas adicionadas con ZN (GZN), zeolita ZY (GZY).

policondensación (Ming *et al.*, 2016). Álvarez-Ayuso *et al.* (2008), asocian la disminución de la intensidad de los picos en transmitancia en esta banda de absorción al incremento en la longitud de las cadenas de polímeros de aluminosilicato, lo cual coincidía con un mayor desempeño en la resistencia a compresión en geopolímeros con un contenido menor al 5% de zeolita tipo X.

En el presente caso, el desplazamiento a frecuencias menores de GZY, que pasa a 972 cm^{-1} a 7 días y posteriormente a 969 cm^{-1} a 14 días manteniéndose en el tiempo y la disminución del porcentaje de transmitancia, concuerda con el incremento constante de la resistencia a compresión. En el caso de REF se observa a 7 días que esta banda de absorción se mantiene centrada en 973 cm^{-1} pero con un decremento en la intensidad del pico y disminuye a la frecuencia de 969 cm^{-1} a 14 días. Por otro lado, GZN pasa a 969 cm^{-1} a 7 días y luego a 972 cm^{-1} a 14 días disminuyendo el porcentaje de transmitancia, siendo signo de que, como se mencionó anteriormente, los sistemas aún no llegan a una estabilización en la formación de productos de reacción. Este comportamiento ha sido verificado en trabajos anteriores, en donde se encontró a edades de 3 y 7 días sistemas geopoliméricos base metacaolín con contenido de ZY y ZN mostraron un mayor corrimiento de esta banda a números de onda menores que los del sistema de referencia (Lopez, 2019).

Por otro lado, la banda cercana a los 720 cm^{-1} que se encuentra en el MK se atribuye al estiramiento de los grupos Si-O-Si/Si-O-Al, al interactuar con el activador alcalino se ve desplazada a 690 cm^{-1} y con menor porcentaje de transmitancia en las pastas. La banda de 600 cm^{-1} , es asignada al estiramiento simétrico de los tetraedros internos de SiO_4 y AlO_4 que forman la estructura del geopolímero. Esta banda de absorción aparece en los espectros de GZN y GZY, a la edad de 3 días, y que posteriormente, a edad de 7 días se aprecia también en REF, indicando un avance más lento de la polimerización en la pasta sin sustitución de zeolitas (Ahmedzeki *et al.*, 2016) (Yun-Ming *et al.*, 2016).

3. 4 Microscopía electrónica de barrido/ Espectroscopia de dispersión de rayos X

Se utilizó MEB/EDX para comparar la microestructura de las pastas y comparar los efectos de la adición de zeolitas en la matriz geopolimérica. En la figura 6 se muestran las microfotografías obtenidas de las pastas REF, GZN y GZY a las edades de 3 y 14 días, en la que se pueden observar los productos de reacción, los cuales fueron identificados mediante un análisis puntual EDX, ya que no presentan una morfología definida.

Durante la geopolimerización se puede dar la formación de dímeros, trímeros, tetrámeros, hasta llegar a la precipitación de un gel de aluminosilicatos, sin embargo, este proceso no tiene un comportamiento lineal, por lo que las diferentes especies coexisten dentro de la matriz (Provis & Deventer, 2009). En la figura 6 puede observarse la formación de geles tipo N-A-S-H, en los que la relación Si/Al puede ser un indicador de su estructura polimérica, pudiendo ser Poli (sialato) Si/Al=1, Poli (Sialato-siloxo) Si/Al=2 y Poli (Sialato-disiloxo) Si/Al=3 (Yun-Ming *et al.*, 2016). A pesar de que el sistema tiene un bajo contenido de calcio, también se encontraron productos de tipo C-A-S-H (Figura 3.4.1, B y F), también se confirmó la formación de Na_2CO_3 (figura 6 C y E), coincidiendo el análisis FT-IR.

Por otro lado, es conocido que el grado de porosidad y densificación de la matriz cementante tiene una gran influencia en su comportamiento mecánico, es decir, una matriz muy porosa presentará una resistencia a compresión baja (Alomayri, 2019). En la imagen puede observarse como las partículas pequeñas y cúmulos parecidos a nubes van precipitándose sobre los núcleos y creciendo en tamaño hasta formar un sólido compacto. Al realizar la comparación entre la pasta REF a la edad de 3 y 14 días (Figura 3.4.1, A y B, respectivamente) se puede ver que a la edad de 3 días se presenta una distribución más uniforme y compacta de los productos, mientras que a 14 días se percibe mayor porosidad, lo cual es consistente con lo encontrado en los ensayos de resistencia a compresión, en los que se obtuvo una resistencia a la compresión mucho

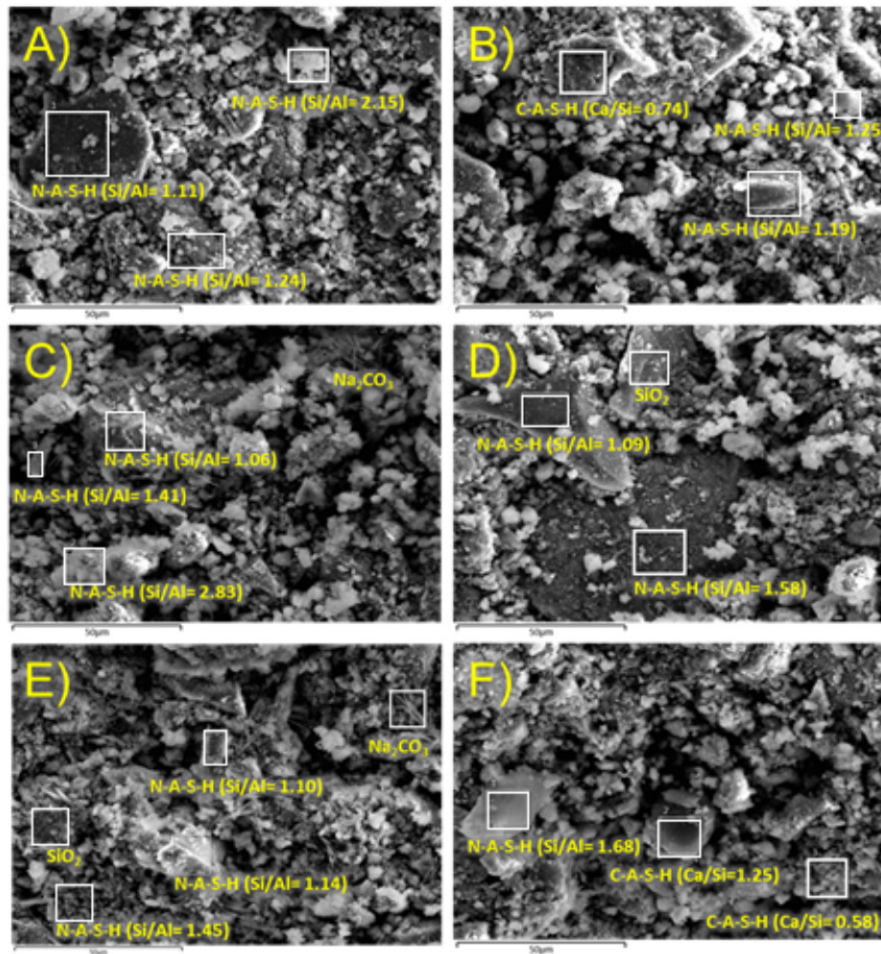


Figura 6. Microscopía MEB de las pastas A) REF (3 días), B) REF (14 días), C) GZN (3 días), D) GZN (14 Días), E) GZY (3 días) y F) GZY (14 días).

menor a los 14 días. En GZN puede verse que a la edad de 3 y 14 días (figura 6 C y D, respectivamente) se presenta un comportamiento análogo, observándose una matriz más densificada a los 14 días, concordando de igual forma con su comportamiento mecánico. Por otro lado, en GZY se muestra un grado de densificación similar en las dos edades, mostrando un crecimiento de las partículas de los geles a la edad de 14 días (figura 6 C y D, respectivamente).

4. Conclusiones

En este trabajo se ha investigado desde dos enfoques, la evaluación de la idoneidad del geopolímero a base metacaolín como alternativa al CP en materiales de construcción desde un punto de vista físico, evaluando su estabilidad estructural mediante pruebas mecánicas, y desde un punto de vista químico mediante FT-IR y MEB para comprender mejor la cinética en el proceso de geopolymerización. Mediante los resultados obtenidos se puede relacionar el comportamiento mecánico de los geopolímeros con los procesos químicos que

ocurren en la matriz, pudiendo observar, como se mencionó anteriormente, que los cambios en las posiciones e intensidad de las bandas de absorción corresponden a los procesos de polimerización y despolimerización y que tienen un efecto directo en el comportamiento mecánico y microestructura. Se pudo observar que la incorporación de nanozeolita sintética ayudó a disminuir el período de estabilización de los productos de reacción, logrando un aumento de la resistencia en la edad de 7 días en la cual los sistemas con sustitución de zeolita natural y sin sustituciones sufren un decremento en su resistencia.

De lo anterior, un material cuya química no es estable deriva en un material poco estable estructuralmente, tal es el caso de REF y GZN, cuya resistencia mecánica presentó fluctuaciones que no son deseables en un material de construcción. Un estudio del material a edades más avanzadas nos permitiría conocer mejor su comportamiento para determinar su idoneidad para su colocación y uso. Por otro lado, GZY mostró un comportamiento más estable y una tendencia a incrementar la resistencia, estos resultados obtenidos nos indican que este tipo de material sí podría ser usado como material de construcción, sin embargo, su uso podría estar, orientado, por ejemplo, a piezas de mampostería como bloques y tabiques.

5. Agradecimientos

Se agradece al personal del LIMC de la Facultad de Ingeniería Civil-UANL por la prestación de sus servicios. A CONACYT por el apoyo económico de beca durante el periodo y al proyecto de CONACYT con CLAVE: CB 2017-2018 / A1-S-24552. A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo mediante el proyecto PAICYT 2020 con CLAVE: IT1348-20.

6. Referencias

- Ahmedzeki, N. S., Yilmaz, S., & Al-Tabbakh, B. A. (2016). Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Zeolite Y. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12(1), 79- 89.
- Alomayri, T. (2019). Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material (Al₂O₃). *Journal of Building Engineering*, 25.
- Al-shathr, & Basil Salah, T. S.-a. (2016). Effect of curing system on metakaolin based geopolymer concrete. *Journal of Unioversity of Babylon- Engineering Sciences*, 24(3), 569-576.
- Álvarez-Ayuso, E. A., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Morena, N., & Izquierdo, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*(154), 175–183.
- Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J., & Allal, L. B. (2017). Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from metakaolin and an industrial sludge. *Construction and Building Materials*, 146, 621–629.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement, a review. *Institut Géopolymère*.
- Juenger, M., Winnefeld, F., Provis, J., & Ideker, J. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 1232–1243.
- Lopez, M., Vergara, L., Flores, I., & Fajardo, G. (2019). Efecto de Nanozeolita Sintetizada en un Geopolímero a Base de Metacaolín. *CONPAT 2019*. Tuxtla Gutierrez, Chiapas.: ALCONPAT. Obtenido de <https://congreso-conpat.org/index.php/conpat2019/conpat2019/paper/view/299/31>
- Ming, L. Y., Yong, H. C., Bakri, M. M., & Hussin, K. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in materials science*, 595–629.
- Odlar, I. (2000). *SPECIAL INORGANIC CEMENTS*. London and New York: E & FN Spon.

- Olivier, J. G., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J. A. (2016). *Trends in global CO2 emissions: 2016 Report*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Palomo, A., Blanco-Varela, M., Granizo, M., Puertasa, F., Vazquez, T., & Grutzeck, M. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and concrete research*, 29 (997–1004), 29 (1999) 997–1004.
- Provis, J. L., & Deventer, J. S. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.
- Provis, J. L., Lukey, G. C., & Deventer, J. S. (2005). Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chem. Mater.*, 3075-3085.
- Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Deventer, J. S. (2008). The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*(318), 97–105.
- Rossi, A. D., Simão, L., Ribeiro, M., Novais, R., Labrincha, J., Hotza, D., & Moreira, R. (2019). In-situ synthesis of zeolites by geopolymerization of biomass fly ash and. *Materials letters*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.016>
- Rozek, P., Król, M., & Mozgawa, W. (2019). Geopolymer-zeolite composites: A review. *Journal of cleaner production* (2030), 557-579.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement- present and future. *Cement and concrete research*, 642–650.
- Singh, B., G., I., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 78–90.
- Smith, J. V. (1984). Definition of a zeolite. *Zeolites*, 4(4), 309-310.
- Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., & Alnahhal, M. F. (2017). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review. *Construction and Building Materials*, 148, 62–84.
- Villa, C., Pecina, E., Torres, R., & Gómez, L. (2010). Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials* , 24, 2084–2090.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M., & Hussin, K. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review. *Progress in Materials Science*, 595–629.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M., & Hussin, K. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review. *Progress in Materials Science*, 595–629.
- Zhang, J., YanHe, Yi-pinWang, JinMao, & Xue-minCui. (2014). Synthesis of a self-supporting faujasite zeolite membra neusing geopolymer gel for separation of alcohol/water mixture. *Materials Letters*(116), 167-170.



UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Tratamientos superficiales con nanomateriales para la conservación de mampostería de arcilla cocida: Evaluación *in-situ* y en laboratorio

M. Neri-Álvarez, G. Fajardo-San Miguel, D. Cruz-Moreno

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx

Resumen

La acción combinada de agentes biológicos, físicos y químicos promueve la descomposición de la mampostería ornamental, como las tejas de arcilla cocida, por lo que el desarrollo de tratamientos protectores se ha convertido en un tema de interés. En este trabajo se aplicaron y evaluaron cinco tratamientos superficiales, dos sintetizados en laboratorio con nanopartículas funcionalizadas a base de silicio, dos tratamientos comerciales y un producto compuesto de 90 % de siloxanos. La dosis de nanopartículas funcionalizadas fue del 0.1 % en relación con el volumen de agua. Las muestras se expusieron a una degradación acelerada en una cámara UV por 2000h y durante un período de dos años en exposición natural en ambiente urbano industrial. Los productos sintetizados aportan propiedades hidrofóbicas, una protección a largo plazo y no cambian significativamente la apariencia del material.

Palabras clave: Nano-silíce; hidrofóbico; tejas.

Abstract

The combined action of biological, physical and chemical agents promotes the decomposition of ornamental masonry, such as fired clay tiles, which is why the development of protective treatments becomes a topic of interest. In this document, five surface treatments were applied and evaluated, two synthesized in the laboratory with functionalized silicon-based nanoparticles, two commercial treatments and a product composed of 90% siloxanes. The dosage of functionalized nanoparticles was 0.1% in relation to the volume of water. The samples were exposed to accelerated weathering in a UV chamber for 2000h and a period of two years in natural exposure in an industrial urban environment. The synthesized products

provide hydrophobic properties, long-term protection and do not significantly change the appearance of the material.

Keywords: Nano-silica; hydrophobic; roof tiles.

Resumo

A ação combinada de agentes biológicos, físicos e químicos favorece a decomposição de alvenarias ornamentais, como as telhas de barro cozido, por isso o desenvolvimento de tratamentos protetores passa a ser um tema de interesse. Neste trabalho foram aplicados e avaliados cinco tratamentos de superfície, dois sintetizados em laboratório com nanopartículas funcionalizadas à base de silício, dois tratamentos comerciais e um produto composto por 90% de siloxanos. A dosagem de nanopartículas funcionalizadas foi de 0,1% em relação ao volume de água. As amostras apresentaram degradação acelerada em câmara ultravioleta por 2.000 h e duraram um período de dois anos em exposição natural em ambiente urbano industrial. Os produtos sintetizados fornecem propriedades hidrofóbicas, proteção de longo prazo e não alteram significativamente a aparência do material.

Palavras-chave: Nano-sílica; hidrofóbico; telhas.

1. Introducción

El uso de mampostería de arcilla cocida es muy común pero poco estudiada. Tan solo en Francia 74% (FFTb, 2015) están cubiertas ellas, en Italia más del 90% de los edificios históricos tienen tejas de arcilla cocida (Pisello, 2015; Hamari *et al.*, 2019). Los edificios con tejas de arcilla cocida abundan ampliamente en el mundo, en Asia se encuentran edificaciones históricas con techos de arcilla (Liu *et al.*, 2020) como lo es la Ciudad Prohibida en Beijing, incluso cuarenta y seis viviendas típicas de Fujian Tulou se agregaron a la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO (UNESCO, 2008). Las tejas son vulnerables al deterioro, ya que está en constantemente en exposición a los agentes biológicos, físicos y químicos presentes en el medio ambiente (Tatis *et al.*, 2012). Además, existe un efecto sinérgico entre estos agentes de deterioro (Liu *et al.*, 2020), ya que la acción combinada promueve la descomposición de la mampostería ornamental, tanto en la superficie como en su matriz (Tatis *et al.*, 2012). Por otra parte, los agentes de desintegración pueden provocar alteraciones estéticas evidentes, esto debido a la deposición de contaminantes atmosféricos (como hollín, partículas de suciedad, excremento de aves, por mencionar algunos) y el manchado con organismos ricos en pigmentos, tales como moho, hongos algas y líquenes (Hosseini *et al.*, 2018). La composición química y las características físicas de las superficies de las tejas de arcilla cambian con el tiempo de exposición al clima, favoreciendo las condiciones ideales para la deposición de estos compuestos.

El agua es el principal factor de degradación en la mampostería ornamental ya que sirve como medio de transporte para estos agentes perjudiciales. El daño efectuado por los factores previamente mencionados conlleva altos costos de mantenimiento y restauración. La “ley de evolución de costos” (Chen *et al.*, 2019), declara que postergar una intervención significa aumentar los costos directos en progresión geométrica de razón cinco; si el costo de mantenimiento preventivo es de 5, el costo de reparaciones será de 25. En otros términos, si el costo de mantenimiento preventivo es cinco, el costo de reparaciones (mantenimiento correctivo), sin haber realizado mantenimiento preventivo correspondiente, será de veinticinco (De Sitter, 1984).

Debido a la demanda de tratamientos preventivos, se han desarrollado diversas soluciones en respuesta a esta problemática. La aplicación de productos obtenidos por una ruta sol-gel basados en SiO₂ es un área de estudio ampliamente conocida, sin embargo, debe ser examinada más a fondo ya que los tratamientos actuales no presentan un desempeño integral (Li *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018). Estos tra-

tamientos son ampliamente utilizados debido a su fácil aplicación y obtención, reducen significativamente su tasa de absorción, algunos tienen bajo impacto en su estética. La mayoría de ellos carecen de estudios de durabilidad a la intemperie a largo plazo (Borsoi *et al.*, 2020). Por estas razones se busca un tratamiento que incorpore todas estas variables. Diversos autores han mostrado resultados prometedores con estas nanopartículas, sin embargo, cuando se obtienen superficies superhidrofóbicas, las concentraciones de nanopartículas llegan a ser altas, y, además, se obtienen cambios de color significativos. Estos tratamientos pueden ser usados solamente en superficies donde no sea importante el cambio de aspecto.

Por otra parte, se estima que para el año 2050, los efectos del cambio climático en todo el mundo causarán condiciones extremas para el entorno construido, particularmente se verán más afectadas las construcciones históricas (Graus, *et al.*, 2019). Este proyecto se presenta como una iniciativa para la aplicación, prevención y conservación de mampostería y su futuro enfoque dirigido hacia el patrimonio de interés histórico.

2. Procedimiento Experimental

2.1 Materiales

2.1.2 Síntesis y funcionalización de las nanopartículas base silicio.

Para la obtención de nanopartículas funcionalizadas deshidratadas (NFA) y nanopartículas funcionalizadas básicas (NFB), se siguió la ruta de sol-gel empleando el procedimiento descrito en un trabajo previo (Cruz-Moreno, 2020). Cabe destacar, que ambas nanopartículas son producidas por el mismo proceso. Sin embargo, para la reducción de grupos O-H generados en la NFA se empleó ácido nítrico deshidratante, mejorando con ello, el efecto hidrofóbico.

2.1.3 Tratamientos superficiales utilizados

Para la experimentación se utilizaron 6 tratamientos, los cuales 2 son comerciales y una muestra de referencia o control sin tratamiento. En la tabla 1 se describen las características de uno:

2.1.4 Aplicación de los tratamientos y obtención de los especímenes

Se utilizaron tejas de fabricación industrial, portuguesa color rojo 41 x 25 cm de arcilla cocida como sustrato. Las tejas después fueron cortadas en secciones de 4 x 4cm, donde se delimitó un área de estudio de 2.7 x 2.7 cm, sellando el resto de la superficie de la teja como se muestra en la figura 1. La aplicación de los productos en las muestras de arcilla se realizó con una brocha de espuma de poliuretano, en dos capas siguiendo las fichas técnicas de cada producto comercial. Se limpió previamente la superficie del material con agua y un cepillo de cerdas duras. Los recubrimientos sintetizados en laboratorio se aplicaron con un intervalo de 30 min entre cada capa.

2.2 Intemperismo y caracterización de especímenes

2.2.1 Condiciones de exposición

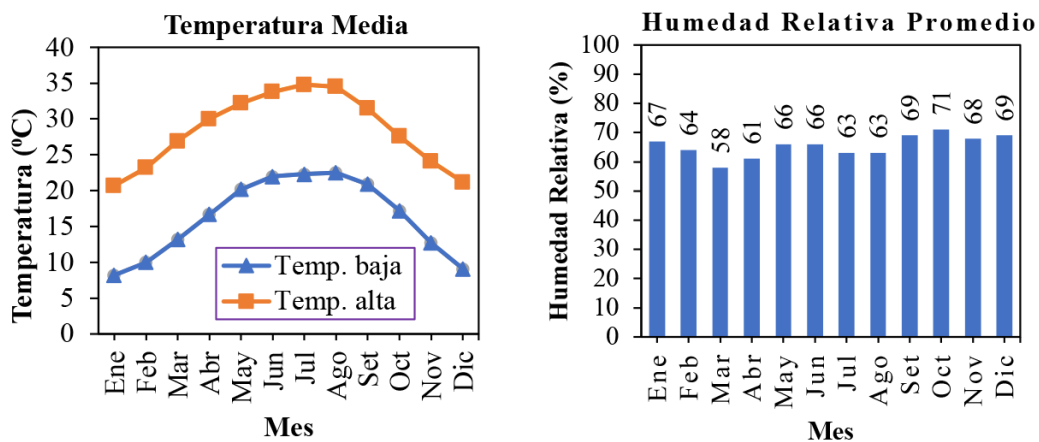
Las muestras tratadas fueron expuestas al clima de la zona metropolitana de Monterrey N.L., México. La inclinación de las tejas fue de aproximadamente 35°, representativa de la inclinación comúnmente usada en la colocación de las tejas en los techos apuntando al sur según lo establecido en la norma ASTM G7. De acuerdo con Köppen y Geiger dicho clima se clasifica como BSh; semiárido cálido. En las figuras 2 y 3 se muestran los promedios de las condiciones a las que fueron expuestas las tejas.

Tabla 1. Tratamientos utilizados en tejas.

Tratamiento	Abreviación	Descripción
1	REF	Referencia o sección sin tratamiento.
2	CA	Impermeabilizante incoloro a base de resina de silicona vehiculizada en solvente, que ofrece protección hidrófuga contra la penetración de agua de lluvia a fachadas o estructuras porosas expuestas a la intemperie, sin cambiar el aspecto original de las superficies.
3	CB	Repelente al agua, protege hasta varios milímetros de profundidad, elaborado del silicón y aditivos. Protege del agua a muros de concreto prefabricado, piedra, recubiertos con texturizado o estuco. Ideal para materiales pétreos como cantera, granito, terrazo, barro, mármol no pulido, etc.
4	SX	Recubrimiento no comercial de 90% siloxanos, crea una capa superhidrofóbica.
5	NFB	Nanopartículas base silicio funcionalizadas sintetizadas en laboratorio, protege el material dándole propiedades superhidrofóbicas.
6	NFA	Nanopartículas base silicio funcionalizadas deshidratadas sintetizadas en laboratorio, protege el material dándole propiedades superhidrofóbicas.



Figura 1. Obtención de los especímenes.



Figuras 2. Promedios de temperatura, humedad relativa del clima de exposición..

De igual manera, la evaluación de durabilidad se realizó por medio de la cámara de envejecimiento acelerado QUV Accelerated Weathering Tester, cumpliendo con la norma ASTM G151 y G154 utilizando el ciclo 6 cuyas condiciones se muestran en la tabla 2.

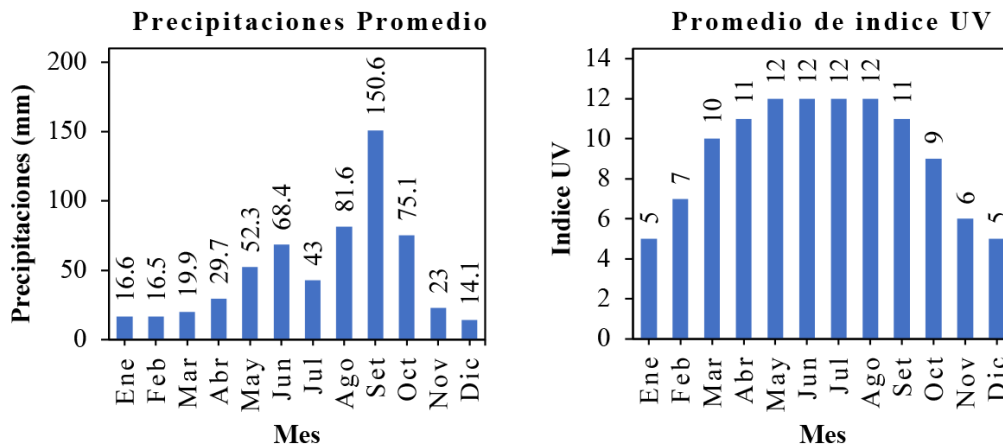
El equipo cuenta con lámparas UVA-340 y se expusieron por 2000 horas, dándoles seguimiento cada 500 horas.

2.2.2 Apariencia óptica según estándares colorimétricos

La evaluación de la apariencia óptica (definida aquí como la diferencia de color total) fue realizada utilizando un equipo Datacolor CHECK, siguiendo el procedimiento e interpretación de resultados según el manual y de acuerdo a la norma ASTM D2244:2016. Se usó la escala CIE L * a * b *, donde mediciones colorimétricas son realizadas de forma comparativa, en muestras tratadas y no tratadas. La diferencia de color (ΔE^*) se determinó con la ecuación 1.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

Donde L*,a*,y b* son las coordenadas estándares de la escala CIELab color space 1976.



Figuras 3. Promedios de precipitación y radiación UV del clima de exposición..

Tabla 2. Condiciones del ciclo 6 de intemperismo acelerado al que se expusieron las tejas.

	Función	Irradiancia (W/m ²)	Temp. (°C)	Tiempo (h:min)
1	UV	1.55	60	08:00
2	Condensación	N/A	50	04:00

2.2.3 Medidas de la hidrofobicidad

Para evaluar el comportamiento de la hidrofobicidad en las superficies de las tejas se usó un sistema de análisis de gota consistente en un equipo D5425 Expert Kruss y agua destilada, siguiendo la norma ASTM D7334 - 08 para la medición del ángulo de contacto. La obtención del ángulo de contacto se llevó a cabo en la superficie de las muestras depositando un volumen de gota de 6 μL y en condiciones de 23 ± 2 °C y con una HR ≥ 50 %. Se realizaron dos mediciones de ángulo (una en cada punto de caída) de cada una de las tres gotas que fueron depositadas sobre la muestra. En los ángulos de contacto con mediciones significativamente diferentes en dos bordes, se eliminaron y la prueba se repitió en dichos casos. El ángulo de contacto para el espécimen fue el promedio de los tres valores medidos.

2.2.4 Caracterización FT-IR

Se determinaron los grupos funcionales presentes en la superficie de las tejas para identificar si los recubrimientos aun contaban con los grupos funcionales responsables de la hidrofobicidad. La evaluación se llevó a cabo en un equipo Thermo Electron Nicolet 380, con un rango de frecuencia de 500 – 4000 cm^{-1} . Para esto se raspó la parte tratada de la teja y se secaron los polvos recolectados a 60 °C por 24 horas.

2.2.5 Sortividad

La tasa de absorción de agua se determinó de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C 1585. Las muestras de 40 mm \times 40 mm \times 10 mm sellaron con impermeabilizante y sello dejando un área de estudio de 27mm x 27mm. Se colocaron 3 especímenes de cada tratamiento en la cámara ambiental a una temperatura de 50 ± 2 °C y HR de 80 ± 3 % durante 3 días para después colocarlas en un recipiente durante 15 días y así redistribuir la humedad. Para cada muestra, una superficie estaba en contacto con agua en una bandeja poco profunda. La absorción de agua a través de la superficie del fondo fue medida indirectamente mediante el aumento de masa de las muestras. Para determinar la tasa de absorción se utilizaron las ecuaciones siguientes:

Absorción Inicial:

$$I = S_i = t + b \text{ (se utilizan puntos medidos hasta 6 h)} \quad r = 0.98 \quad (2)$$

Absorción Secundaria:

$$I = S_s = t + b \text{ (se utilizan los puntos medidos después del primer día)} \quad r = 0.98 \quad (3)$$

3. Resultados y Discusión

3.1 Apariencia óptica según estándares colorimétricos

En la figura 6, se presentan los resultados obtenidos de colorimetría en especímenes de tejas expuestos a la intemperie durante un periodo de 24 meses y a un medio acelerado durante 2000 horas. Tomando en cuenta que para un tratamiento superficial ideal no debe tener ningún efecto significativo sobre la apariencia estética de la superficie. Para ello, las mediciones colorimétricas realizadas para evaluar las diferencias de color () de las superficies debido al tratamiento, se muestran en la figura 4.

La diferencia de color (ΔE^*) fue mayor en el tratamiento SX en comparación a los demás tratamientos. Se comprueba con su bajo valor en la coordenada ΔL^* del sustrato investigado. También comprobó visualmente ya que la teja presentó un oscurecimiento de su superficie. Los tratamientos NF sintetizados obtuvieron

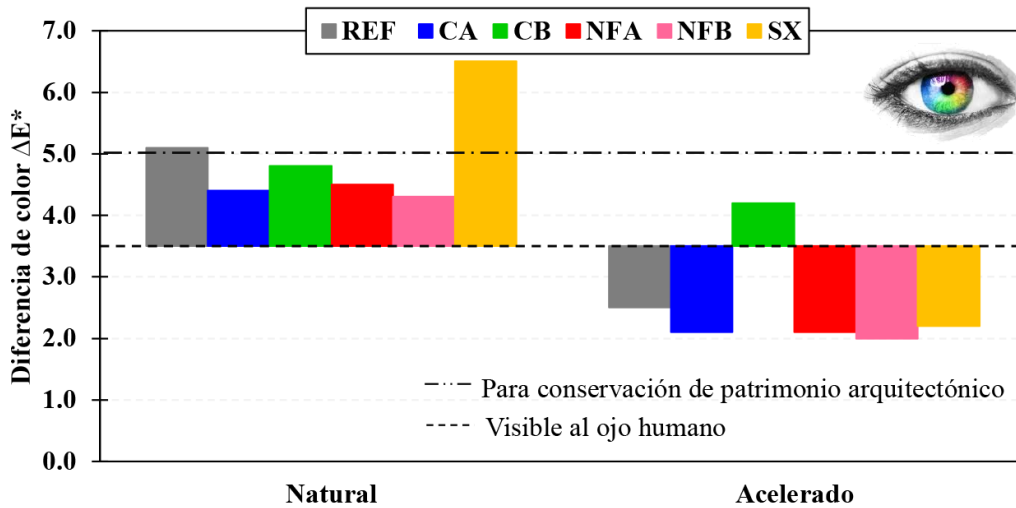


Figura 4. Resultados de colorimetría obtenidos a 24 meses de exposición al medio ambiente y 2000 h de exposición a un ambiente acelerado.

un cambio de coloración mínimo, se presentó un ligero blanqueamiento lo cual se comprueba con los valores positivos para ΔL^* . Se observa un mayor cambio de color en las tejas expuestas en el ambiente natural debido a los diversos contaminantes que se encuentran en el ambiente. Cabe mencionar que la diferencia de color (ΔE^*) entre 2 y 3.5 es la que comúnmente percibe por el ojo humano (Tennent and Townsend, 1984b). Por consiguiente, estos cambios podrían ser aceptables para estos tipos de materiales de la construcción, ya que un $\Delta E^* > 5$ es el aceptable para edificaciones de interés histórico (García *et al.*, 2012).

3.2 Comportamiento de la hidrofobicidad

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la medición del ángulo de contacto en los especímenes de teja. Para ello, se seleccionó una serie de especímenes los cuales fueron colocados a la intemperie en un ambiente natural urbano-industrial durante un periodo de 24 meses. Para determinar el efecto que ejerce la interacción del tratamiento superficial con el medio de exposición, otra serie de especímenes con las mismas condiciones iniciales fueron colocados en un medio acelerado durante 2000 horas en condiciones controladas. Por otra parte, en la figura 5, se empleó una línea punteada como una delimitación para establecer el límite entre una superficie hidrofílica (Superficie con ángulo $< 90^\circ$) e hidrofóbica (Superficie con ángulo $\geq 90^\circ$).

Como se puede constatar en la figura 5, el ángulo de contacto disminuyó sensiblemente en los tratamientos comerciales comparados con los tratamientos en donde se utilizó NFA, NFB y siloxanos en un ambiente natural. La disminución de la hidrofobicidad puede atribuirse a la degradación de los recubrimientos debido a la exposición de radiaciones U.V. en la azotea del I.I.C., excesos de agua que incorporan sales, y recoge también los agentes químicos agresivos presentes en la atmósfera (Shaquihuanga-Ayala, 2014). Por otra parte, los especímenes expuestos solamente a ciclos de radiación UV, condensación y temperatura, aún mantienen la hidrofobicidad después de 2000 h.

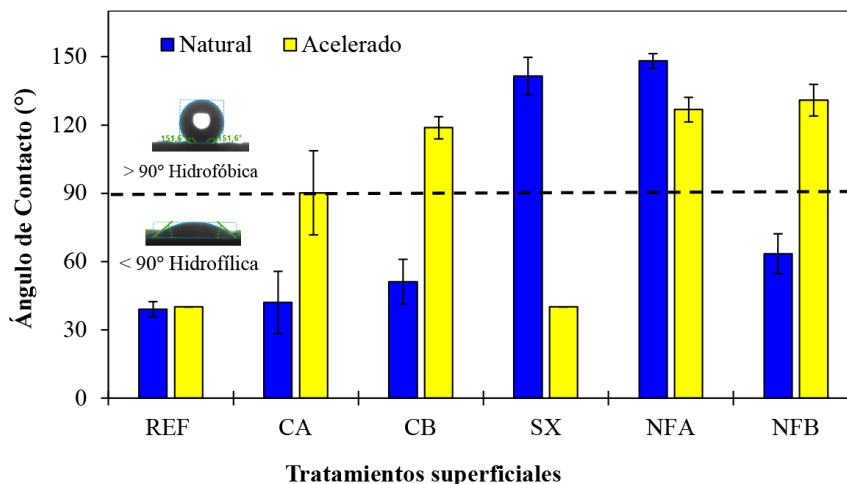


Figura 5. Ángulo de contacto estático en muestras de arcilla cocida con diferentes tratamientos.

Los tratamientos con NFA y NFB muestran ángulos de contacto de entre 130° a 140° , mientras que el CB muestra de 120° ; y el CA de 90° situando a la superficie en el límite de hidrofobicidad. La pérdida de hidrofobicidad expone al material a los diversos tipos de deterioro promovidos por el agua, dejando al material indefenso ante los agentes químicos agresivos presentes en la atmósfera. Adicionalmente, se puede generar humedad en el material promoviendo el desarrollo de biomasa. Los resultados positivos en los tratamientos comerciales CA y CB expuestos a un ambiente natural, de diferencia de color, se desprecian al haberse perdido el efecto que se buscaba, el cual era “sellar, impermeabilizar y repeler el agua” de diversos materiales de construcción; Aunque los tratamientos tengan una mínima afectación en el cambio de color de la teja, estos deben seguir conservando su hidrofobicidad, y de igual manera, al tener elevados ángulos de contacto, no se debe ver afectada su apariencia, lo cual fue el resultado de algunos tratamientos.

3.3 Caracterización FT-IR de tejas de arcilla cocida

Espectros FT-IR de los especímenes expuestos a 24 meses en un ambiente natural se muestran en la figura 6, donde se identificaron los grupos funcionales y los compuestos orgánicos presentes en las tejas.

De los resultados de la prueba FTIR como se muestra en la figura 6, se puede observar que tanto el SX y NFA mostraron picos de vibración en tensión $-\text{CH}_3$ a 1250 cm^{-1} , por lo que se puede inferir que los grupos funcionales hidrofóbicos siguen presentes en la teja, lo que se puede comprobar con los altos valores obtenidos con el ángulo de contacto. Los picos que se presentan entre 1100 y 810 cm^{-1} son atribuidos a la absorción de vibraciones a tensión simétricas $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ y las que se encuentran a 780 cm^{-1} se atribuyen a la absorción de vibraciones de flexión $\text{Si}-\text{O}$ debido a la composición de la teja y las nanopartículas de silicio. Estos grupos funcionales se encuentran también en diversos tratamientos hidrofóbicos y superhidrofóbicos a base de nanopartículas de silicio que han mostrado resultados positivos (Beirami *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2018; She *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2019).

Estos grupos funcionales no se encuentran en los demás tratamientos comerciales, que como pudimos comprobar con el ángulo de contacto perdieron su hidrofobicidad. En el tratamiento SX se pueden observar

bandas de absorción más angulares, contrario a los observado en las demás muestras donde el pico se muestra ampliado, lo que podría significar que se ha producido alguna interacción (generalmente interacción de enlace de hidrógeno) (Larkin, 2011). A pesar de que fueron expuestas a un ambiente industrial por 2 años, los tratamientos con SX y NFA siguen presentando CH_3 , responsable de la hidrofobicidad (Nyquist, 2001). La muestra SX mostró una señal más fuerte debido a que el tratamiento es de 90 % siloxanos, por lo tanto, se infieren una mayor cantidad de enlaces de ese tipo. El tratamiento sintetizado en laboratorio NFA utiliza 0.1 % de nanopartículas base silicio, por lo que se puede inferir que la señal de transmitancia es menor. Sin embargo, se puede observar que los picos en este tratamiento, como en el de 90 % siloxanos también están presentes en las bandas de absorción localizadas en 1250 cm^{-1} . El alto porcentaje de siloxanos provee un ángulo de contacto en el sustrato correspondiente al de una superficie hidrofóbica, pero también cambia el color de la teja significativamente. En cambio el bajo porcentaje de nanopartículas también es capaz de proveer una superficie hidrofóbica evidenciado por el ángulo de contacto, sin un cambio significativo de color.

3.4 Sortividad

En la tabla 3 se presentan los resultados de sortividad . La tasa de absorción inicial se redujo considerablemente después de la aplicación de los productos hidrofobos.

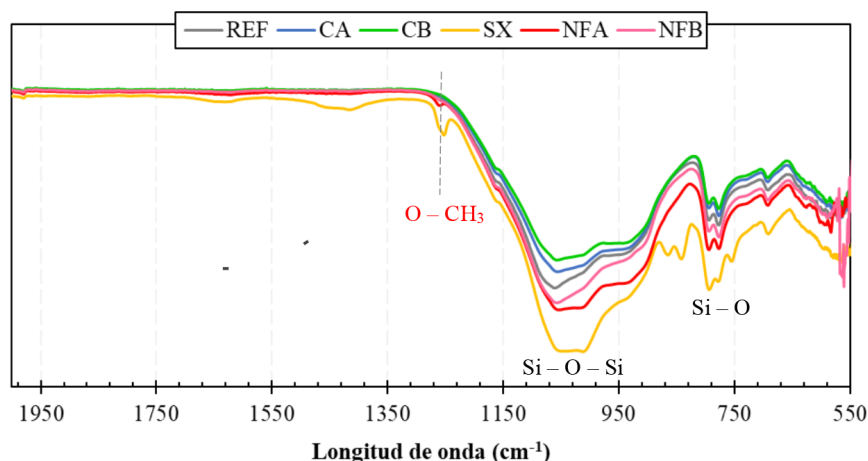


Figura 6. Espectros FT-IR de tejas; sin exposición y con distintos tratamientos después de ser expuestas por 2 años en un clima urbano/industrial.

Tabla 3. Resultados promedio de la tasa de absorción del agua en muestras tratadas y no tratadas, sin exposición al medio ambiente y expuestas a envejecimiento acelerado.

		Tasa de absorción, $\times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$					
Tratamiento		REF	CA	CB	SX	NFA	NFB
0h	Inicial	46.5	3.4	4.1	17.7	5.3	2.8
	Secundaria	1.3	1.4	2.2	1.5	1.5	2.8
2000h	Inicial	315.1	19.4	9.4	104	19.6	9.6
	Secundaria	14.4	22.2	24.1	12.2	12.4	23.7

Se muestra una absorción secundaria similar en todos los casos como se observa en la tabla 3, donde se puede observar una pendiente similar en todas las muestras. La tasa de absorción inicial de agua se redujo 2 órdenes de magnitud en los tratamientos comerciales, NFB y NFA después de ser expuestas a 2000h en la cámara UV. Los siloxanos por otra parte mostraron una reducción mínima. Las mediciones se tomaron en tejas con exposición al medio ambiente después de 6 meses siendo sus resultados similares a los presentados a 500h en exposición acelerada. No se pudo obtener la tasa de absorción de las tejas envejecidas a 24 meses, debido a que el tratamiento se aplicó en tejas curvas.

Los tratamientos utilizados rigen en función a ley de Cassie-Baxter con altos ángulos de contacto estáticos en donde se minimiza el área de contacto entre una gota de agua y una superficie. (Zimmermann, 2007). En el caso de la teja sin tratamiento, la teja absorbió agua continuamente debido a la atracción capilar. En las superficies modificadas, como lo son las tejas con nanopartículas de silicio funcionalizadas (NFA y NFB), se restringe el ingreso del agua debido al aire atrapado dentro de sus espacios, reducen las tensiones superficiales y generan un efecto hidrófobo (She *et al.*, 2020; Cruz-Moreno *et al.*, 2020). Por lo tanto, las superficies tratadas exhiben una resistencia al ingreso del agua. De igual manera esto se puede respaldar con los ángulos de contacto que presentan a 2000h, los cuales en los tratamientos comerciales y sintetizados en laboratorio corresponden a los de una superficie hidrófoba.

4. Conclusiones

En este trabajo se sintetizaron dos tratamientos a base de nanopartículas de silicio (NFA y NFB), donde su efectividad fue evaluada, dándole un enfoque a la durabilidad. De este estudio se pueden formular las siguientes conclusiones principales:

- La hidrofobicidad producida por los tratamientos NFA y NFB generan un mayor ángulo de contacto entre el agua y el sustrato, lo que reduce de las propiedades de transporte del agua. Esto evidenciado por su elevado ángulo de contacto de entre 130° y 140° , además por los grupos funcionales de metoxilo (O-CH_3) aun presentes en la teja. Como consecuencia se mejora la durabilidad de las tejas de arcilla cocida mediante la mejora de las propiedades de la estructura de la superficie. Sin embargo, el tratamiento NFB perdió su hidrofobicidad después de 2 años de exposición natural, mientras que el NFA las conservó.
- Los tratamientos NFA y NFB disminuyen dos órdenes de magnitud la tasa de absorción de los materiales de arcilla cocida. Adicionalmente, estos recubrimientos presentan una diferencia de color menor a la aceptable para edificaciones de interés histórico. Se tomaron en cuenta varios factores los cuales afirman que el uso de las NFA puede proporcionar un resultado integral.
- Las propiedades hidrófobas protegen al material del agua y los contaminantes, lo que podría promover el efecto autolimpiante, además de desacelerar el ingreso de estos agentes a la matriz del material. Como consecuencia se pueden obtener superficies antihumedad, antiadhesión, resistentes a las manchas y a la proliferación de organismos.
- El uso potencial de NFA como tratamiento superficial para la protección de nuevas edificaciones, así como monumentos de interés histórico es una idea prometedora, sin embargo, se debe estudiar diversos factores tales como su interacción con sustratos envejecidos, remoción, efectos secundarios a largo plazo y bajo condiciones de exposición a microorganismos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al fondo SEP-CONACyT por el apoyo financiero otorgado a los proyectos CB-2016-01/285453, IT- 301307 y P/PROFEXCE-2020-19MSU00. M. Neri-Alvarez, agradece la beca cvu #872560 para la realización de sus estudios de posgrado.

6. Referencias

- ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org
- ASTM D2244-16, Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM D7334-08(2013), Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org
- ASTM G154-16, Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM G7 / G7M-13, Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org
- Beirami, K., Baghshahi, S., Ardestani, M., & Riahi, N. (2020). Synthesis and characterization of hydrophobic nano-silica thin coatings for outdoor insulators. *Processing and Application of Ceramics*, 14(1), 40–46. doi: 10.2298/pac2001040b
- Chen, M., Wu, F., Yu, L., Cai, Y., Chen, H., & Zhang, M. (2019). Chloride binding capacity of LDHs with various divalent cations and divalent to trivalent cation ratios in different solutions. *CrystEngComm*. doi:10.1039/c9ce01322a
- Cruz-Moreno, D., Fajardo, G., Flores-Vivian, I., Orozco-Cruz, R., & Ramos-Rivera, C. (2020). Multifunctional surfaces of portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles. *Applied Surface Science*, 531, 147355. doi:10.1016/j.apsusc.2020.147355
- De Sitter, W. R. (1984, May). Costs for service life optimization: The Law of Fives. In *Durability of Concrete Structures*, Workshop Report (pp. 131-134).
- FFTB, 2015. Fédération française tuiles et briques. [WWW Document]. http://www.ftfb.org/wp-content/uploads/2017/04/FFTB_COLLECTIVITES_2015_WEB.pdf accessed 7.22.18.
- García, O., & Malaga, K. (2012). Definition of the procedure to determine the suitability and durability of an anti-graffiti product for application on cultural heritage porous materials. *Journal of Cultural Heritage*, 13(1), 77–82. doi:10.1016/j.culher.2011.07.004
- Graus, S., Vasconcelos, G., & Palha, C. (2019). Experimental Characterization of the Deterioration of Masonry Materials Due to Wet and Dry and Salt Crystallization Cycles. *RILEM Bookseries Structural Analysis of Historical Constructions*, 687-695. doi:10.1007/978-3-319-99441-3_74
- Graus, S., Vasconcelos, G., & Palha, C. (2019). Experimental Characterization of the Deterioration of Masonry Materials Due to Wet and Dry and Salt Crystallization Cycles. *RILEM Bookseries Structural Analysis of Historical Constructions*, 687-695. doi:10.1007/978-3-319-99441-3_74
- Hamari, P., Tsiafaki, D., Kazakis, N., & Tsirliganis, N. (2019). Tracing ancient fingerlines: Applying micro-XRF to signatures on Laconian roof tiles in Late Antique Arethousa, Paliambela (Greece). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, 101869. doi:10.1016/j.jasrep.2019.05.034

- Hamari, P., Tsiafaki, D., Kazakis, N., & Tsirliganis, N. (2019). Tracing ancient fingerlines: Applying micro-XRF to signatures on Laconian roof tiles in Late Antique Arethousa, Paliambela (Greece). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, 101869. doi:10.1016/j.jasrep.2019.05.034
- Hosseini, M., & Karapanagiotis, I. (2018). *Advanced Materials for the Conservation of Stone*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72260-3>
- Larkin, P. (2011). *Infrared and raman spectroscopy principles and spectral interpretation*. Amsterdam: Elsevier.
- Li, R., Hou, P., Xie, N., Ye, Z., Cheng, X., & Shah, S. P. (2018). Design of SiO₂/PMHS hybrid nanocomposite for surface treatment of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 87, 89–97. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.12.008
- Liu, S., Wang, R., Yu, J., Peng, X., Cai, Y., & Tu, B. (2020). Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles. *Construction and Building Materials*, 243, 118202. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118202
- Nyquist, R. (2001). Infrared, Raman, and Nuclear Magnetic Resonance Spectra-Structure Correlations for Organic Compounds. *Interpreting Infrared, Raman, and Nuclear Magnetic Resonance Spectra*, 439–579. doi: 10.1016/b978-012523475-7/50191-1
- Pisello, A. L. (2015). Thermal-energy analysis of roof cool clay tiles for application in historic buildings and cities. *Sustainable Cities and Society*, 19, 271–280. doi:10.1016/j.scs.2015.03.003
- Shaquihuanga-Ayala, D., (2014). Evaluación del estado actual de los muros de albañilería confinada en las viviendas del sector Fila Alta -Jaén, Universidad Nacional de Cajamarca.
- She, W., Yang, J., Hong, J., Sun, D., Mu, S., & Miao, C. (2020). Superhydrophobic concrete with enhanced mechanical robustness: Nanohybrid composites, strengthen mechanism and durability evaluation. *Construction and Building Materials*, 247, 118563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118563
- Tatis, D., López, B., (2012). Enfoque Químico Del Deterioro Y Biodeterioro De Rocas Calcáreas Conformantes De Monumentos Patrimoniales De Importancia Histórica Y Cultural. *Luna Azul*, (34), 240–256. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.14>
- Tennent, N. H., & Townsend, J. H. (1984a). The significance of the refractive index of adhesives for glass repair. In N. S. Brommelle (Ed.), *Adhesives and consolidants*, Paris Congress, 2–8 September 1984: Preprints (pp. 205–212). International Institute for Conservation.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Fujian Tulou, in: *World Heritage Convention (WHC) Advisory Body Evaluation Report*, UNESCO World Heritage Centre, Paris, France, 2008.
- Wu, G., Liu, D., Chen, J., Liu, G., & Kong, Z. (2019). Preparation and properties of super hydrophobic films from siloxane-modified two-component waterborne polyurethane and hydrophobic nano SiO₂. *Progress in Organic Coatings*, 127, 80–87. doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.06.016
- Zhang, X., Liu, Z., Zhang, X., Li, Y., Wang, H., Wang, J., & Zhu, Y. (2018). High-adhesive superhydrophobic litchi-like coatings fabricated by in-situ growth of nano-silica on polyethersulfone surface. *Chemical Engineering Journal*, 343(March), 699–707. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.012>
- Zimmermann, J., Reifler, F. A., Schrade, U., Artus, G. R. J., & Seeger, S. (2007). Long term environmental durability of a superhydrophobic silicone nanofilament coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302(1-3), 234–240. doi:10.1016/j.colsurfa.2007.02.033



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Influencia de la adición de CBC-st en la resistividad eléctrica del concreto

A. V. Pacheco-Hernández, V. G. Jiménez-Quero,
V. A. Franco-Luján, P. Montes-García

CIIDIR Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional

Autor de Contacto: pmontes@ipn.mx

Resumen

En el presente estudio se investigó el efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña sin tratamiento (CBC-st) en la resistividad eléctrica (RE) del concreto. Se prepararon dos mezclas de concreto, una denominada control con únicamente cemento Portland (CP), y otra, a la cual se adicionó 15% de CBC-st como sustituto parcial del CP. Se evaluaron las propiedades en estado fresco de las mezclas de concreto. Se monitorearon las REs de ambas mezclas a 7, 14, 28, 58 y 90 días de edad. También se estimaron las resistencias a la compresión de ambos concretos a las mismas edades con el fin de corroborar que cumplieran con la resistencia de diseño. Los resultados indican que la adición de 15% CBC-st incrementa significativamente la RE del concreto en todas las edades estudiadas.

Palabras clave: materiales cementantes suplementarios, ceniza de bagazo de caña, postratamiento; ligado de especies; resistencia a la compresión.

Abstract

In the present study, the effect of the addition of untreated sugarcane bagasse ash (UtSCBA) on the electrical resistivity (ER) of concrete was investigated. Two concrete mixtures were prepared, one called control with only Portland cement (PC), and another where 15% of UtSCBA was added as a partial substitute of PC. Properties in the fresh state of the concrete mixtures were evaluated. The ER was monitored for both mixtures at 7, 14, 28, 58 and 90 days of age. The compressive strength of both concretes at the same ages was also estimated in order to corroborate that they fulfilled the design strength. The results indicate that the addition of 15% UtSCBA significantly increases the ER of the concrete in all the studied ages.

Keywords: supplementary cementing materials; sugarcane bagasse ash; post-treatment; species binding; compressive strength.

1. Introducción

La industria de la construcción es responsable de entre 5 y 10 % de las emisiones globales de CO₂. Por lo cual se requiere el uso de materiales alternativos para la sustitución del cemento Portland (CP). En los últimos 30 años se han llevado a cabo importantes investigaciones sobre uso de materiales cementantes suplementarios (MCSs) industriales como reemplazo parcial del PC; por ejemplo, se han utilizado ceniza volante (CV), humo de sílice (HS) y escoria granulada de altos hornos (EGAH). Con la adición de estos materiales se han mejorado las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (McCarter *et al.*, 2013; Megat *et al.*, 2011). La CV es el MCS más utilizado en la producción de concretos binarios (CP más un MCS) y ternarios (CP más dos MCS), esta CV es una adición mineral que mejora la fluidez en el estado fresco del concreto y se recomienda ampliamente como un reemplazo parcial del CP (Ahmaruzzaman, 2010).

Sin embargo, en regiones donde la disponibilidad de CV es baja, por ejemplo, en México, ésta es muy costosa. Aunado a esto, a nivel internacional hay una reducción en la producción de CV porque las industrias están cambiando al uso de gas natural en vez de carbón mineral. Es por ello que se requiere de materiales alternativos para ser utilizados como MCSs. En este contexto algunos residuos agrícolas parecen prometedores para ser utilizados como material puzolánico, por ejemplo; la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC). La CBC se obtiene como un subproducto de la combustión del bagazo y se deposita incorrectamente en vertederos a cielo abierto, causando problemas de contaminación (Isaia, 2011). Debido a que la CBC tiene un alto contenido de SiO₂ y Al₂O₃ amorfos, puede usarse como un material puzolánico. No obstante, la vasta literatura recomienda que la CBC requiere un postratamiento muy demandante de energía antes de ser utilizada como MCS, con el objeto de eliminar el alto contenido de carbón que contiene. Es por ello que existen pocos estudios sobre el uso de CBC sin tratamiento. Arenas-Piedrahita *et al.* (2016) prepararon morteros reemplazando CP por CBC cribada por la malla No. 75 mm durante solamente cuatro minutos, a la que denominó CBC sin tratamiento (CBC-st). Los autores encontraron que la adición de 20% CBC-st afectó negativamente la trabajabilidad de los morteros; sin embargo, no afectó su resistencia a la compresión y mejoró significativamente algunas de sus propiedades de durabilidad. El objetivo de este estudio es investigar el efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña sin tratar (CBC-st) en la resistividad eléctrica (RE) del concreto.

2. Procedimiento

Se elaboraron dos mezclas de concreto; la primera se denominó mezcla control (MC), y se preparó con 100% de CPC, mientras que en la segunda se reemplazó el 15% del peso del CPC por CBC-st (MCBC). Se evaluaron sus propiedades en estado fresco y se monitorearon las resistividades eléctricas (RE) y resistencias a la compresión (RC) de ambas mezclas a 7, 14, 28, 56 y 90 días. Finalmente, se analizó la correlación entre las dos propiedades.

2.1 Materiales y especímenes

Los materiales que se utilizaron para la elaboración de las diferentes mezclas de concreto fueron cemento portland compuesto (CPC) 30R de la empresa Holcim Apasco. El cual satisface las especificaciones establecidas en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014. La ceniza de bagazo de caña sin tratamiento (CBC-st) se obtuvo del Ingenio Azucarero “Constancia”, perteneciente al Grupo Beta San Miguel, ubicado en la comunidad de Tezonapa, Veracruz, México. Esta ceniza se obtiene a una temperatura de calcinación entre 700 y 900 °C y para su utilización como MCS, fue solamente tamizada por la malla No. 200 ASTM (75

µm) durante cinco minutos. El agregado fino (AF) utilizado fue arena de río y el agregado grueso (AG) fue agregado triturado con un tamaño máximo de 19mm, de acuerdo con la norma ASTM C33. Se utilizó agua embotellada para la elaboración de todas las mezclas, así como un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante (SP) de la marca Plastol Precast Plus®, formulado a base policarboxilatos que cumple con la norma ASTM C 494 tipo “A” y “F” como reductor de agua de alto rango, y diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducción de agua a la mezcla de concreto. En la tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades de los materiales utilizados para el diseño y posterior preparación de las mezclas de concreto.

Se diseñaron las mezclas de concreto con base en el método de volúmenes absolutos del Instituto Americano del Concreto (ACI, 2011) para una resistencia de 25 MPa a 28 días y revenimiento en el rango de 75±20 mm con una relación agua/material cementante (a/mc) de 0.50. Ensayos preliminares sobre la preparación de las mezclas utilizando las proporciones originales obtenidas del diseño evidenciaron su falta de trabajabilidad, por lo cual fue necesario incorporar un aditivo superplastificante. El superplastificante se adicionó hasta alcanzar una trabajabilidad apropiada para manipular el concreto sin afectar la a/mc. En la tabla 2 se resumen las proporciones de las mezclas para 1 m³ de concreto.

La Tabla 3 muestra las propiedades en estado fresco de las mezclas de concreto. Los valores de revenimiento obtenidos estuvieron dentro de los límites establecidos en el diseño de mezclas para garantizar una mezcla trabajable. No obstante, cuando se adicionó CBC-st fue necesario incrementar la cantidad de SP en

Tabla 1. Resumen de las propiedades física de los materiales.

Materiales	PVSS, kg/m³	PVSC, kg/m³	GE	Absorción %	MF	TMA
CPC			2.9			
CBC-st			2.20			
AF	1603	1705	2.76	1.04	3.04	
AG	1521	1666	2.54	0.70		3/4»

PVSS= Peso Volumétrico Seco Suelto, PVSC= Peso Volumétrico Seco compacto, GE=Gravedad Específica, MF= Módulo de Finura, TMA= Tamaño Máximo de Agregado.

Tabla 2. Proporciones de las mezclas para 1m³ de concreto.

Mezcla	CPC (kg)	CBC-st (kg)	AF(kg)	AG(kg)	Agua (L)	SP(L)
MC	404	0	728.78	993.75	212.92	0.89
MCBC	343.4	60.6	730.96	993.75	212.92	2.23

Tabla 3. Propiedades en estado fresco de los concretos estudiados.

Mezcla	Revenimiento (mm)	Temperatura °C	Peso volumétrico (kg/m³)	Contenido de aire (%)
MC	58	20.4	2265	2.1
MCBC	35	20.0	2230	2.1

150 % con respecto al control para lograr una trabajabilidad adecuada y mantener constante la relación a/mc de 0.50. La CBC-st afectó negativamente la trabajabilidad de las mezclas por su alto contenido de pérdidas por calcinación, que resulta comúnmente en una disminución en el contenido de óxidos mayores en la ceniza, y en una mayor demanda de agua para las mezclas en estado fresco. Además, estudios previos han encontrado que las partículas de CBC-st muestran gran variedad de formas (partículas prismáticas, tubulares, aglomeradas e irregulares) y tamaños, con superficies rugosas, con altas porosidades y grandes áreas superficiales, lo cual también afecta negativamente las propiedades de las mezclas en estado fresco (Cordeiro *et al.*, 2008; Arenas-Piedrahita, 2016). Las temperaturas fueron similares; sin embargo, el peso volumétrico disminuyó en 1.5% en comparación con el control. Lo anterior se atribuye a que las densidades de las cenizas utilizadas son menores que la del CPC.

Los valores de contenido de aire atrapado de las mezclas en estudio estuvieron en el rango fueron similares y se encuentran dentro del rango de 1 % a 3 %, siendo estos últimos valores válidos para mezclas de concreto fresco sin aire incluido (Kosmatka *et al.*, 2004).

Se prepararon en total 50 especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura de acuerdo con la norma ASTM C192/C192M - 18, es decir 25 cilindros por cada mezcla. Los especímenes se cubrieron con una membrana plástica por 24 hrs. para evitar la evaporación del agua. Posteriormente, los especímenes se desmoldaron, lijaron, midieron, pesaron y se sometieron a un curado por inmersión en una solución saturada de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) hasta las edades de ensaye. Todo esto se realizó con base en las recomendaciones de la norma ASTM C31/C31M-09.

2.2 Métodos

2.2.1 Pruebas de resistividad eléctrica.

Las pruebas de resistividad eléctrica se llevaron a cabo a 7, 14, 28, 56, y 90 días, de acuerdo con el diseño experimental. Para estas pruebas se utilizó un resistímetro superficial Resipod®, modelo 38 mm (1.5") de Proceq®, en conformidad con la especificación del método de prueba de resistividad superficial AASHTO. El Resipod® es una sonda Wenner de 4 puntos completamente integrada, ideada para medir la resistividad eléctrica del concreto de manera no destructiva. Para que el Resipod® funcionara correctamente se calibró obteniendo los resultados de prueba esperados 12 y 90 k Ω cm para el modelo de 38 mm. Durante la prueba los especímenes estuvieron en un estado saturado superficialmente seco, puesto que si se encontraban secas o húmedas las lecturas no son confiables debido a que la corriente es conducida por iones presentes en la solución de poros de los concretos. Así también se aseguró que no hubiera ningún cambio brusco de temperatura ambiental que afectara el estado de las probetas al momento de realizar las pruebas. Se tomaron ocho lecturas distribuidas en toda la superficie lateral de cada uno de los cinco cilindros por cada mezcla ensayados en cada edad de prueba. Para asegurar que las lecturas se efectuaran en los mismos puntos en todas las edades, se marcaron los cilindros después de ser desmoldados. Los valores que proporcionan la sonda Wenner para resistividad eléctrica se basan en el supuesto de que el dominio donde se realizan las mediciones es un medio semi-infinito por lo cual los valores obtenidos en las pruebas se corrigieron por el factor geométrico y por tamaño máximo del agregado, basándose en la investigación de (Morris *et al.*, 1996).

2.2.2 Pruebas de resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a compresión se realizaron también a 7, 14, 28, 56 y 90 días de edad en una prensa eléctrica digital ELVEC® modelo E 659-5 con una capacidad de carga de 120 t, y de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C39/C39M-18. Los especímenes se ensayaron en condición saturadas.

Previo a la prueba las superficies de contacto de los cilindros fueron lijadas para tener una superficie de contacto uniforme con las platinas de la prensa. Puesto que la prueba de resistencia a la compresión es una prueba destructiva solo se obtuvo una lectura por cada uno de los cinco cilindros ensayados en cada edad para cada mezcla.

3. Resultados

3.1 Resistividad eléctrica

Los resultados indican que las lecturas de RE incrementan con la edad en ambas mezclas (Figura 1). Los valores de RE son similares hasta aproximadamente siete días. Sin embargo, después de siete días se observa que la RE de la MCBC es mayor que la de la MC hasta la conclusión del periodo de evaluación. Los resultados indican diferencias significativas entre las edades en las que se realizaron las pruebas ($P < 0.05$) y el tipo de mezcla ($P < 0.05$); sin embargo, la interacción entre la edad de prueba y el tipo de mezcla no fue significativa ($P > 0.05$). Es decir, la RE incrementa con la edad y con la adición de 15 % de CBC-st, y esta tendencia no cambia durante la edad de prueba para ambas mezclas. Una explicación del efecto benéfico de la adición de 15 % de CBC-st en la RE del concreto puede atribuirse a la densificación de la matriz cementante ocasionada por la reacción puzolánica de la CBC-st (Ríos-Parada *et al.*, 2017), y que se corrobora con los resultados de RC en la siguiente sección. Otro factor que influye en el incremento de la RE con la adición de CBC-st es el consumo de iones en la solución de poro ocasionado también por la reacción puzolánica. Finalmente, una hipótesis interesante es que el carbón actúa como el ligante de especies en la solución.

3.2 Resistencia a la compresión

La figura 2 muestra los resultados de RC de las mezclas también a 7, 14, 28, 56 y 90 días. De manera similar que, en los resultados de RE, se observa que la RC incrementa con la edad, esto gracias a que existe suficiente humedad para propiciar la reacción de hidratación del cemento en la MC, y ambas, hidratación y reacción secundaria, también denominada puzolánica, en la MCBC. La figura 2 muestra que incrementos mayores en RC ocurren a edades tempranas en comparación con edades tardías. Se puede observar que a los 7 días los concretos MC y MCBC alcanzaron el 59 % y 64 % respectivamente de la resistencia total alcanzada a

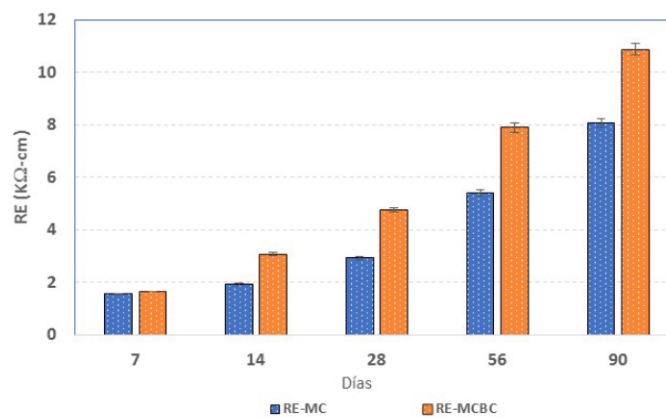


Figura 1. Resultados de RE de las mezclas de concreto.

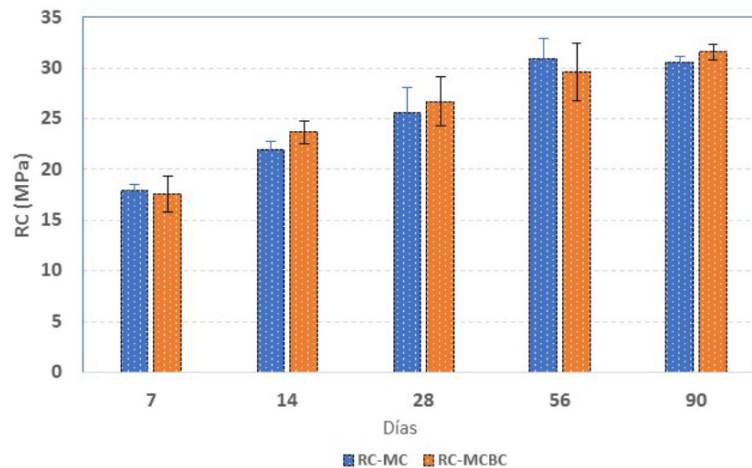


Figura 2. Resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de concreto.

los 90 días. A 28 días de edad las mezclas alcanzaron la RC de diseño de 25 MPa. La MCBC superó a la MC en 8 %, 4 % y 3 % a la RC a los 14, 28 y 90 días respectivamente, lo cual concuerda con lo reportado por (Berenguer et al., 2018), en donde se establece que la sustitución menor a 15% del cemento por CBC no provoca disminución de la RC.

Los resultados del ANOVA para la RC indican que el tipo de mezcla no es significativo ($p > 0.05$) y que, por lo contrario, la edad si es significativa ($p << 0.05$). Es decir, que la adición de CBC-st no afecta significativamente el valor de la RC. Los resultados del ANOVA indican que la interacción tipo de mezcla x edad t no es significativa ($p > 0.05$). Es decir, que la tendencia de incremento o decremento del valor de RC causado por la adición de cenizas es diferente con la edad, o que el efecto de la edad es diferente para cada mezcla.

3.3 Correlación entre RE y RC

Las pruebas de RC y RE dependen directamente del proceso de hidratación del cemento y de los cambios microestructurales de la matriz cementante. A medida que aumenta el nivel de hidratación y el concreto endurece se produce una disminución de los poros capilares y la resistencia a compresión aumenta al tener más fase sólida por volumen de material. A su vez al producirse una disminución de los poros capilares se dificulta el traslado de iones que conducen la corriente eléctrica, por ello aumenta también la RE. Es por lo anterior que resulta interesante analizar la correlación entre los resultados de las dos pruebas y proponer la construcción de un modelo para fines predictivos. Es decir, un modelo para estimar la RC, la cual es una prueba destructiva, con base en los resultados de la RE, la cual es una prueba no destructiva.

La figura 3 ilustra la correlación entre RE y RC para las mezclas estudiadas. Se observa que la evolución de la resistividad es similar a la de la resistencia, es decir, a mayores valores de RE en los concretos mayores son los valores de RC. Este comportamiento también fue observado por Lubeck *et al.* (2012), y está relacionado con la clara influencia que la porosidad tiene en ambas propiedades. La correlación entre las variables es estadísticamente significativa ($p << 0.05$), con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.907$ con el siguiente modelo de regresión de tipo logarítmico: $f'c = 7.08 \ln(RE) + 16.004$. Al establecer las co-

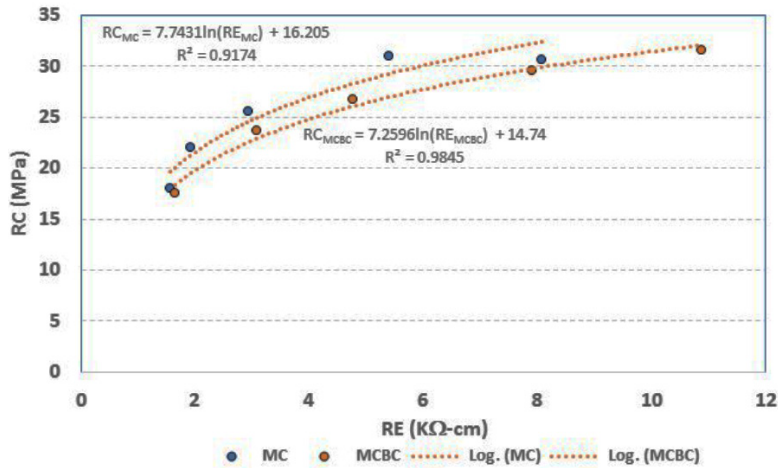


Figura 3. Correlación entre RE y RC por mezcla.

relaciones por cada mezcla se observa que el coeficiente de determinación aumenta de manera importante, lo cual indica que al correlacionar los resultados por tipo de mezcla se mejora la predicción de la RC de la mezcla que contiene CBC-st (figura 3).

4. Discusión

En esta sección se intenta explicar el porqué de las diferencias observadas en el análisis descriptivo, y confirmadas con el análisis estadístico de los resultados. Para discutir los fenómenos que afectan las lecturas de RE, es conveniente analizar en primer lugar los fenómenos que afectan los resultados de RC, puesto que la interpretación de éstos es menos compleja que la de RE. Además, cambios en la matriz cementante afectan los resultados de ambas pruebas.

La mezcla MCBC presentó un comportamiento adecuado en lo que respecta a la RC, ya que a las edades de ensaye no hubo diferencia significativa con la mezcla MC. La RC no se ve disminuida posiblemente debido a que la CBC-st tiene alto potencial puzolánico, esto indica, mayor disponibilidad de sílice y alúmina para que las reacciones puzolánicas se lleven a cabo. Así también su baja cristalinidad pudo incrementar su reactividad y la reacción puzolánica ocurre con mayor velocidad (Arenas-Piedrahita *et al.*, 2016).

En lo referente a los resultados obtenidos en la prueba de RE se confirma que el concreto con CBC-st sigue un proceso lento de hidratación, ya que el aumento de la RE en un material poroso significa que este material sigue formando sólidos y/o perdiendo interconectividad iónica entre los poros para formar así un concreto más denso e impermeable.

Estas mismas mezclas desarrollaron mayor RE debido a la reacción puzolánica que contribuyó con el refinamiento de la red de poros, restringiendo su conectividad y a su vez aumentó la resistencia contra el flujo de corriente eléctrica. Esto de acuerdo con lo que plantean Andrade y D'Andrea (2011), quienes reportaron que cuanto mayor es la RE menor es la porosidad del concreto, al tener más fase sólida por volumen y como consecuencia tendrá un menor riesgo a la penetración de iones cloruros, dióxido de carbono y sulfatos que podrían dañar al concreto.

Es importante mencionar que el valor de la RE depende también de la cantidad de iones presentes en la solución de los poros. Cuando el agua entra en contacto con el CP se generan y precipitan iones en dicha solución, siendo algunos de ellos de calcio. Las puzolanas consumen estos iones para formar compuestos más resistentes, lo cual contribuye a reducir la conductividad eléctrica. En consecuencia, el grado de dificultad que encuentran los iones en sus desplazamientos es mayor, y por ende aumenta la RE de la solución en los poros.

En resumen, se puede decir que el uso de CBC-st en concreto no afecta su RC y aumenta su RE. Lo anterior se logra gracias a la reacción puzolánica que forma nuevos productos de hidratación similares a los que se generan en la hidratación del cemento portland, entre los que se encuentran el silicato hidratado de calcio ($C_3S_2H_3$) y los aluminatos hidratados de calcio (C_3AH_6). Estos compuestos ocupan los espacios vacíos y densifican la microestructura cementante disminuyendo la porosidad. Por ende, reduce su permeabilidad y aumenta su durabilidad en ambientes con agentes agresivos. En cuanto a la correlación entre RE y RC el análisis por tipo de mezcla mejora de manera importante la predicción de la resistencia con base en la RE.

5. Conclusiones

Con base en el análisis y discusión de resultados de esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

La adición de 15% CBC-st afecta significativamente los valores de resistividad del concreto. La resistividad eléctrica del concreto que contiene CBC-st es similar a la de la mezcla control a 7 días, pero significativamente mayor a edades tardías. Mientras que la resistencia a la compresión de concreto adicionado con 15% de CBC-st es similar a la mezcla control a las diferentes edades estudiadas.

La correlación entre RE y RC se puede expresar con modelos de regresión del tipo logarítmica con un coeficiente de determinación de $R^2=0.90$ cuando se consideran todos los datos obtenidos. No obstante, cuando se establece la correlación por tipo de mezcla los coeficientes de determinación cambian a $R^2=0.91$ para la mezcla con solo cemento y a $R^2=0.98$ para la mezcla con 15 % de CBC-st.. Esto indica que la correlación establecida por tipo de mezcla es un mejor predictor para concretos que contienen adiciones minerales.

Con base en lo anterior se concluye que la adición de 15 % de ceniza de bagazo de caña, la cual se ha sometido solamente a un postratamiento de cribado por la malla no. 75 mm durante cinco minutos (CBC-st), no afecta negativamente la resistencia del concreto; no obstante, se mejoran significativamente las propiedades de durabilidad.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el recurso financiero otorgado para la realización del proyecto y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las becas de posgrado otorgadas para la realización de estudios de posgrado de Alejandra Verónica Pacheco Hernández y V.A. Franco-Luján. Además, agradecen al alumno de licenciatura Emanuel Miguel Caballero por el apoyo en la realización de las pruebas de laboratorio.

7. Referencias

- Ahmaruzzaman, M. (2010), A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*. 36(3): 327-363.
- Andrade, C. y D'andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*. 1(2): 90-98.
- Arenas-Piedrahita, J. C., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J. M., Calvo, H. L., Valdez-Tamez, P. L., and Martínez-Reyes, J. (2016), Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and building materials*. 105: 69-81.
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., and Fairbairn, E. D. M. R. (2008), Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. *ACI Materials Journal*. 105(5): 487.
- Isai, G. C. (2011). *Concreto: Ciência e tecnologia*. São Paulo, Brazil: IBRACON). 2v.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., Tanesi, J. (2004), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois. EE. UU.
- Johari, M. M., Brooks, J. J., Kabir, S., and Rivard, P. (2011), Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 25(5): 2639-2648.
- Lübeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., and Siqueira, H. C. (2012), Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 34(3): 392-399.
- McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Starrs, G., Adamson, A., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S. V., and Green, C. (2013), Characterization of physio-chemical processes and hydration kinetics in concretes containing supplementary cementitious materials using electrical property measurements. *Cement and concrete research*. 50: 26-33.
- Morris, W., Moreno, E. I., & Sagüés, A. A. (1996), Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and concrete research*. 26(12): 1779-1787.
- Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V. G., Valdez-Tamez, P. L., & Montes-García, P. (2017), Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*. 157: 83-95.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Síntesis de nanopartículas de silicio de MCM-41 obtenidas a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado

M. Ramírez Arévalo, D. Delgado Salas, T. Pérez López,
Miguel Ramón Sosa-Baz, W. Talavera Pech

Centro de Investigación en Corrosión-Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: watalave@uacam.mx

Resumen

La generación de Residuos Sólidos Urbanos en México representa 107,055.547 millones de kilogramos diarios de los cuales, cerca del 7 % pertenece al vidrio desechado (INEGI, 2019) constituyendo un problema ecológico. Una alternativa para reciclarlo es su implementación en la síntesis de nanomateriales. En esta investigación se propone el reciclado de vidrio de deshecho, mediante la extracción de silicato de sodio de dicho residuo, para utilizarlo como precursor para sintetizar nanopartículas mesoporosas de silicio (MSNs) tipo MCM-41, las cuales tienen diversas aplicaciones potenciales incluso como material cementicio suplementario (Byung-Wan Jo *et. al.*, 2007).

Palabras clave: MCM-41, silicio, vidrio, nanopartículas

Abstract

The generation of Urban Solid Waste in Mexico represents 107,055,547 million kilograms per day, of which about 7% belongs to discarded glass (INEGI, 2019) constituting an ecological problem. An alternative to recycling it is its implementation in the synthesis of nanomaterials. In this research, the recycling of waste glass is proposed, through the extraction of sodium silicate from said waste, to use it as a precursor to synthesize mesoporous silicon nanoparticles (MSNs) type MCM-41, which have various potential applications even as a material supplemental cementitious (Byung-Wan Jo *et. al.*, 2007).

Keywords: MCM-41, silicon, glass, nanoparticles.

1. Introducción

Cada año toneladas de residuos de vidrio terminan en basureros en todo el mundo sin un tratamiento adecuado, por lo cual se ha vuelto un problema de índole ambiental. México no es la excepción a esta situación, según la cifra más reciente publicada en 2019, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en nuestro país es 107 055.547 millones de kilogramos diarios de los cuales una proporción significativa le pertenece al vidrio desechado (INEGI, 2019). Por ello, se buscan diferentes alternativas de reciclaje para que sea menor el impacto ambiental debido a este tipo de residuo, una de las posibles soluciones a esta problemática sería la implementación de la nanotecnología.

El reúso y el reciclaje de materiales son fundamentales para reducir la contaminación de los ecosistemas y el ambiente en general; por lo cual es necesaria la aplicación de estas nuevas tecnologías, y en esta investigación se propone el reciclado de vidrio de deshecho mediante la extracción de silicato de sodio de dicho residuo, para la síntesis de nanopartículas mesoporosas de silicio tipo MCM-41.

2. Procedimiento

2.1 Fusión alcalina

Para obtener silicato de sodio a partir de vidrio plano se llevó a cabo un proceso conocido como fusión alcalina, utilizando diferentes relaciones molares de vidrio:NaOH (1:1, 1:2 y 1:3) tomando el vidrio como SiO₂ puro. Por ejemplo, para una concentración 1:1, se pesaron 1.5 g de vidrio molido en la balanza analítica con ayuda de una espátula y un vaso de precipitado, posteriormente se pesó 1 g de NaOH dentro de una capsula de porcelana donde se vertió el vidrio y se mezcló hasta homogenizar la muestra. A continuación, se introdujo la mezcla a la mufla por 1 hora a una temperatura de 500 °C. Al finalizar este proceso, se dejó reposar la muestra dentro de la mufla hasta alcanzar la temperatura ambiente, posteriormente se retiró de la mufla y se extrajo el Silicato de Sodio adicionando 20 mL de H₂O (8 veces agua) en un vaso de precipitado con ayuda de un agitador magnético, a temperatura ambiente, durante 24 horas. Posterior a la extracción, la muestra fue filtrada, tomando la solución para la síntesis tipo sol-gel.

2.2 Síntesis de nanopartículas

Para obtener nanopartículas mesoporosas de silicio tipo MCM-41 se utilizaron las soluciones de silicato de sodio previamente obtenidas en la etapa de fusión alcalina para llevar a cabo una síntesis tipo sol-gel en condiciones alcalinas. Para esto, se pesaron 0.2 g de CTAB en la balanza analítica con la ayuda de una espátula y un vaso de precipitado, posteriormente el CTAB fue vertido en un matraz de balón y se le agregaron 96 mL de agua destilada y 1.4 mL de NaOH 1M, agitando a mezcla a 80 °C en la placa de calentamiento hasta la disolución. Alcanzada la disolución, se agregó gota a gota, para cada síntesis, una de las soluciones de silicato de sodio con la concentración correspondiente 1:1, 1:2 o 1:3 obtenidas anteriormente en la etapa de fusión alcalina, se ajustó el pH a 11 añadiendo H₂SO₄, midiendo con ayuda de un potenciómetro, y se agitó con ayuda del agitador magnético por dos horas, a una temperatura de 80 °C en la placa de calentamiento. Por último, se filtró la solución con una bomba de vacío y la muestra sólida en el papel filtro fue introducida a la estufa a una temperatura de 50 °C hasta el secado.

2.3 Extracción de surfactante

Para retirar el surfactante de los mesoporos, se agregaron las nanopartículas obtenidas en la síntesis sol-gel en un matraz balón, al cual se le añadieron 60 mL de etanol y 1 mL de HCl puro, ésta mezcla fue puesta a

reflujo durante 24 h a una temperatura de 80 °C, posteriormente fue filtrada con la ayuda de una bomba de vacío e introducida a la estufa a 50°C para su secado.

3. Resultados

3.1 Fusión alcalina

FTIR

Las muestras obtenidas después de la fusión alcalina fueron analizadas por espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier para determinar los grupos funcionales presentes. Se encontró que todas las muestras presentan los siguientes picos característicos del silicato de sodio: un pico amplio en la región de 2923 a 3390 cm^{-1} proveniente de grupos OH del silanol y moléculas de agua adsorbida (Abo-El-Eneina, 2009); un pico cercano a 880 atribuido a la vibración de estiramiento de los enlaces Si-O-Si, un pico a 860 cm^{-1} correspondiente a la vibración simétrica del enlace Si-O, dos picos a 1000 cm^{-1} de la vibración de enlace Si-O-Na y a 1200 cm^{-1} correspondiente a la vibración asimétrica del enlace Si-O (Bin Li, 2019); (Jonas Nordström, 2011). Adicionalmente las muestras también presentan una absorción a 1650 cm^{-1} que podría ser atribuido a grupos OH de hidróxido de sodio que no reaccionó (Raffaele Vinaia, 2019).

Aunque todas las muestras presentan todos los picos correspondientes a enlaces presentes en las moléculas de silicato de sodio, se puede apreciar una diferencia en la intensidad y posición de los picos. Las muestras que presentan una mayor intensidad son las de concentración 1:2 y 1:3 lo cual indica una mayor concentración de silicato de sodio presente en estas muestras con respecto a la de concentración 1:1. Además, el pico encontrado a alrededor de 1000 cm^{-1} se mueve hacia valores de número de onda más bajos y el pico a 1200 cm^{-1} aumenta en intensidad según se aumenta la razón de $\text{SiO}_2:\text{NaOH}$, en ambos casos se muestra un pequeño hombro para la muestra de concentración 1:1 y un pico definido para las muestras de concentración 1:2 y 1:3, lo cual es evidencia de una mayor concentración de silicato de sodio en las dos últimas muestras. Estos resultados concuerdan con lo encontrado en la investigación realizada por Nordström et al. en 2011 en la que analizaron soluciones de silicato de sodio con diferentes concentraciones y encontraron mayor intensidad del espectro, un corrimiento hacia valores menores de número de onda del pico centrado a 1000 cm^{-1} y un aumento en la intensidad en el pico a 1200 cm^{-1} para las muestras más concentradas (Jonas Nordström, 2011).

SEM

El uso de esta técnica de caracterización fue aplicado en varias de las etapas realizadas para la obtención de las nanopartículas MCM-41. Dónde la primera fue la manipulación del vidrio molido, por lo cual antes de someter este material a una fusión alcalina se visualizó por medio de microscopía electrónica de barrido, donde se obtuvo una imagen de la estructura del vidrio puro siendo tomado como precursor de SiO_2 , obteniendo del mismo modo una base de comparación con el resultado visual del producto (silicato de sodio) obtenido de la fusión alcalina. Como resultado de la fusión alcalina se obtuvo un polvo de una apariencia bastante áspera e irregular, cual se analizó por microscopía electrónica de barrido, cual reflejó como resultado que la fusión alcalina a diferentes concentraciones logró cambiar visualmente la estructura original del vidrio molido.

Las imágenes obtenidas por SEM concuerdan con la información obtenida por FTIR cual nos indica que a mayor concentración de NaOH (1:3) se obtiene una mayor cristalización de silicato de sodio a partir del

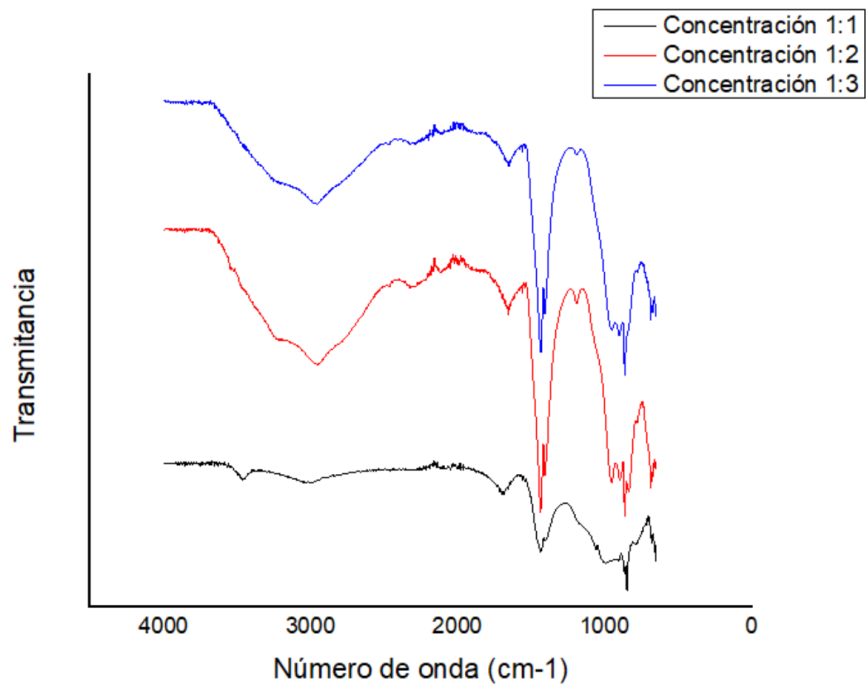


Figura 1. Resultados de la fusión alcalina en diferentes concentraciones (1:1, 1:2 y 1:3) analizados mediante FTIR.

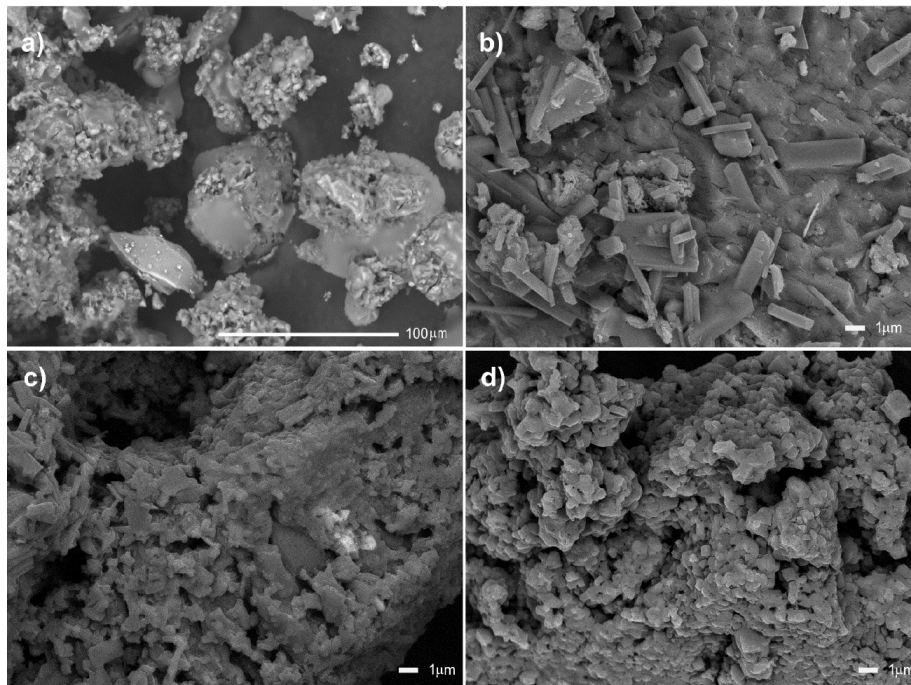


Figura 2. Producto obtenido después de la fusión alcalina, a) microscopia a 500 X de una muestra representativa, y a 5000 X de las muestras de concentración b) 1:1, c) 1:2 y d) 1:3.

vidrio, cual se muestra en el cambio de la estructura en cada concentración, obteniendo un material más definido en la concentración 1:3.

Posterior a la extracción del silicato de sodio, se filtró obteniendo un líquido traslúcido cual al ser analizado por medio de SEM se pudo observar ramificaciones que pueden ser atribuidas a cristales de silicato de sodio sin las características rugosas que había presentado la muestra después de la fusión alcalina.

XRD

El análisis XRD fue aplicado a tres diferentes muestras: vidrio antes de ser sometido a la fusión alcalina, vidrio después de la fusión alcalina y al material resultante de la extracción de silicato de sodio del vidrio posterior a la fusión alcalina. Los resultados reflejaron que el vidrio previo a la fusión alcalina no presenta materiales cristalinos al igual que el material resultante de la extracción de silicato de sodio, de igual manera se pudo observar que al aplicar la técnica de fusión alcalina, el vidrio cambia su estructura química reflejándose como fases cristalinas, donde se obtiene en gran medida el silicato de sodio.

Las principales diferencias entre los picos en cada concentración es la definición que optan, al igual de la formación de hombros. La muestra mostró un hombro de Si-OH en aproximadamente 3400 que se atribuye a los silanoles de la superficie dentro de los grupos hidroxilo internos y externos de la estructura mesoporosa y también señala moléculas de agua adsorbidas (Izabela Majchrzak-Kucęba, 2011), la gráfica muestra que en la concentración 1:1 tiene una mayor presencia de Si-OH que la concentraciones 1:2 y asemejándose a la concentración 1:3.

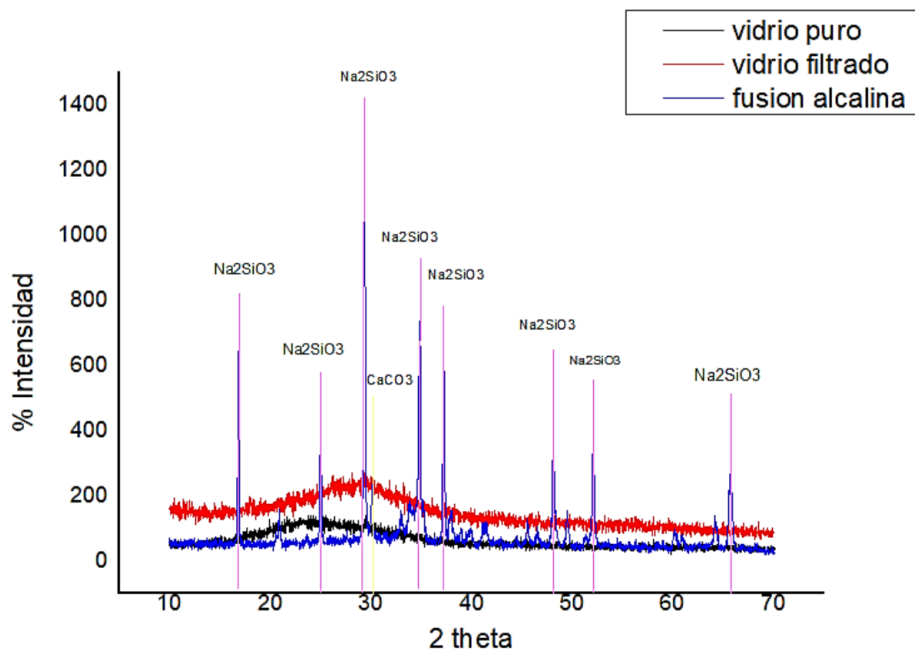


Figura 3. Análisis XRD con muestra de vidrio, vidrio con fusión alcalina y material resultante de la extracción de silicato de sodio.

3.2 Síntesis de nanopartículas

FTIR

Mediante el análisis FTIR fue posible encontrar grupos funcionales, donde en la concentración 1:1 se obtuvo: $790-800\text{ cm}^{-1}$ cual se toma como estiramiento asimétrico Si-O-Si (Izabela Majchrzak-Kucęba, 2011), alrededor de 960 cm^{-1} se muestra en la literatura como estiramiento de flexión de grupos Si-O (Zhen-Shu Liu, 2014), el análisis también reflejó una vibración interna del grupo Si-O que según la biografía se encuentra $1030-1105\text{ cm}^{-1}$, al igual que se encontró la presencia del grupo O-H con el valor de 1638 cm^{-1} (Izabela Majchrzak-Kucęba, 2011). La concentración 1:2 y 1:3 tuvo pequeñas variaciones respecto a la primera concentración, estas variaciones fueron dentro de los rangos señalados de los grupos funcionales presentes en la concentración 1:1.

Las principales diferencias entre los picos en cada concentración es la definición que optan, al igual de la formación de hombros. La muestra mostró un hombro de Si-OH en aproximadamente 3400 cm^{-1} que se atribuye a los silanoles de la superficie dentro de los grupos hidroxilo internos y externos de la estructura mesoporosa y también señala moléculas de agua adsorbidas (Izabela Majchrzak-Kucęba, 2011), la gráfica muestra que en la concentración 1:1 tiene una mayor presencia de Si-OH que la concentración 1:2 y asemejándose a la concentración 1:3.

SEM

Este análisis nos permitió visualizar el tamaño y la forma de las nanopartículas obtenidas en las mismas condiciones de la síntesis a diferentes concentraciones. En la concentración 1:1 se obtuvieron nanopartículas

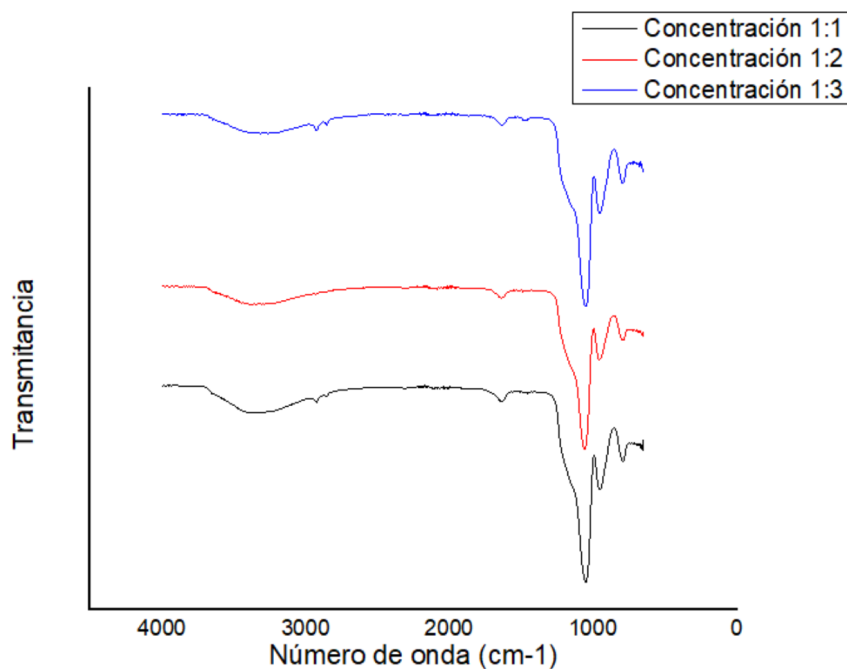


Figura 4. Resultados de la síntesis de nanopartículas en diferentes concentraciones (1:1, 1:2 y 1:3) analizados mediante FTIR.

con un promedio de diámetro de 180 nm, las nanopartículas en concentración 1:2 tuvieron como promedio de diámetro 170 nm, y las nanopartículas que se obtuvieron en la concentración 1:3 fue de 300 nm. Estos resultados nos reflejan que las nanopartículas de la concentración 1:3 tuvieron un diámetro más grande de lo esperado ya que las nanopartículas obtenidas de la concentración 1:2 fueron más cercanas a lo esperado. El cambio de concentración SiO₂:NaOH respecto a las condiciones de la síntesis (pH, temperatura, surfactante, presión, etc.) puede modificar el tamaño de las nanopartículas de éste tipo.

SAXRD

A través del análisis de los resultados de SAXRD se puede determinar el tipo de estructura de poros de materiales mesoporosos. Para materiales tipo MCM-41, el cual corresponde a un ordenamiento hexagonal de los poros, se presentan los picos correspondientes a los planos cristalográficos (100), (110) y (200) (Landau, y otros, 1999). El difractograma de la muestra 1:1 no muestra ningún pico, mientras que los de las muestras

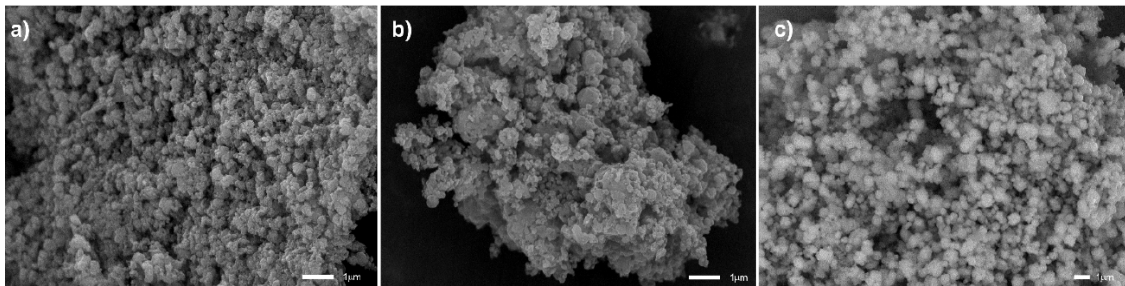


Figura 5. Nanopartículas de silicato de sodio en: a) concentración 1:1, b) concentración 1:2, c) concentración 1:3.

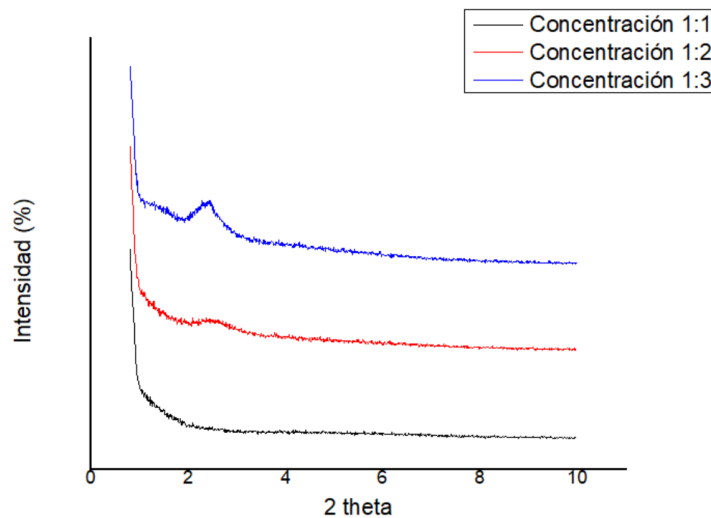


Figura 6. Resultado de análisis SAXRD de las nanopartículas en diferentes concentraciones (1:1, 1:2 y 1:3).

1.2 y 1:3 presentan un solo pico correspondiente al plano cristalográfico (100), dicha señal de difracción es características de la estructura mesoporosa hexagonal, según ha sido reportado por diversos autores, la presencia de este pico representa cierto orden en los poros, por lo cual se confirma la estructura deseada en las nanopartículas (Da Silva, 2019) (Rahmani y Gary-Bobo, 2017). La literatura menciona que la razón de la variación en la difracción es por debido al cambio durante la síntesis de las nanopartículas en las diferentes concentraciones (da Silva, 2019). Los resultados revelan que al tener una mayor concentración de SiO₂, se obtiene mayor intensidad en el pico presentado, por lo que se obtiene una mayor presencia de la red hexagonal característica del material MCM-41, lo que se toma como un mayor ordenamiento de poros al incrementar la concentración de NaOH respecto a SiO₂.

4. Conclusiones

La aplicación de un procedimiento de fusión alcalina a vidrio de deshecho demostró ser una técnica adecuada para cambiar las características fisicoquímicas del vidrio y para obtener como producto de dicho proceso silicato de sodio, además de que se llevó a cabo una correcta extracción de éste producto, para formar soluciones translúcidas de silicato de sodio, las cuales aumentan su concentración conforme se aumenta la relación SiO₂:NaOH, según lo observado por FTIR, SEM y XRD. También se demostró que las soluciones de silicato de sodio obtenidas pueden ser utilizadas como precursores de una síntesis sol-gel para el crecimiento de nanopartículas tipo MCM-41, dando como resultado nanopartículas de una morfología esférica de aproximadamente 180 nm de diámetro, excepto la muestra 1:3 que tuvo un diámetro promedio de 300 nm, según se observó por SEM, y con una estructura hexagonal de los poros como corroboran los resultados de SAXRD; sin embargo, mediante el análisis de resultados de FTIR se puede concluir que el método de extracción del surfactante no fue eficiente por completo, ya que se pueden observar picos característicos de la molécula de CTAB presentes como residuo en el producto final, es decir, las nanopartículas.

5. Agradecimientos

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN; financiado por los proyectos FOMIX-Yucatán 2008-108160, CONACYT LAB-2009-01-123913, 292692, 294643, 188345 y 204822. Se agradece a la Dra. Patricia Quintana por el acceso a LANNBIO, al M.C Daniel Aguilar Treviño por la obtención de los difractogramas y al Ing. Emilio Corona por mantenimiento correctivo difractor D-8 advance.

6. Referencias

- Abo-El-Encina, M. E. (2009). Removal of some heavy metals ions from wastewater by copolymer of iron and aluminum impregnated with active silica derived from rice husk ash. *ELSEVIER*.
- Alejandro Mata, C. G. (2014). *Reciclaje de vidrio*. Obtenido de <http://genesis.uag.mx/posgrado/revistaelect/calidad/cal010.pdf>.
- Alonso-Núñez, G. (2008). Nanoquímica: Ingeniería de Nanomateriales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 12*, 45.
- Alpedrete, A. d. (04 de 05 de 2018). *Ayuntamiento de Alpedrete*. Obtenido de <https://www.alpedrete.es/1-botella-vidrio-tarda-4000-anos-degradarse-alpedrete-recogio-201-195-kg-2017/>
- Ana Claudia P. da Silva, P. H. (2019). Synthesis of Highly Ordered Mesoporous MCM-41: Selective External Functionalization by Time Control. *JBCS*.
- Bin Li, H. L. (2019). Calcined sodium silicate as an efficient and benign heterogeneous catalyst for the transesterification of natural lecithin to L- α -glycerophosphocholine. *DE GRUYTER*.
- C. Jeffrey Brinker, G. W. (1990). *SOL-GEL SCIENCE The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. San Diego: ACADEMIC PRESS INC.
- C. T. Kresge, M. E. (1992). Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by liquid-crystal template mechanism. *Nature*.
- Charles P. Poole, F. J. (2007). *Introducción a la nanotecnología*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Da Silva, A. C. (2019). Synthesis of highly ordered mesoporous MCM-41: Selective external functionalization by time control. *Journal of the Brazilian Chemical Society*.
- Duangkamol Ruen-ngam, D. R. (2012). Zeolite Formation from Coal Fly Ash and Its Adsorption Potential. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Elias, X. (2009). *reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Diaz de Santos.
- Goerne, T. M. (2011). *Nanotecnología y nanomedicina: la ciencia del futuro... hoy*. D.F México: ARKHÉ.
- INEGI. (2019). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de Mexico 2019*. México.
- Izabela Majchrzak-Kuceba, W. N. (2011). Characterization of MCM-41 mesoporous materials derived from polish fly ashes. *ELSEVIER*.
- J. Rouquerol, D. A. (2009). Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*.
- Jonas Nordström, E. N. (2011). Concentration- and pH-dependence of highly alkaline sodium silicate solutions. *ELSEVIER*.
- Kanellopoulos, N. (2011). *Nanoporous Materials Advanced Techniques for Characterization, Modeling, and Processing*. United States of America: CRC PRESS.
- L. Ratke, P. V. (2002). *Growth and coarsening*. New York: Springer.
- Landau, M., Varkey, S., Herskowitz, M., Regev, O., Pevzner, S., Sen, T., & Luz, Z. W. (1999). Stability of Si-MCM-41 mesoporous material in neutral, acidic and basic aqueous solutions. *ELSEVIER*.
- Laura Crociana, L. R. (2019). *Smart Nanocontainers*. United States of America: Phuong Nguyen-Tri, Trong-On Do and Tuan Anh Nguyen.
- Milán, N. L. (2007). *Del concepto a la materia. Hacia una poética del vidrio*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Navarro, J. M. (2003). *El Vidrio*. Madrid, España: ARTEGRAF S.A.

- Pearson, C. (2009). *Manual del Vidrio Plano*. Argentina: TOD Producciones S.A.
- Raffaele Vinaia, M. S. (2019). Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali activation of alternative binders. *ELSEVIER*.
- Rahmani, S. D., & Gary-Bobo, M. (2017). Synthesis of mesoporous silica nanoparticles and nanorods: Application to doxorubicin delivery. *Solid State Sciences*.
- Röben, E. (2003). El Reciclaje Oportunidades Para Reducir la Generación de los Desechos Sólidos y Reintegrar Materiales Recuperables en el Círculo Económico. *Servicio Alemán de Cooperación Social Técnica*.
- Sandra Maria Lopes dos Santos, K. A. (2013). Síntesis y caracterización de sílice mesoporosa ordenada (SBA-15 y SBA-16) para la adsorción de biomoléculas. *ELSEVIER*.
- SEMARNAT. (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*.
- Thibaud Coradin, M. B. (2006). Sol-gel Chemistry in Medicinal Science. *Current Medicinal Chemistry*.
- Tuel, N. L. (2004). A Fast and Efficient Ion-Exchange Procedure To Remove Surfactant Molecules from MCM-41 Materials. *Chem mater*.
- Vesco, L. P. (2006). *Residuos solidos urbanos: su gestion integral en Argentina*. Argentina: Universidad Abierta Interamericana.
- William Alejandro Talavera Pech, A. E. (2016). Effects of different amounts of APTES on physicochemical and structural properties of amino-functionalized MCM-41-MSNs. *Springer Science*.
- Xavier Domenech, J. P. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Yoerquis Mejias Sánchez, N. C. (2009). La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. *Revista Cubana de Salud Pública*, 35.
- Zhen-Shu Liu, W.-K. L.-Y. (2014). Síntesis de materiales de sílice mesoporosos a partir de cenizas de fondo del incinerador de residuos sólidos. *ELSEVIER*.



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Evaluación electroquímica en la unión soldada disímil de acero inoxidable austenítico y acero al carbono expuesta en zona de marea para aplicaciones estructurales

J. C. I. Ramírez Soto¹, T. Pérez López¹, J.T. Pérez Quiroz²

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

² Instituto Mexicano del transporte

Autor de Contacto: jcirs@hotmail.com

Resumen

En la actualidad las uniones disímiles se han usado como una alternativa para contrarrestar el problema de corrosión en algunas industrias como la aeronáutica, química, pero no en reparaciones portuarias. En este trabajo, se evaluaron uniones disímiles embebidas en dos tipos de concreto con dos relaciones $w/c=0.45$ y 0.65 las cuales se expusieron en un prototipo que simuló las condiciones de variación de marea. Los metales utilizados fueron acero ASTM A615 y acero inoxidable austenítico AISI 304 con un bisel en doble v a 30° , usando como metal de aporte un electrodo 309L. Las uniones fueron evaluadas con distintas técnicas electroquímicas en un equipo Gamry Interface 1000 (Ecorr, RP, EIS y RN) para conocer el comportamiento con respecto a los ciclos de mojado y secado. Los resultados muestran que las varillas se encuentran pasivas, con valores de I_{corr} del orden de $0.1 \mu A/cm^2$ y resistencia a la transferencia de carga de $1E+11 \Omega/cm^2$, mostrando corrosión localizada según criterio del índice de localización.

Palabras clave: Soldadura; Corrosión; Concreto; Restauración.

Abstract

In this days, the dissimilar welds have been used as an alternative to counteract the corrosion problem in some industries such as aeronautics, but not in port repairs. In this work, dissimilar joints embedded in two types of concrete with two relationship $w/c=0.45$ and 0.65 were evaluated, which were exposed in a prototype that simulated tidal variation conditions. The base metals used were ASTM A615 steel and AISI 304 austenitic stainless steel, one of the rebar end was sharpened form a bevel with an angle of 30° , and an electrode 309L was used as filler metal. The welds were evaluated with different electrochemical techniques in a Gamry Interface 1000 equipment (Ecorr, RP, EIS y RN) to know the behavior with

respect to the wetting and drying cycles carried out in the tidal variation cell. The results show that the rods are passive, with I_{corr} values of the order of $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ and resistance to charge transfer of $1\text{E}+11 \Omega / \text{cm}^2$, showing localized corrosion according to the localization index criteria.

Keywords: Welding; Corrosion; Concrete; Restoration

Resumo

Atualmente, as soldas dissimilares têm sido utilizadas como alternativa para neutralizar o problema de corrosão em algumas indústrias, como aeronáutica, mas não em reparos portuários. Neste trabalho foram avaliadas juntas dissimilares embutidas em dois tipos de concreto com duas relações $w/c = 0.45$ e 0.65 , as quais foram expostas em um protótipo que simulava condições de variação de maré. Os metais básicos utilizados foram o aço ASTM A615 e o aço inoxidável austenítico AISI 304, uma das pontas da haste foi afiada com ângulo de 30° e um eletrodo 309L foi utilizado como metal de adição. As soldas foram avaliadas com diferentes técnicas eletroquímicas em um equipamento Gamry Interface 1000 (Ecorr, RP, EIS y RN) para conhecer o comportamento em relação aos ciclos de umedecimento e secagem realizados na célula de variação de maré. Os resultados mostram que as hastes são passivas, com valores de I_{corr} da ordem de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e resistência à transferência de carga de $1\text{E}+11 \Omega/\text{cm}^2$, apresentando corrosão localizada de acordo com os critérios do índice de localização.

Palavras-chave: Soldagem; Corrosão; Concreto; Restauração

1. Introducción

Durante los inicios del Siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en estructuras como puentes, edificios, barcos entre otros, convirtiéndose en una técnica fundamental en la industria automotriz, aeroespacial, construcción y en otras industrias donde es necesario la unión entre metales (Loboa, 2006).

La preservación de la infraestructura civil en muelles es de vital importancia económica y social, puesto que brinda servicio y seguridad para el desarrollo de las sociedades. En las últimas décadas, el material de construcción más utilizado en obras civiles es el concreto reforzado, cuyas propiedades mecánicas y químicas le confieren durabilidad prolongada. Sin embargo, se han reportado casos de deterioro de concreto debido a la corrosión de armadura embebida, debido a la penetración de iones cloruros a través del concreto (Pérez, 2009).

En el 2013 la NACE (National Association of Corrosion Engineers) realizó un informe de los costos relacionados con la corrosión, el cual se estima en US \$2.5 trillones de dólares, lo cual equivale al 3.4 % del PIB mundial (2013). Hace mención que, si se implementaran las prácticas en control de corrosión disponibles, se tendría un ahorro de entre 15 y 35 %, es decir entre US \$375 y \$875 mil millones al año a nivel mundial (Nace, 2016).

El acero inoxidable 304L es recomendable su uso como varilla de refuerzo en ambientes más susceptibles a la corrosión, como zonas donde estén en contacto con ambientes altamente agresivos, como zonas costeras, suelos contaminados y zonas industriales (Baltazar, 2007).

Regularmente los puentes y muelles en México están construidos con acero de refuerzo (acero al carbono), por lo cual su resistencia contra medios agresivos como zonas costeras (iones cloruros) es limitada. Existen métodos que actúan sobre la conservación de las armaduras, como la protección catódica, que puede ser

efectiva, pero requiere un mantenimiento constante por personal calificado; Otro método son las armaduras recubiertas con epoxi o galvanizadas, las cuales presentan el inconveniente del deterioro que puede sufrir la capa protectora durante el transporte y la manipulación, dejando puntos susceptibles de ataque por los que la corrosión puede avanzar incluso por debajo de dicha capa. El empleo de armaduras de acero inoxidable es el único método que ha demostrado su eficacia para lograr una gran durabilidad de las estructuras de hormigón, especialmente en ambientes agresivos y en presencia de cloruros (Medina, 2013).

Se ha recomendado el uso de acero inoxidable 304L como varilla de refuerzo en ambientes más susceptibles a la corrosión, como zonas donde estén en contacto con ambientes altamente agresivos, tales como zonas costeras, suelos contaminados y zonas industriales para incrementar la vida útil de estructuras de concreto reforzado (Baltazar, 2007).

En la actualidad existen pocos estudios que evalúen el comportamiento de sustituir acero inoxidable en estructuras ya construidas como medio de reparación, siendo enfocados a las secciones sumergidas. En este trabajo se simulará una estructura de concreto reforzado en la zona de variación de marea, con el propósito de corroborar una efectividad gracias a las propiedades que posee el acero inoxidable al acoplarlo al acero al carbono convencional utilizado en construcción.

2. Procedimiento

Se utilizaron varillas de 10 cm de longitud de dos metales base distintos, acero de bajo carbono ASTM A615 y acero inoxidable AISI 304, el metal de aporte fue un electrodo 309L. Previo al proceso de unión se maquinaron las varillas con bisel doble V llamado también “punta de lápiz” a 30° (figura 1), el proceso para unir las probetas fue por la técnica de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), usando una soldadora Castoli Eutectic Master NT200 AC/DC. Después de cada cordón de soldadura aplicado, se removió la escoria formada superficialmente con un taladro con carda, evitando la generación de poros internos, para mejorar las propiedades en la unión. Posteriormente se enfrió al aire hasta temperatura ambiente.

Seis de las muestras soldadas fueron embebidas en dos tipos de concretos con diferente relación agua / cemento (0.45 y 0.65) 3 de cada una, usando moldes de 5.08 cm de diámetro y 27 cm de longitud, se les adiciono un cable de cobre para poder tomar lecturas en las pruebas electroquímicas, Las probetas con varilla se mantuvieron sumergidas durante 28 días en depósitos llenos de agua saturada de cal, como lo menciona la norma ASTM C31 (ASTM, ASTM C31 / C31M - 18 Standard Practice for preparation and curing concrete test specimens in the work). Se diseñó y desarrolló una celda para simular la variación de marea, realizando ciclos de mojado y secado del concreto, utilizando una solución de 3.5 % en peso de NaCl, La figura 2 representa la simulación del proceso del mojado de las probetas por efecto de la variación de la marea con respecto al tiempo. Los ciclos fueron proyectados con base a las cartas de marea reportadas en la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche, revisada el día 26 de septiembre del 2017.

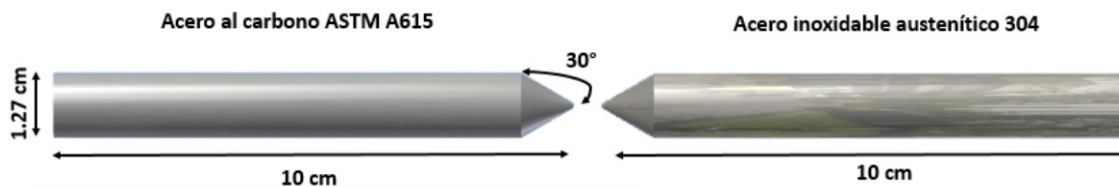


Figura 1. Boceto del bisel.

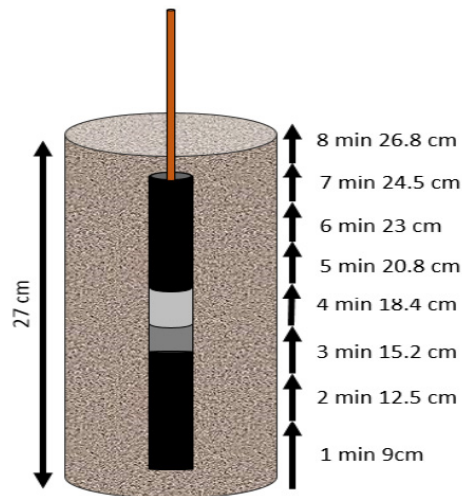


Figura 2. Representación de los ciclos de mojado y secado de las probetas.

Las probetas se identificaron de acuerdo a la siguiente 4 pro es el promedio de las probetas con relación $a/c=0.45$ y 6 pro es el de las probetas con relación $a/c=0.65$.

2.1 Evaluaciones electroquímicas

2.1.1 Potencial de corrosión

Se realizaron mediciones de potenciales de corrosión (E_{corr}) utilizó un multímetro marca Fluke 867B usando como referencia un electrodo Ag/AgCl marca Gamry, dicha medición se realizó mediante las especificaciones de la norma ASTM C 876 (ASTM, ASTM C-876-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete., 1991). Los E_{corr} se registraron hasta que fueron estables según la norma ASTM G3 (ASTM, ASTM G3 - 14 Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, 2014),

2.1.2 Resistencia a la polarización (R_p)

Se usó un arreglo típico de 3 electrodos usando como referencia un electrodo Ag/AgCl y un contra electrodo de grafito, las pruebas se realizaron en un equipo Gamry Interfase 1000 conectado a una laptop para la adquisición de los datos. Se llevó a cabo un barrido de ± 20 mV con respecto al E_{corr} , con un rango de avance de 0.125 mV/s, esto con base a la norma ASTM G59 (ASTM, ASTM G59 - 97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, 2014), G5 (ASTM, ASTM G5 - 14 Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, 2014). Los datos se analizaron con el software CorrView 2.

2.1.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

Se usó el mismo arreglo de 3 electrodos mencionados en la sección 5.6.2. aplicando una perturbación de ± 30 mV de amplitud con respecto al E_{corr} con un barrido de frecuencia de 100,000 Hz, a 0.01 Hz (10 puntos por década), con respecto a las normas ASTM G106 (ASTM, ASTM G106 - 89 Standard Practice

for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements, 2015), G3 (ASTM, ASTM G3 - 14 Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, 2014). Los datos se analizaron con el software ZView 2.

2.1.4 Ruido electroquímico (EN).

Se usó un arreglo de 3 electrodos: como electrodo de trabajo se utilizó la probeta evaluada, como el de referencia Ag/AgCl y el electrodo auxiliar fue una probeta “idéntica” a la que se evaluó según la norma ASTM G199 (ASTM, ASTM G199 - 09 Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement, 2014). Se tomaron 1024 puntos para ser analizados los resultados.

3. Resultados

3.1 Resultado de E_{corr}

Se realizó el monitoreo e interpretación del potencial de corrosión de las probetas de soldadura disímil embebida en concreto y expuesta a la variación de marea. La tabla 1 muestra los valores del criterio de probabilidad de corrosión en los rangos de potencial medidos con el electrodo Ag/AgCl (Silvia Izquierdo García, 2013).

Los resultados de las mediciones de potencial de las probetas expuestas en variación de marea se muestran en la figura 3, en donde es posible observar que los potenciales en los primeros días de exposición la mayoría de las probetas están en la región de zona incierta de probabilidad de corrosión ($E_{corr} > -250$ mV), pero

Tabla 1. Criterio de probabilidad de corrosión.

E_{corr} vs Ag/AgCl (mV)	Probabilidad de Corrosión
>-100	Baja (10% de riesgo)
-100 a -250	Intermedia (Zona incierta)
<-250	Alta (90% de riesgo)
<-500	Severa

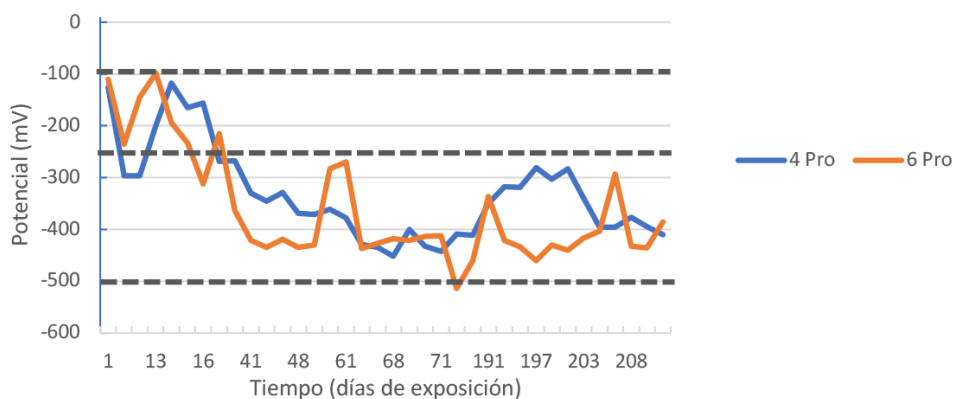


Figura 3. Resultados del potencial de corrosión, corresponde al promedio.

alrededor del día 27 de exposición los potenciales decaen hacia la zona de alta probabilidad de corrosión. La variación de los potenciales (picos) están ligados a la humectación de las probetas, ya que las probetas se encuentran expuestas a la variación de marea, de acuerdo a Manual Durar 1998 (DURAR, 1998)

Se observa que la variación de los potenciales tiende a zona de alta probabilidad de corrosión ($E_{corr} < -250\text{mV}$) independientemente de la relación agua cemento. Los resultados corresponden a la polarización del acero al carbono en solución de salina (-300 a -500 mV) (Baltazar-Zamora, 2012) (Izquierdo García, 2013), mientras que los potenciales del acero AISI 304 están en el rango de (-50 a -150 mV) (Duarte, 2014). Los resultados sugieren que los potenciales obtenidos podrían corresponder a los potenciales del metal más activo que es el acero al carbono de acuerdo a la norma ASTM G82. Los potenciales de la unión soldada coinciden con los reportados por Pérez *et al.* (2014), en donde se encuentra la misma soldadura disímil expuesta en ambientes salinos.

3.2 Resultados de Rp

Los valores de Rp se usaron para obtener la densidad de corriente (i_{corr}) aplicando la ecuación de Stern-Geary (Ecuación 1), en esta se representa una constante de la pendiente de Tafel del sistema $B=0.026$ este valor simula una condición activa de corrosión, para así conocer la (i_{corr}) del sistema (Silvia Izquierdo García, 2013) (Ha-Won Song, 207). En la literatura se muestra un criterio de pasividad con base a la (i_{corr}), el cual se muestra en la tabla 2 (Andrade, 1990).

$$I_{corr} = \frac{B}{Rp} \quad (1)$$

Los resultados de i_{corr} obtenidos son similares a los correspondientes al acero inoxidable AISI 304 reportados en la literatura ($1\text{E}-8$ a $1\text{E}-9$ A/cm²) (M.C.García-Alonso, 2007), ya que la densidad de corriente para acero estructural está en el rango de ($1\text{E}-6$ a $1\text{E}-5$ A/cm²) (G. Santiago-Hurtado, 2016).

A pesar de que sus E_{corr} se encuentren en la zona de corrosión esta es una medida termodinámica, el i_{corr} es cinético, lo que puede estar pasando es que la velocidad de la reacción anódica (de oxidación del acero al carbono) es demasiado lenta ya que se encuentra controlada por la reacción catódica (reducción de oxígeno en el acero inoxidable), y trabajos anteriores demuestran que en la superficie del acero inoxidable existe un bloqueo eléctrico parcial por parte de la capa de óxido de cromo formada en su exterior genera una resistencia específica para que la transferencia de electrones sea inferior que en el acero al carbono, donde toda su superficie es conductora (Novoa, 2013).

Tabla 2. Criterio de corriente de corrosión.

i_{corr} (A/cm ²)	Nivel de corrosión
$\leq 1\text{E}-7$	Despreciable (pasivo)
$1\text{E}-7 - 5\text{E}-6$	Bajo
$5\text{E}-6 - 1\text{E}-6$	Moderado
$> 1\text{E}-6$	Alto

3.3 Resultados de EIS

Para analizar los diagramas de Nyquist y Bode obtenidos por la técnica de EIS se utilizó un circuito equivalente tipo Randles (Guojian Liu, 2017), esto para conocer el valor de Resistencia a la transferencia de carga (Rct).

Se realizó el gráfico con los promedios de las Rct para las distintas relaciones agua cemento, se muestra en la figura 5, en donde se puede observar que los valores de las probetas con relación a/c=0.45 son más resistivas que las de a/c=0.65, esto se debe a la porosidad del concreto, ya que si es más poroso baja su Rct.

En la figura 6 se muestra los i_{corr} obtenidos con la técnica de impedancia. Podemos observar que la tendencia de las probetas con relación a/c=0.65 tiende a despasivarse, mientras que los resultados para las probetas con relación a/c=0.45 se mantienen en la zona de pasividad. Si se compara con los resultados obtenidos de la técnica Rp es factible observar una similitud en los resultados.

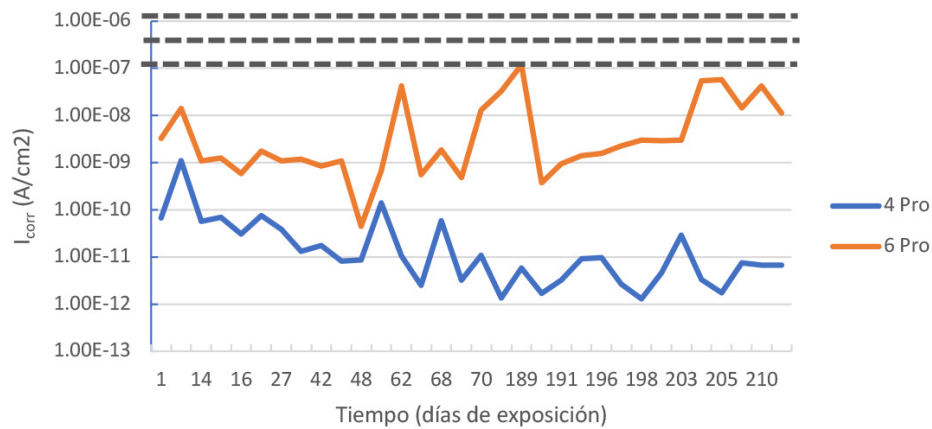


Figura 4. Resultado promedio de i_{corr} .

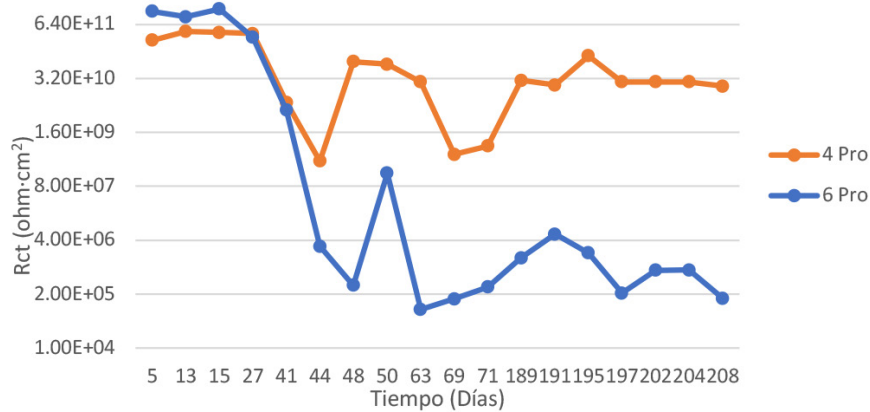


Figura 5 Resultados promedio de Rct.

3.4 Resultados de EN

En la figura 7 se muestran los resultados para el IL, en donde el grafico se divide en tres secciones donde cada zona corresponde a un tipo de corrosión preferencial: en el rango de 0.001 a 0.01 corresponde a corrosión uniforme, de 0.01 a 0.1 la corrosión es una combinación de localizada y uniforme llamada mixta, de 0.1 a 1 corresponde a corrosión localizada. Se observa que las probetas están en la región de corrosión localizada, esto puede ser atribuida a la utilización mayoritaria de acero inoxidable austenítico en la unión soldada (metal base y aporte).

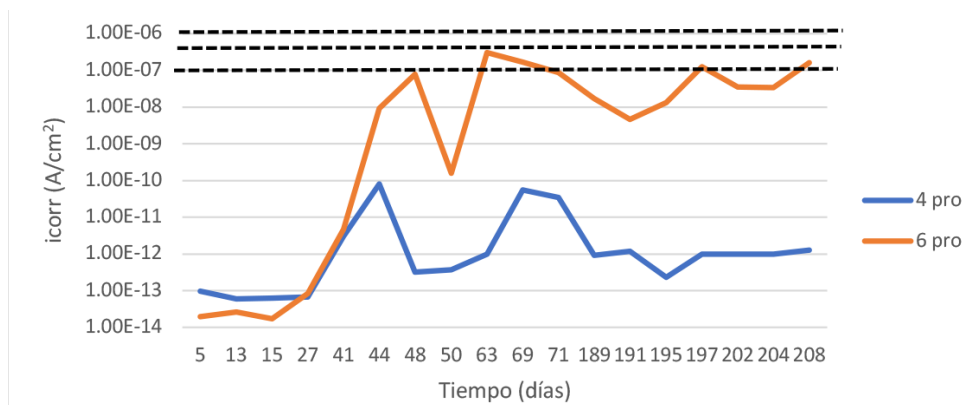


Figura 6. Resultados promedio de i_{corr} .

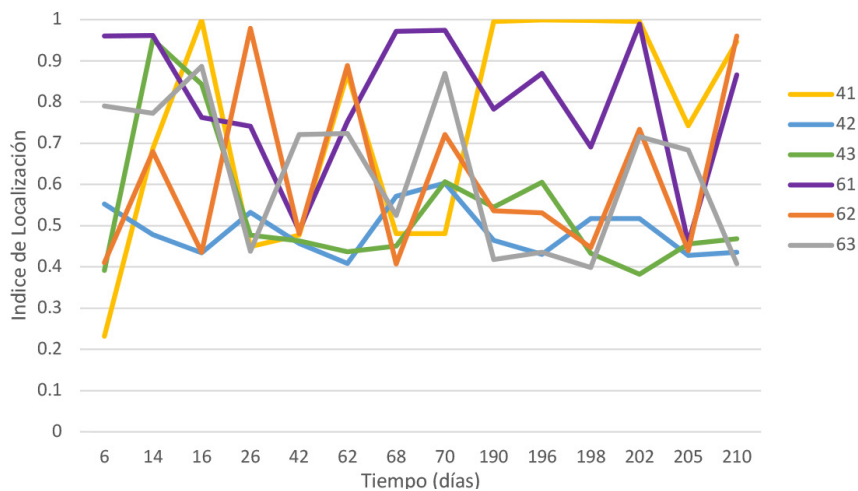


Figura 7. Resultados de índice de localización.

4. Conclusiones

La unión disímil acero al carbono-acero inoxidable con acero inoxidable 309L como material de aporte embebida en concreto mantuvo la pasividad durante la exposición de condiciones de variación de marea según se observa en los datos obtenidos.

El E_{corr} no es un parámetro definitivo para confirmar la activación o pasivación de las varillas disímil soldada embebida, sin embargo, es factible afirmar que el valor registrado predominante es el del metal más activo.

Mediante la medición de i_{corr} es posible identificar condiciones cinéticas de pasivación de la interfaz concreto-soldadura disímil.

5. Agradecimientos

A los integrantes del CICORR y IMT, por el apoyo brindado y amistad.

6. Referencias

- ASTM. (1991). ASTM C-876-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete. ASTM.
- ASTM. (2014). ASTM G199 - 09 Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement. ASTM.
- ASTM. (2014). ASTM G3 - 14 Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM.
- ASTM. (2014). ASTM G5 - 14 Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM.
- ASTM. (2014). ASTM G59 - 97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM.
- ASTM. (2015). ASTM G106 - 89 Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. ASTM.
- ASTM. (s.f.). ASTM C31 / C31M - 18 Standard Practice for preparation and curing concrete test specimens in the work. ASTM.
- Baltazar, M. (2007). Corrosion del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos. *Scientia et Technica Año XIII*, 353-357.
- Baltazar-Zamora, M.-B. O.-C. (2012). EFICIENCIA DE PRIMARIOS APLICADOS EN BARRAS DE ACERO 1018 EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO AL AMBIENTE DE LA CD. DE BOCA DEL RIO, VER. *Congreso Nacional ALCONPAT*.
- C.Andrade, M. J. (1990). An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete. *ASTM STP*, 29-37.
- DURAR, R. I. (1998). *Manual de Inspección. Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- E. Medina, D. B. (2013). Introduccion. *Armaduras de acero inoxidable*, 1-22.
- G. Santiago-Hurtado, M. B.-Z.-C. (2016). Electrochemical Evaluation of a Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Exposed to Chloride. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 10, 2994 - 3006.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

- Guojian Liu, Y. Z. (2017). Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits. *Construction and Building Materials*, 157, 357-362.
- Ha-Won Song, V. S. (2017). Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. *International Journal of Electrochemical Science*, 2, 1-28.
- Lobo, C. (2006). *Welding Process In The Engineering*.
- M.C.García-Alonso, J. (2007). Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar. *Cement and Concrete Research*, 31, 1562-1569.
- Nace, I. (2016). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. *Nace Impact*, 1-6.
- Novoa, X. R. (2013). Pasividad de los aceros inoxidables en hormigón. *Armaduras de acero inoxidable*, 67-80.
- Perez-Quiroz, J. (2014). Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise. *International Electrochemical Science*, 6744-6750.
- R.G.Duarte, M. M. (2014). Corrosion Behavior of Stainless Steel Rebars Embedded in Concrete: an Electrochemical Impedance Spectroscopy Study. *Electrochimica Acta*, 124, 218-224.
- Silvia Izquierdo García, F. J. (2013). Evaluación de la corrosión de un acero embebido en morteros adicionados con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC). *Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 31(1), 22-38.
- T.Pérez. (2009). Aplicación de la Técnica Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto. *Programa de Corrosión del Golfo de México*.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Factibilidad del uso de nanopartículas base silicio como tratamiento superficial para prevenir el ataque físico y químico de sulfatos en el concreto

D. L. Silva^{1,2}, V. Romero¹, D. Cruz-Moreno¹, G. Fajardo¹, G. Escadeillas²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

² LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS. Toulouse, France

Autor de Contacto: dione_luiza@hotmail.com

Resumen

Este trabajo investiga la factibilidad del tratamiento superficial con nanopartículas base silicio simple (NS) y funcionalizadas (NF) en morteros, para prevenir el ataque químico y físico de sulfatos. Las NS y NF, fueron producidas mediante la ruta sol-gel y caracterizadas por FRX, DRX, TEM y FTIR. Además, se produjeron morteros cilíndricos y prismáticos de cemento portland ordinario (CPO) y resistente a los sulfatos (CPC), que fueron tratados con una dispersión al 0.1% de NS y NF. Los morteros prismáticos fueron inmersos a una solución al 5% de Na_2SO_4 , para inducir el ataque químico, y los morteros cilíndricos fueron parcialmente inmersos, para inducir el ataque físico. Finalmente, los morteros fueron caracterizados mediante DTA/TGA y por medición del ángulo de contacto. Se observó que las NS no contribuyeron para la reducción de la expansión de los morteros sometidos al ataque químico de sulfato de sodio. Sin embargo, los morteros de RS que fueron tratados con NS y NF presentaron la menor pérdida de masa y deterioro.

Palabras clave: Nanopartículas de silicio; Tratamiento superficial; Ataque por sulfatos; Durabilidad.

Abstract

This work investigates the feasibility of surface treatment with simple silicon-based (NS) and functionalized (NF) nanoparticles in mortars, to prevent the chemical and physical attack of sulfates. The NS and NF were produced by the sol-gel route and characterized by XRF, XRD, TEM and FTIR. In addition, cylindrical and prismatic mortars were produced from ordinary portland cement (CPO) and resistant to sulphates (CPC), which were treated with a 0.1% dispersion of NS and NF. The prismatic mortars were immersed in a 5% Na_2SO_4 solution, to induce the chemical attack, and the cylindrical mortars were partially immersed, to induce the physical attack. Finally, the mortars were characterized by ADT/ATG and by measuring the contact angle. It was observed that the NS did not contribute to the reduction of the expansion of the mortars

subjected to the chemical attack of sodium sulfate. However, the RS mortars that were treated with NS and NF presented the least loss of mass and deterioration.

Keywords: Silicon nanoparticles; Surface treatment; Sulfate attack; Durability.

Resumo

Este trabalho investiga a viabilidade do tratamento superficial com nanopartículas simples à base de silício (NS) e funcionalizadas (NF) em argamassas, para prevenir o ataque químico e físico dos sulfatos. As NS e NF foram produzidas pelo método sol-gel e caracterizadas por FRX, DRX, TEM e FTIR. Além disso, foram produzidas argamassas cilíndricas e prismáticas a partir de cimento Portland comum (CPO) e resistente a sulfatos (CPC), as quais foram tratadas com uma dispersão de 0,1% de NS e NF. As argamassas prismáticas foram imersas em solução de Na₂SO₄ a 5%, para induzir o ataque químico, e as cilíndricas, parcialmente imersas, para induzir o ataque físico. Por fim, as argamassas foram caracterizadas por DTA/TGA e pela medição do ângulo de contato. Observou-se que as NS não contribuíram para a redução da expansão das argamassas submetidas ao ataque químico do sulfato de sódio. Porém, as argamassas RS que foram tratadas com NS e NF apresentaram a menor perda de massa e deterioração.

Palavras chave: Nanopartículas de silício; Tratamento superficial; Ataque por sulfatos; Durabilidade.

1. Introducción

El ataque de sulfatos es la acción destructiva que ocurre en estructuras de concreto reforzado (ECR), debido a la presencia de un medio acuoso conteniendo los iones sulfatos. Estos iones interactúan con la pasta de cemento hidratada, pudiendo manifestarse de muchas formas distintas dificultando la comprensión de este fenómeno. El proceso del deterioro completo del ataque por sulfatos implica tres etapas: (1) difusión de iones agresivos en la matriz de cemento, que es una función de su porosidad y permeabilidad; (2) reacciones químicas entre el ion sulfato y componentes hidratados del cemento (portlandita, monosulfoaluminato y otros aluminatos hidratados) formando compuestos químicos (etringita y yeso) que resultan en expansión y (3) agrietamiento de la matriz, a veces asociado con la reacción química para descalcificar el silicato de calcio hidratado (C-S-H por su sigla en inglés), resultando en pérdida de resistencia, pérdida de masa y, por ende, en la pérdida de la capacidad portante de la estructura (Neville, 2016; Mehta y Monteiro, 2014).

Paralelamente al proceso químico del ataque de sulfatos, puede haber un proceso físico de deterioro, que ocurre cuando no hay interacción con los productos hidratados del cemento. En este caso ocurre la cristalización del sulfato de sodio en los poros superficiales de las ECR, ocasionado por cambios de humedad relativa y temperatura (Nehdi, *et al.*, 2014; Mohamed Zeidan, 2016).

A lo largo de los años, para prevenir el ataque de sulfatos en concreto se ha recomendado garantizar la calidad en ejecución y materiales utilizados, como espesor adecuado, baja relación agua/cemento (*a/c*), alto consumo de cemento, compactación y curado adecuado, disminución de la permeabilidad a lo más baja posible, uso de cementos resistentes a sulfatos, uso de películas impermeabilizantes y adiciones minerales (Singh L. P, 2013).

Con el advenimiento de la nanotecnología es posible comprender y controlar la materia a nanoescala, a escala atómica y molecular, en las diversas áreas de investigación como medicina, electrónica, ciencia, informática e ingeniería de materiales. En este sentido, el uso de nanomateriales ha sido ampliamente estudiado en materiales cementantes durante los últimos años (Atahan y Dikme, 2011; Jalal, *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017; Moslemi *et al.*, 2014) y se ha observado que mejoran sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, además de brindar nuevas propiedades convirtiéndolos en materiales multifuncionales (Cruz-moreno *et al.*, 2017; Cruz-Moreno, 2020).

El nanomaterial más empleado en materiales cementantes ha sido las nanopartículas base silicio – NS, en su forma simple y/o funcionalizada. En su forma simple, el uso en materiales cementicos genera sitios de nucleación para la formación productos hidratados, promueve la reacción puzolánica con la portlandita, generando C-S-H secundario y ejerce el efecto filler, conllevando al bloqueo de los poros interconectados, y consecuentemente disminuyendo la permeabilidad y por ende, la entrada de agentes agresivos (Tobon y Paya, 2015; Gómez-Zamorano y Castillo-Linton, 2016; Arel y Thomas, 2017). En su forma funcionalizada, que se obtiene mediante modificación superficial de las NS, las NF pueden actuar desarrollando superficies hidrofóbicas, autolimpiantes, bactericidas, etc., debido al anclaje que desarrollan ante la superficie (Cruz-Moreno, 2020).

Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones, las NS son empleadas como adición y/o sustitución del cemento Portland en contenidos que varían de 1 a 10 %, pero se ha observado la necesidad de usar aditivos plastificantes (debido a la gran área superficial de estas nanopartículas), lo que resulta en aumento de costos y en problemas causados por la interacción de los aditivos plastificantes con las fases hidratadas del cemento Portland (Atahan y Dikme, (2011); Jala, *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2017; Moslemi *et al.*, 2014). Por lo que, el presente proyecto busca evaluar la factibilidad del uso de los tratamientos superficiales con NS y NF, como una alternativa de prevención del ataque físico y químico de sulfato de sodio.

2. Procedimiento Experimental

2.1 Obtención y caracterización de las NS y NF

La obtención de las NS y NF en laboratorio se llevó a cabo mediante la ruta sol-gel como ha sido reportado por Fajardo *et al.* (2015). Este método es ampliamente utilizado en la producción de materiales nanométricos, por ser de fácil realización, en lo cual la temperatura del proceso se mantiene controlada a 70 °C. Para la caracterización de las NS y NF se realizó el análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), que se llevó a cabo en un equipo PANalytical Epsilon3-XL con el fin de comprobar el grado de pureza de las nanopartículas. También, se empleó la técnica de difracción de rayos x (DRX) mediante el difractómetro PANalytical EMPYREAN con radiación $\text{CuK}\alpha$, con el objetivo de identificar las principales fases presentes y la naturaleza del material, en el rango de $2\theta=10$ a 60°. Para estos análisis se utilizó muestras en polvo, previamente secas a 110 °C. Asimismo, para identificar los grupos funcionales de las NS y NF, y subproductos de la síntesis, se llevó a cabo el análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), en un equipo Thermo SCIENTIFIC NICOLET iS50 FT-IR. Para este análisis, se preparó una dispersión en agua destilada con 0.1 % de NS. El análisis se realizó en el intervalo de longitud de onda de 500 a 4000 cm^{-1} . Finalmente, para identificar la morfología y el tipo de las nanopartículas, se llevó a cabo el análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM), mediante el equipo Hitachi 7700. Para el análisis, se utilizó muestras dispersas en alcohol etílico.

2.2 Materiales empleados

Para la producción de morteros del ataque químico y físico de sulfatos se utilizó como aglutinantes el cemento portland ordinario – CPO (que cumple con la especificación de la norma NMX-C-414-ONNCCE, y es equivalente al tipo I de ASTM C150) y el cemento CPC 30R RS (que cumple con la especificación de la norma NMX-C-414-ONNCCE, y es equivalente al tipo V de ASTM C150). Además, como agregado fino fue usado arena estándar comercial (silica de Ottawa) que cumple con la especificación de ASTM C778 y

agua destilada, que cumple con la norma NMX-C-122 ONNCCE-2004. La composición química del CPO y CPC (tabla 1), fue obtenida mediante la técnica de FRX en un equipo PANalytical Epsilon3-XL.

2.3 Diseño de los morteros

El diseño de los morteros se llevó a cabo mediante la norma ASTM C 109, en lo cual se produjeron morteros cilíndricos (5x10cm), con una relación a/c=0.65 y relación a/mc=2.75, para analizar el ataque físico de sulfatos. También, para exponer al ataque químico de sulfatos, se produjeron morteros prismáticos de 2.5x2.5x28.5cm, con una relación a/c=0.485 y relación a/mc=2.75, conforme establece la ASTM 1012. Además, se produjeron pastas de cemento portland con la misma relación a/c para los análisis microestructurales. El mezclado de las pastas y morteros cumplió las especificaciones de la ASTM C 305. Después del mezclado y colado, los morteros permanecieron en el laboratorio, durante 24h a T=23 °C para fraguar, como establece la ASTM C 171. Pasado este período se realizó el desmolde y posteriormente se procedió con la aplicación de los tratamientos superficiales.

2.4 Tipos y condiciones de aplicación de los tratamientos con NS y NF

Los tratamientos superficiales de los morteros siguieron lo que se presenta en la tabla 2. Para los morteros sometidos al ataque físico de sulfatos, se emplearon los tres tratamientos superficiales (T1, T2 y T3), sin embargo, para los morteros del ataque químico de sulfatos se empleó solamente el tratamiento T1. Para aplicar el tratamiento T1 y T3, después del desmolde de los morteros, se cortaron sus extremidades para eliminar los efectos de frontera. La dispersión de NS fue preparada con agua destilada por agitación magnética a 60 °C, durante 1 h. Después que la dispersión se enfrió, se aplicó el tratamiento T1 en los morteros, conforme tabla 2. Posteriormente al tratamiento, los morteros fueron inmersos en agua del grifo hasta los 28 días de edad, para cumplir el tiempo de curado. La dispersión de NF del tratamiento T2 y T3, fue igualmente preparada a la dispersión de las NS, y fue aplicado en los morteros como se presenta en la Tabla 2. Para la aplicación de este tratamiento se utilizó una brocha, en lo cual se aplicó dos capas de la dispersión, con 30 min de diferencia entre ambas.

Tabla 1. Composición química del CPO y CPC.

Composición (%)	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂
CPO 40	67.193	19.955	3.647	1.72	4.83	1.082	0.369	0.389
CPC 30R RS	65.707	21.298	2.948	1.413	6.603	0.714	0.387	0.254

Tabla 2. Tratamientos superficiales.

Nomenclatura	Preparo y aplicación
RF	Curado con agua destilada
T1	Tratamiento superficial por 72h, con una dispersión producida con 0.1% de NS con respecto al volumen de agua destilada.
T2	Tratamiento superficial a los 28 días de curado con una dispersión producida con 0.1% de NF con respecto al volumen de agua destilada.
T3	Tratamiento superficial con una combinación de los tratamientos T1 y T2.

2.5 Exposición al ataque químico de sulfatos

La exposición al ataque químico de sulfatos, se llevó a cabo conforme establece la ASTM C 1012 que consiste en la exposición acelerada de morteros de 2.5x2.5x28cm, a una solución al 5% de sulfato de sodio, por un período mínimo de 4 meses a $T=23^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. Durante este período se midieron los cambios de longitud a 2, 4, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 semanas. Cada semana se cambió la solución sulfática, para mantener la concentración de sulfatos constante. Para la caracterización de los morteros se realizaron los análisis térmicos (TGA/DTA) con el equipo Perkin Elmer STA 6000, en la rampa de calentamiento de $10^{\circ}/\text{min}$ de 30°C a 995°C para cuantificar la portlandita. Para este análisis se tomaron 20mg de muestras en polvo, que fueron colectadas en los primeros 10mm de la superficie, y previamente secas a 40°C , durante 24 h.

2.6 Exposición al ataque físico de sulfatos

Para evaluar el ataque físico por sulfatos se llevó a cabo el procedimiento reportado por Nehdi et al. (2014). El método consiste en someter morteros parcialmente inmersos en una solución al 5% de Na_2SO_4 a ciclos de mojado y secado ($T=20^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR}=82\%$; $T=40^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR}=31\%$) en una cámara ambiental, por un período de seis meses. Durante los seis meses, al final de cada ciclo se midieron las masas de los morteros y se realizó una inspección visual de ellos. Además, se realizó la medición del ángulo de contacto en los morteros que fueron tratados con el tratamiento T2 y T3, para evaluar la hidrofobicidad superficial.

3. Resultados

3.1 Caracterización de las NS y NF

El análisis FRX, mostró que la ruta de síntesis utilizada obtuvo NS conteniendo 99.9% de SiO_2 . Asimismo, el difractograma de las NS en el intervalo de $2\theta = 10^{\circ}$ a 60° , que se presenta en la figura 1, muestra una reflexión muy ancha localizada en el intervalo de $2\theta = 22^{\circ}$ a 23° , confirmando la naturaleza amorfa del material. Este resultado confirma los espectros encontrados por otros autores, que produjeron las NS mediante la

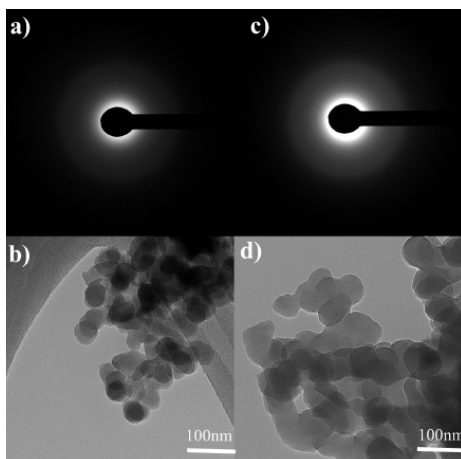


Figura 1. Difractograma de las nanopartículas.

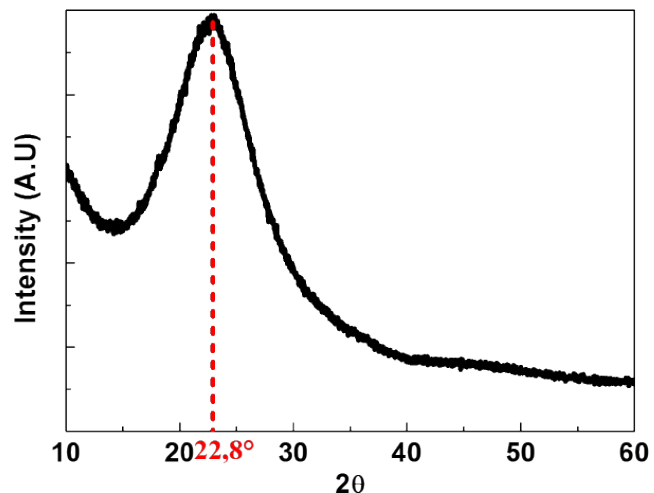


Figura 2. a) patrón de difracción de las NS; b) Morfología de las NS; c) patrón de difracción de las NF; d) Morfología de las NF;

ruta sol-gel (Jo *et al.*, 2007; Qing *et al.*, 2007; Flores, 2009; Cruz-Moreno *et al.*, 2017; Fajardo *et al.*, 2015). El análisis TEM de las NS y NF, ha confirmado que fue producido un material amorfo, como se observa en el patrón de difracción típico de materiales amorfos (véase figura 2a y 2c), además la figura 2b y 2d enseña que ha sido producido un material nanométrico aglomerado, con tamaños variables y morfología irregular. Este resultado concuerda con los obtenidos por Cruz-Moreno (2014).

Mediante el espectro infrarrojo de la figura 3 es posible observar las bandas de absorción presentes en el intervalo de 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} características de los grupos funcionales de las NS y NF. Con los resultados de este análisis también es posible verificar la presencia de solventes que se quedaron de la síntesis. Para las NS, las bandas de absorción ubicadas en el intervalo de 1500 cm^{-1} a 3500 cm^{-1} corresponden a los enlaces O-H y C-H, que están asociados a los reactivos empleados como solventes (Yoshino *et al.*, 1990; Cruz-Moreno, 2019). En la etapa de condensación, la unión de una molécula prehidrolizada con el alcóxido resulta en la formación de enlaces Si-O-Si, cuyas bandas de absorción se ubican en 998 cm^{-1} y 879 cm^{-1} . Otra banda ubicada en 594 cm^{-1} es atribuida a grupos alcóxidos y OH que se quedaron en los geles (Yoshino *et al.*, 1990).

Aún en la figura 3, se observa el efecto generado por la funcionalización de las NS, con la aparición de los picos ubicados en las longitudes de 2161 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de los radicales CH_3 , y a las vibraciones pertenecientes a los radicales Si- CH_3 , ubicados en 1256 cm^{-1} . Estos grupos funcionales son responsables por la disminución de la energía superficial o de contacto en el concreto, brindándole el efecto hidrofóbico (Tian y Guo, 2017; Muzenski *et al.*, 2015). La presencia de enlaces Si-OH indica que no todas las moléculas prehidrolizadas se polimerizaron para la formación de enlaces Si-O-Si. Como se indica en el espectro IR, la zona comprendida entre 1300 y 4000 cm^{-1} corresponde a la reacción de hidrólisis del TEOS, en el cual cada molécula de TEOS debe de dar una molécula de Si-OH (Limpo *et al.*, 1993; Cruz-Moreno,

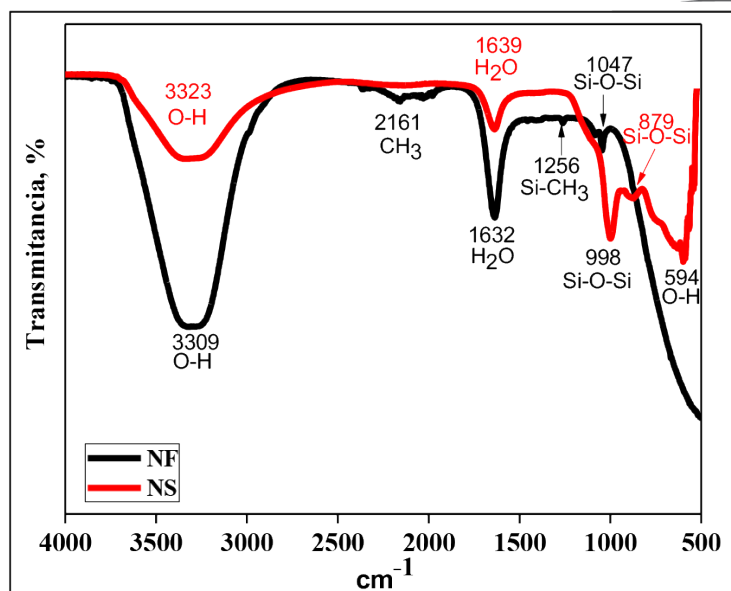


Figura 3. Espectro obtenido por FTIR de las NS y NF.

2014). Sin embargo, en la zona comprendida entre la longitud de onda 500 y 1300 cm^{-1} corresponde a las reacciones de policondensación del TEOS, es decir, en esta zona los grupos Si-OH hidrolizados en la etapa anterior se polimerizan formando enlaces Si-O-Si, la polimerización continua y construye moléculas cada vez más grandes conteniendo silicio. En el caso de este material, que ha sido producido en condiciones básicas la hidrólisis y la condensación ocurre simultáneamente, en lo cual el ataque al ion Si^{4+} es facilitado y la condensación es favorecida por la sustitución del OH^- para formar los enlaces Si-O-Si, este es el enlace responsable por las interacciones químicas que van a ocurrir con los materiales cementantes en los cuales van a ser incorporados. Por lo tanto, en este análisis se observó que el material formado corresponde a las NS y NF, dado que el espectro IR confirma la presencia de grupos funcionales de este material.

3.2 Ataque físico

Como reportó Nehdi *et al.* (2014), el ataque físico de sulfatos (véase figura 4), se ubica en la porción del espécimen por arriba de la solución sulfática (región A), mientras en la porción inmersa en la solución (región B) podrá o no ocurrir el ataque químico. Como se observa en la figura 4 se logró reproducir el ataque físico de sulfato con las condiciones ambientales seleccionadas.

En cuanto a la pérdida de masa de los morteros producidos con el cemento CPO (figura 5), se observa que inicialmente hubo un incremento de masa, en los morteros RF y T1. Según Nehdi *et al.* (2014), esto es debido a la absorción de agua de los morteros y a la cristalización del sulfato de sodio en los poros superficiales. Sin embargo, los morteros T2 y T3 no presentaron dicho incremento hasta 1 mes de exposición, esto

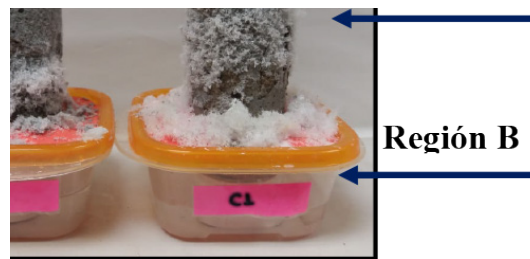


Figura 4. Morteros de RS y CPO sometidos al ataque físico de sulfatos.

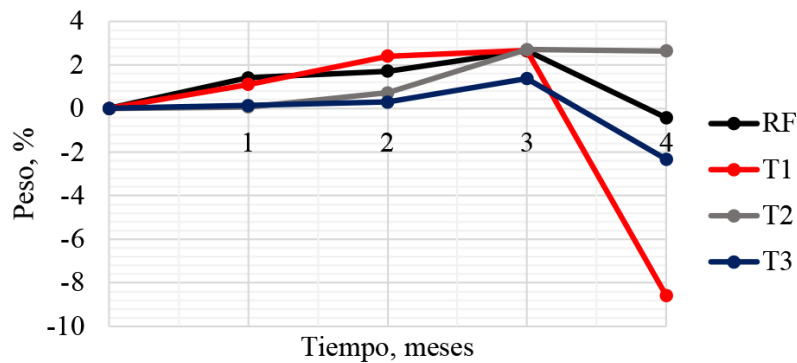


Figura 5. a) Pérdida de masa de morteros de CPO.

posiblemente se debe a la propiedad hidrofóbica de las NF, que disminuyen la absorción de los morteros (Cruz-Moreno, 2019; Ardalan *et al.*, 2017). En el segundo mes, se nota un ligero incremento de masa, indicando que la superficie puede haber perdido su propiedad hidrofóbica, dando inicio a la absorción. Con el seguimiento de la exposición, se observó que las masas de los morteros RF, T1 y T3 disminuyeron, siendo los tratamientos T1 y T3 los que presentaron la mayor pérdida de masa, 8 % y 2 %, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento T2 aún presenta ganancia de masa, indicando que la absorción de este mortero ha sido más lenta, sin embargo, para comprobar este resultado se hace necesario realizar análisis que involucren la absorción, porosidad y permeabilidad. Además, la medición del ángulo de contacto (véase figura 7a) indica que en la Región A, los ángulos disminuyeron, respecto a la medición inicial, sin embargo aún se mantienen en la zona hidrofóbica ($\theta > 90^\circ$) hasta los dos meses de exposición. Por otro lado, la región B (véase figura 7b) que está inmersa en la solución sulfática, estos ángulos se redujeron para la zona hidrofílica ($10^\circ < \theta < 90^\circ$), sólo el tratamiento T2 mantiene el ángulo de contacto ligeramente mayor a 90° . La disminución de los ángulos de contacto en la región B para la zona hidrofílica, indica que el material empezó a absorber el agua de la solución y, por ende quedó susceptible al ataque físico de sulfatos aún en el primer mes de exposición.

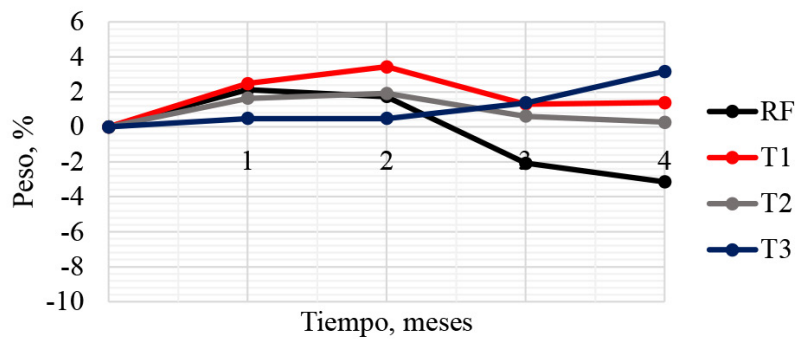


Figura 6. Pérdida de masa de morteros de RS.

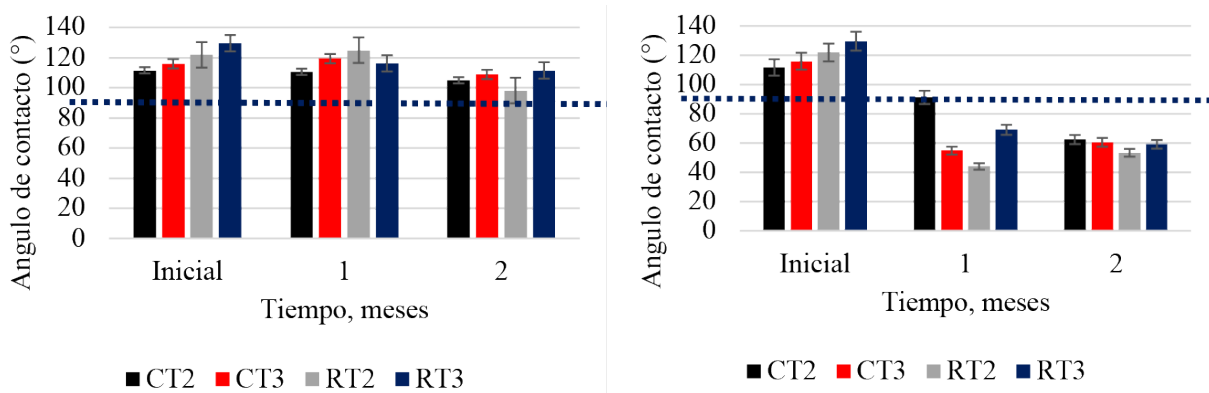


Figura 7. a) Ángulo de contacto (Región A); b) Ángulo de contacto (Región B)

Como se observa en la figura 6, los morteros de RS tuvieron un comportamiento distinto de los de CPO, una vez que, inicialmente se observa que todos los morteros empezaron a ganar masa desde el primer mes, siendo los del tratamiento T2 y T3 los que presentaron el menor incremento. En el segundo mes de exposición, se observa que a excepción del mortero T3, todos los demás empezaron a perder sus masas, pero el mortero RF presentó la mayor pérdida. Este resultado indica que, en las condiciones seleccionadas, los morteros de RF, hasta los 2 meses de exposición se presentan más susceptibles al ataque físico de los sulfatos.

En cuanto a los ángulos de contacto, en la región A, la superficie de los morteros T2 y T3 se mantienen en la zona hidrofóbica (véase la figura 7a). Sin embargo, la región B, que está inmersa en la solución sulfática, presentaron ángulos de contacto inferiores a 90° (véase figura 7b). Estos resultados indican que las NF pueden haber contribuido para la disminución de la absorción y de la deposición de los cristales de sulfatos en los dos primeros meses de exposición. Asimismo, se puede inferir que, aunque haya presentado ganancia de masa en el primer mes de exposición, los morteros tratados con NS presentaran una mayor resistencia al ataque físico de sulfatos que el mortero de referencia.

La inspección visual presentada en la figura 8 enseña que, los morteros T1 y T3 del cemento CPO, se presentan más deteriorados que los demás, confirmando lo que se observó en la pérdida de masa. Al igual, en la serie producida con cemento RS, los morteros RF se aprecian más deteriorados que los demás, siendo los morteros con tratamiento T3 los menos deteriorados, confirmando también lo que se presentó en la pérdida de masa.

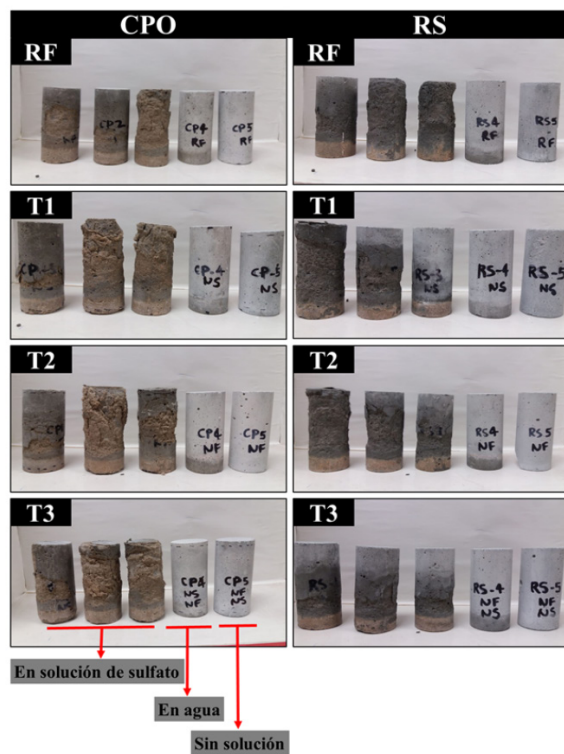


Figura 8. Inspección visual de morteros de CPO y RS.

3.3 Ataque químico

El ataque químico de sulfato fue evaluado en morteros de CPO y RS, conforme establece el método acelerado reportado por la ASTM 1012. Como se observa en la figura 9, los morteros de CPO a los 4 meses de exposición, presentan expansión por arriba del límite establecido en la norma (0.1 % para todos los casos). Además, el mortero tratado con el tratamiento T1, presentan básicamente la misma expansión que el mortero de RF, por lo que se puede inferir que las NS no contribuyeron con la densificación de la matriz. En la tabla 3 es posible observar que, antes de la exposición a la solución sulfática, el contenido de portlandita, que puede ser un indicador de la acción de las NS, fue mayor para el mortero tratado con NS. De hecho, aunque sea el mismo mortero, el mayor contenido de portlandita en el mortero tratado con NS es posible, debido a que las NS en el inicio de la hidratación aceleran la formación de portlandita, y posteriormente con el aumento de la hidratación, desarrollan la reacción puzolánica con este compuesto (Ji Tao, 2005; Castillo, 2015). Sin embargo, cabe mencionar que los morteros del ataque químico fueron producidos con una relación a/c=0.48, por lo que el contenido de portlandita, ya es naturalmente alto, respecto a otras matrices con relación a/c mayores, por lo que se puede inferir que esto puede afectar la reacción puzolánica que ocurriría de las NS con la portlandita, por el contenido de NS incorporado a la matriz ser de 0.1 %. Además, los análisis térmicos demostraron que después de la exposición al sulfato de sodio, el contenido de portlandita de ambos morteros redujo, indicando que puede estar ocurriendo la interacción del sulfato de sodio con este compuesto y posiblemente generando etringita. También es posible que los morteros estén carbonatando, debido al incremento del carbonato de calcio (véase tabla 3), por lo tanto, esto también puede estar contri-

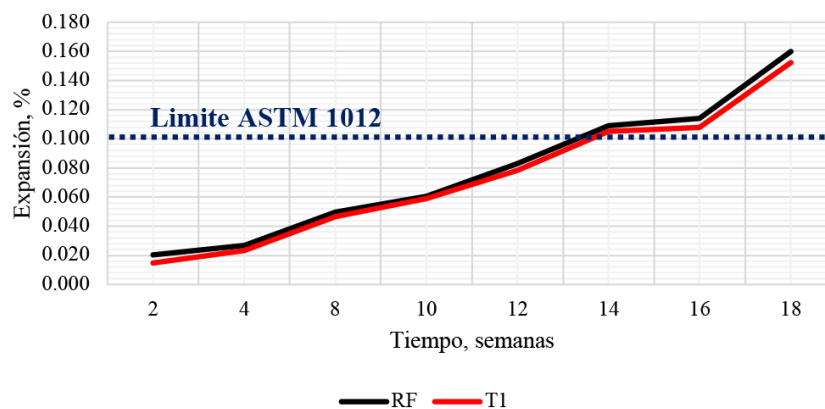


Figura 9. Pérdida de masa de morteros de CPO.

Tabla 3. Contenido de Ca(OH)_2 y CaCO_3 de los morteros de CPO.

Compuesto	Muestras	Inicial	1 día	7 días	28 días
% Ca(OH)_2	RF	24.79	23.72	23.46	19.98
	T1	29.23	24.61	24.18	23.71
% CaCO_3	RF	6.39	7.16	9.50	23.71
	T1	9.55	7.82	9.68	10.13

buyendo para la reducción de la portlandita. Sin embargo, se requieren otros análisis microscópicos, como el SEM/EDS, para confirmar lo que está ocurriendo en la microestructura. De igual modo, los morteros de RS no presentaron diferencia significativa en cuanto a la expansión (véase figura 10), del mortero RF con el mortero del tratamiento T1, indicando que las NS también no contribuyeron para la densificación del material. Los análisis térmicos (véase Tabla 4) también demostraron que antes de la exposición, el mortero con el tratamiento T1 presentó un mayor contenido de portlandita respecto al mortero RF, indicando que las NS contribuyeron para acelerar la formación de portlandita, pero no fueron suficientes para promover la reacción puzolánica que conllevaría a la formación de C-S-H secundario y densificaría la matriz.

4. Conclusiones

Por lo anterior, se observó que se obtuvo las NS y NF con las características de tamaño, pureza y morfología deseadas. También se observó que en el ataque físico de sulfatos el tratamiento que contiene la combinación de NS y NF, presentó el mejor resultado, incrementando la resistencia del cemento RS al ataque físico de sulfatos. Además, la menor ganancia de masa de las muestras tratadas con NF infiere que estas han disminuido la absorción de agua en el primer mes de exposición a la solución sulfúrica. Por otro lado, en el ataque químico de sulfatos, el desempeño de las NS no fue satisfactorio una vez que el mortero tratado con NS presentó la misma expansión que el mortero de referencia. Por lo tanto, los resultados presentados hasta la fecha, indican que el tratamiento con NS y NF, puede ser una alternativa de prevención del ataque de

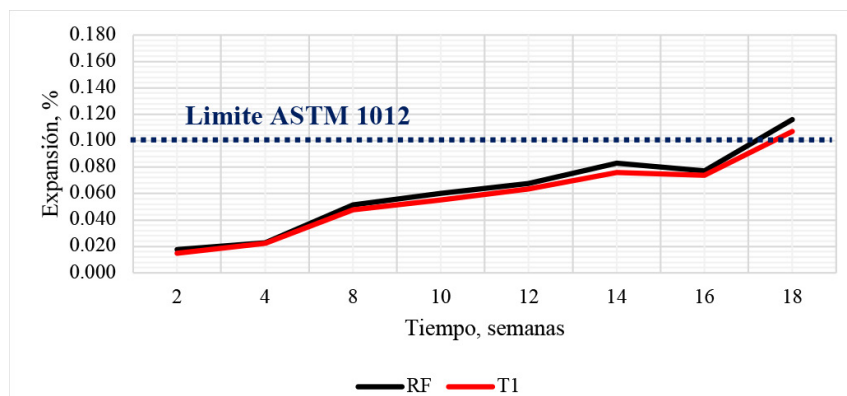


Figura 10. Pérdida de masa de morteros de RS

Tabla 4. Contenido de Ca(OH)_2 y CaCO_3 de los morteros de RS.

Compuesto	Muestras	Inicial	1 día	7 días	28 días
% Ca(OH)_2	RF	23.49	22.85	19.41	17.78
	T1	26.46	21.87	21.59	21.10
% CaCO_3	RF	7.55	13.89	10.64	10.13
	T1	9.12	8.65	12.73	13.24

sulfatos, sin embargo es necesario realizar otros análisis, como de porosidad accesible, sortividad y análisis SEM/EDS para entender el fenómeno que ocurre cuando los distintos tratamientos son aplicados. Además, para el ataque químico de sulfatos, es posible que el porcentaje de NS incorporado a la matriz, mediante el tratamiento superficial ha sido insuficiente para desarrollar las interacciones químicas esperadas.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al fondo SEP-CONACyT por el financiamiento otorgado a los proyectos CB-2016/285453, IT- 301307, P/PROFEXCE-2020-19MSU0011T-18. D. L. Silva agradece a CONACyT por la beca (nº 932159) otorgada para la realización de sus estudios doctorales.

6. Referencias

- American Society for Testing and Materials - ASTM (2006); Standard Specification for Standard Sand; ASTM C778-06; DOI:10.1520/C0778-06.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2006); Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency; ASTM C305-06; DOI:10.1520/C0305-06.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2007); Standard specification of portland cement; ASTM C 150-07; 2007; 4.01: 144-150.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2008); Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens); ASTM C109; DOI: 10.1520/C0109_C0109M-08.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2016); Standard specification for sheet materials for curing concrete; ASTM C 171 - 16.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Designation C 1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortar Exposed to Sulfate Solution. Philadelphia, PA, 2013.
- Arel, H.S.; Thomas, B.S. (2017). The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks, *Results in Physics* 7, 843–851.
- Atahan H. N; Dikme, D. (2011). Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 25 (8). 3450–3457.
- Castillo Linton (2015), “*Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de silicio*”, PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cruz-moreno (2014), “*Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio*”, Masters Thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cruz-moreno, D. (2019). Superficies Multifuncionales em Materiales de Construcción base Cemento Portland obtenidas durante el curado com Nanopartículas Funcionalizadas. Tesis de Doctorado – UANL, 2019.
- Cruz-Moreno, D.; Fajardo, G.; Flores-Vivián, I.; Cruz-López, A.; Valdez, P. (2017), “Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland”, *Revista ALCONPAT*, 7 (3), pp. 274-285, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>.
- D.Cruz-Moreno; G.Fajardo, Flores-Vivian; R.Orozco-Cruz; C.Ramos-Rivera. (2020). Multifunctional surfaces of portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles (2020). *Applied Surface Science*. Volume 531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147355>.

- Fajardo, G.; Cruz-López, A.; Cruz-Moreno, D.; Valdez, P.; Torres, G.; Zanella, R. (2015), “Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials”. *Construction and Building Materials*, 76, 158–167.
- Flores I. (2009). “*Obtención de nanopartículas de SiO₂ y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas en materiales cementantes*”, PhD thesis, UANL.
- Gómez-Zamorano; C. E. Castillo-Linton. (2016). Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de partículas de nanosilice. *Revista ALCONPAT*. Volumen 6, Número 2. pp 101-115.
- Jalal, M.; Pouladkhan, R. A.; Norouzi, H. Choubdar, G. (2012), Effects of silica nano powder and silica fume on rheology and strength of high strength self compacting concrete, *J. Am. Science* 8 (4). 270–277.
- Jo B. W.; Kim C. H.; Tae G. H.; Park J. B. (2007). “Characteristics of cement mortar with nanoSiO₂ particles”. *Constr. Build. Mater.*, 21:1352–5.
- Li, L. G.; Zhu, J.; Huang, Z. H.; Kwan, A. K. H.; Li, L. J. (2017). Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar, *Constr. Build. Mater.* 157, 337–347.
- Limpo J., Rubio J., Oteo J. L. (1993). “Estudio por FT-IR de la hidrólisis del tetraetilortosilicato”. *BOL SOC. ESP. CERAM. VIDR.* 1993; 32 (1): 31-35.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2014). “*Concreto: Microestructura, propiedades e materiais*”. 2° ed. São Paulo.
- Mohamed Zeidan; Mohamed T. Bassuoni; Aly Said (2016). Physical salt attack on concrete incorporating nano-silica. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2016.1218802>.
- Moslemi, A. M.; Khosrav, A.; Izadinia, M.; Heydari, M. (2014). Application of nano silica in concrete for enhanced resistance against sulfate attack, *Advanced Materials Research, Trans Tech Publ.*
- Nehdi, M.L.; Suleiman, A.R. (2014) Soliman. Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack. *Cement and Concrete Research* 64, 42–53.
- Neville, A. M. (2016), “*Propriedades do concreto*”. Bookman Editora.
- NMX-AA-122-ONNCCE- 2006, Potabilización del agua para uso y consumo humano – sulfato de aluminio – especificaciones y métodos de prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-414-ONNCCE- 2004, Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Febrero 2005.
- P. Tian, Z. Guo, Bioinspired silica-based superhydrophobic materials (2017). *Appl. Surf. Sci* 426 (2017) 1-18.
- Qing Y., Zenan Z., Deyu K., Rongshen C. (2007); “Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume”. *Construction and Building Materials* 2007; 21: 539–545.
- R.B.Ardalan, N. Jamshid, H. Arabameri, A. Joshaghani, M. Mehrinejad, P. Sharafi (2017), Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices, *Constr. Build. Mater.* 146. 128-135.
- S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev. Durability of superhydrophobic engineered cementitious composites (2015). *Constr Build Mater*, 291-297.
- Singh L. P.; Karade S. R.; Bhattacharyya S. K.; Yousuf M. M.; Ahalawat S. (2013), “Beneficial role of nanosilica in cement based materials – a review”. *Constr Build Mater*, 47:1069–77.
- Tobon, J. Payá, O. J. (2015). Restrepo, Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles, *Constr. Build. Mater.* 80, 92– 97.
- Yoshino, H.; Kamiya, K. Y Nasu, H.: IR study on the structural evolution of sol-gel derived SiO₂ gels in the early stage of conversion to glasses. *J. Non-Cryst. Solids* 126 (1990), 68-78.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Correlación entre pruebas no destructivas y la resistencia a la compresión de un polímero inorgánico base metacaolin y carbonato de calcio expuesto a CO₂

A.A. Clímaco Velázquez¹, J. M. Mendoza Rangel¹,
I. Escalante García², O. F. Ojeda Farías¹

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados IPN unidad Saltillo

Autor de Contacto: aymara.climacovlzq@uanl.edu.mx

Resumen

Una alternativa óptima para el cemento portland son los polímeros inorgánicos, estos son relativamente nuevos y no existen tantos estudios sobre ellos en comparación a el cemento portland, esto provoca que puedan generarse dudas o poner en desventaja al material. Cuando se estudia un cementante alternativo, son comparados con parámetros de cemento portland y podrían obtenerse resultados no tan confiables ya que no comparten la misma composición. Unos de los parámetros más importantes a cumplir es una resistencia mínima a la compresión, esto como un indicador de calidad, y estudios han reportado que estos materiales cumplen con ella, sin embargo, existe poco relacionado para medir tal resistencia mediante pruebas no destructiva, mismas que se han popularizado mucho últimamente por su relativa facilidad al ocuparlas.

Keywords: Geopolymers, correlation, compression; resistivity, ultrasonic pulse.

1. Introducción

La presente investigación tiene como objetivo correlacionar la prueba de resistencia a la compresión con pruebas no destructivas en un polímero inorgánico base metacaolín – carbonato de calcio, con el fin de aportar información acerca del comportamiento de estos materiales (Davidovits, 1991). Los polímeros inorgánicos están formados por unidades tetraédricas de aluminio y silicio condensadas a temperatura ambiente, que resultan de la disolución de materias primas selectas en presencia de soluciones con pH elevado. La incorporación de iones alcalinos como el Na^+ , K^+ , y Ca^{++} balancea las cargas eléctricas de la estructura dando como resultado un material cementante que fragua y endurece en condiciones normales de temperatura ambiente, incrementando sus propiedades mecánicas con el tiempo (Purdon, 1940).

Como principal producto de reacción se obtienen geles de aluminosilicato N-A-S-H, y en algunos casos fases cristalinas tipo zeolitas como producto secundario (Provis y Van Deventer, 2009).

Las cenizas volantes con un bajo contenido en calcio y arcillas calcinadas como el metacaolín son los precursores más comunes utilizados en la síntesis del geopolímero. Cabe destacar que el término geopolímero fue acuñado en la década de 1970 por el científico e ingeniero francés Joseph Davidovits (1991).

Esta correlación se realizará con la finalidad de conocer si las pruebas no destructivas en este tipo de material pueden ser empleadas como un parámetro para determinar la resistencia a la compresión. Para la realización de la correlación se utilizaron tres pruebas no destructivas: resistividad eléctrica del concreto, velocidad de pulso ultrasónico e índice de rebote, correlacionándolas con la prueba de resistencia a la compresión que es el parámetro principal para determinar la resistencia.

Todas estas pruebas serán realizadas en laboratorio y con una metodología especificada para su mejor control en los resultados. Adicional a esto también se evaluará la exposición a un ambiente agresivo de CO_2 , el cual es muy común en la zona metropolitana de Monterrey y presenta un fuerte problema al deteriorar las construcciones.

Es importante recalcar que el aporte de este estudio se basará en encontrar parámetros que aún no existen para estos tipos de materiales, debido a que en la actualidad estos tipos de concretos suelen compararse con parámetros de cemento portland que muchas veces pueden dejarlos en desventaja debido a que su desempeño no es el mismo.

2. Diseño experimental

2.1 Morfología de los especímenes

2.1.1 Cubos de 15x15 cm

Los cubos de 15x15 cm será utilizados para el método de esclerometría. Se realizaron tres cubos por mezcla por lo tanto se tuvieron 6 cubos, contando los dos tipos de exposición serían 18 cubos en total.

2.1.2 Cilindros de 10x20cm

Estos cilindros de 10x20cm estándar, fueron utilizados para la resistividad eléctrica del concreto y para el pulso ultrasónico. Debido a que estas pruebas no son destructivas e incluso no dañan al espécimen se planeó hacer tres cilindros por mezcla, teniendo entonces un total de 18 cilindros.

2.1.3 Cubos de 10 x 10 cm

Para la prueba de compresión, que es una prueba destructiva, se propuso fabricar especímenes de 10x10cm, esto es debido a que iba a fabricarse una cantidad muy grande de especímenes, por lo que sería mucho material necesario.

2.2 Proporciones de Mezcla

Se propusieron 3 mezclas con distintas adiciones de carbonato de calcio y con concentraciones distintas de activador. En la Tabla 1 podemos observar dichas mezclas propuestas.

2.3 Fabricación de especímenes

2.3.1 Exposición ambiental

Los especímenes fueron expuesto a condiciones ambientales agresivas por el CO₂. La exposición se realizó tanto natural como acelerado, con el fin de ver como el CO₂ podría llegar a afectar las resistencias y las correlaciones.

2.3.2 Exposición natural

Los ensayos se expusieron a un ambiente urbano e industrial, en el instituto de ingeniería civil, ubicado en la ciudad de san Nicolás de los Garza. Para tener un mejor control del resultado se contó con un medidor de CO₂ con el que pudimos observar a que concentración se encontraban los especímenes.

2.3.3 Exposición acelerada

Los ensayos antes descritos se colocarán en una cámara de carbonatación acelerada. Serán expuesto a 4 % y 5 % de CO₂ y con una humedad de entre 60 % y 80 %.

2.4 Métodos para la determinación de la resistencia del concreto

2.4.1 Pruebas destructivas

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) a una edad de 7, 14 y 28 días y se le designa con el símbolo *f*'_c.

Para todos los métodos, los cilindros deben tener el diámetro, por lo menos, tres veces mayor que el diámetro máximo del agregado grueso y la longitud debe ser lo más cerca posible de dos veces el diámetro. No se deben usar núcleos y cilindros con altura menor que 95 % del diámetro, antes o después del cabeceo (Neupane, 2016).

Tabla 1. Mezclas propuestas.

Mezcla	% de metacaolin	% de carbonato de calcio	Relación Na/Al
M1	100	0	1.2
M2	40	60	1.2
M3	70	30	1.35

2.4.2 Pruebas no destructivas

Resistividad eléctrica del concreto

El objetivo de este ensayo es la determinación de la resistividad eléctrica del concreto en campo o laboratorio. La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u (ohm-m). Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de las sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (ASTM International, 2001).

Velocidad de pulso ultrasónico

Entre las pruebas no destructivas se encuentra el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad, entre otras características; esto se logra a través de mediciones de la velocidad ultrasónica sobre el material que se va a probar. Así el equipo hace posible conocer las siguientes cualidades del concreto: homogeneidad, la presencia de fisuras, los huecos, los cambios en concreto debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, al igual que la calidad de este. El equipo proporciona grandes ventajas, entre ellas podemos mencionar su poco peso, fácil uso y manejo, pero sobre todo la confiabilidad en sus resultados, ya que es una forma rápida y sencilla que nos permite conocer el estado que guarda el concreto.

Una vez que la onda se transmite a través del concreto, es captada por el transductor receptor, el cual convierte la energía mecánica de la onda en pulso electrónico; después de recibido, se obtendrá el tiempo de propagación de la onda en el concreto que, junto con la distancia entre transductores, nos ayudará a saber la velocidad de pulso. Esta velocidad se compara con diferentes criterios existentes y es así como se conocerá el estado del material ensayado. Se debe asegurar que los transductores tengan un buen acoplamiento sobre la superficie del concreto, esto se logra colocando entre la superficie del concreto y los transductores un gel especial para pruebas con ultrasonido (C.A.C., 1989).

Índice de rebote

La normativa establece un procedimiento para determinar el índice de rebote en el concreto endurecido mediante el empleo del dispositivo denominado esclerómetro o martillo de rebote. Esta determinación sirve para evaluar la uniformidad superficial del concreto en el sitio o para delimitar zonas o áreas de diferentes resistencias o al concreto deteriorado en las estructuras, así como para indicar cambios en las características del concreto a través del tiempo, tal como aquellas causadas por la hidratación del cemento. Este método, dentro de sus limitaciones, se puede emplear para evaluar comparativamente la resistencia del concreto y no debe ser utilizado como una alternativa para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto endurecido (ASTM Standard C805, 2002).

2.5 Métodos de correlaciones estadísticas

2.5.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos “variables relacionadas linealmente”. Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Digamos, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tenemos dos variables X e Y, y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como r_{xy} entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1 \quad (1)$$

Hemos especificado los términos “valores absolutos” ya que en realidad si se contempla el signo el coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y $+1$. No obstante ha de indicarse que la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de $+1$ como de -1 . En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa. Pasamos a continuación a desarrollar algo más estos conceptos.

Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta.

3. Resultados

3.1 Resistencia a la compresión

En la figura 1 se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión. Las mezclas M1-N y M3-N registran datos hasta los 14 días; para los 7 días de ensaye y exposición se presentan casi todas las mezclas con la excepción de M2-N y M6-A. Para 24 horas y 3 días se tienen resultados de resistencia a la compresión de todas las mezclas, el incremento de 24 horas a 3 días es muy alto para todas las mezclas, con esto se puede comprobar que estas mezclas alcanzan resistencias altas a muy temprana edad.

Debido a que aún se están obteniendo datos, no es posible observar alguna tendencia sobre cuál mezcla tenga un mejor comportamiento, pero sí se puede observar que todas tienen un incremento similar conforme pasa el tiempo. La mezcla M1-N tiene hasta ahora su resistencia a la compresión más alta a los 14 días con 52.16 MPa.

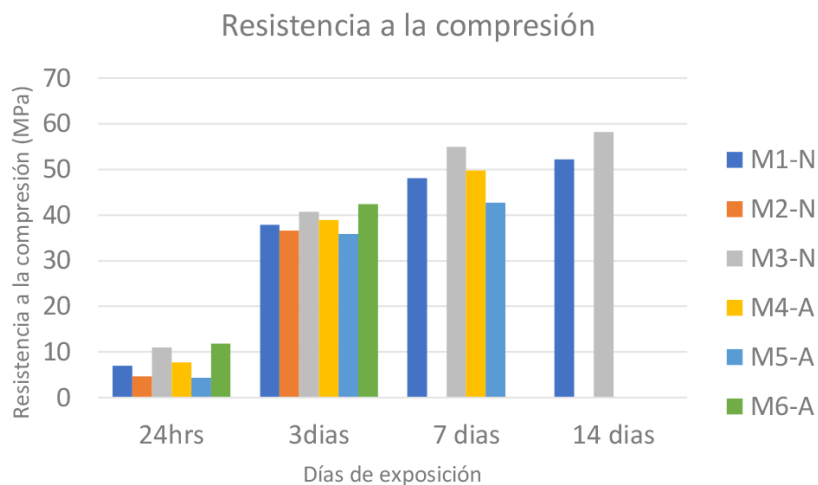


Figura 1. Resistencia a la compresión hasta 28 días para todas las mezclas.

Por otro lado, la M3-N se ha presentado como la mezcla con mayor resistencia obteniendo 58.19 MPa a los 14 días, esta mezcla tiene 30 % de carbonato de calcio en sustitución del metacaolín, lo que podría estar otorgándole una mayor resistencia a edades tempranas debido a que el carbonato de calcio es un material con una dureza bastante alta (Perez-Cortes y Escalante-García, 2020).

La M3-N y la M6-A tienen las mismas proporciones con diferencia en el ambiente de exposición, más adelante cuando se obtengan más datos de la M6-A podremos comparar como el carbonato afecta a esta matriz cementante, por lo pronto podemos observar que la M6-A a 7 días está teniendo de igual forma resistencias altas como su par M3-N.

Para el par de M2-N y M5-A, que son las mismas proporciones, pero a distintos ambientes de exposición, no se tienen muchos datos para poder dar una observación importante, solo podemos ver que tienen resistencias similares las cuales serán comprobadas mediante significancia estadística, y que la exposición no afecta en un tiempo tan corto, será cuestión de esperar para poder observar este fenómeno.

También se observa que a los días que se tienen datos comparables, que son en la edad 24 horas y 3 días, las mezclas tienen un buen comportamiento, sin embargo, sus resistencias son de 35 a 36 MPa, que son rangos menores a las demás mezclas.

Esto podría ser debido a su proporcionamiento en el que tienen mayor carbonato de calcio que metacaolín, una sustitución de 60 %, por lo que es posible que el mayor contenido de carbonato aun no haya reaccionado o se quede solamente actuando como carbonato y los productos de reacción sean menores debido al poco metacaolín que se encuentra en la matriz cementante.

Por último, la M4-A, que es 100 % metacaolín, tiene resultado muy similares a la mezcla M1-N debido a que tiene una matriz igual, lo único que varía es la exposición nuevamente, una vez más se requiere de más datos para observar el efecto del ambiente y poder corroborar como actuara el CO₂ en las mezclas.

3.2 Resistividad eléctrica

Los resultados obtenidos hasta el momento en resistividad eléctrica se tienen hasta el día 7 de exposición, para 14 días solo se estudiaron la mezcla M1-N y M3-N.

Como se puede observar en la figura 2, se ensayaron los especímenes a partir del día 3, esto debido a que a las 24 horas el equipo para la obtención de la resistividad marca 0 y/o error en todas las mezclas, se hará un estudio microestructural para poder deducir cual es la razón de este hecho.

Todas las mezclas tienen un incremento excepto como se puede ver en la mezcla M3-N que se mantiene constante esto puede deberse a que dentro de la matriz aún existen reacciones entre los componentes y no puede definirse que tan densa es o su grado de saturación.

Las primeras dos edades que son 3 y 7 días muestran valores de resistividad muy bajos, si tuviéramos que analizarlos ahora con valores que se dan en la literatura de resistividad estaríamos obteniendo una resistividad muy baja que en términos de densificación significaría que la matriz no lo es lo suficiente para proteger a una estructura.

Sin embargo, se tendría que ser muy cauteloso en la interpretación del resultado dado que, al ser una mezcla diferente a las mezclas de cemento portland, los parámetros establecidos en la literatura

[9] no pueden ser aplicados por igual a todas las mezclas.

Además, no sería viable analizar con dos edades solamente debido a que más adelante la resistividad podría aumentar como es el caso de la M1-N que a 14 días está obteniendo ya una resistividad de 20.6 KΩ.cm, que nos colocaría en velocidad de corrosión moderada/lenta, acorde a la literatura (Solís Carcaño *et al.*, 2004).

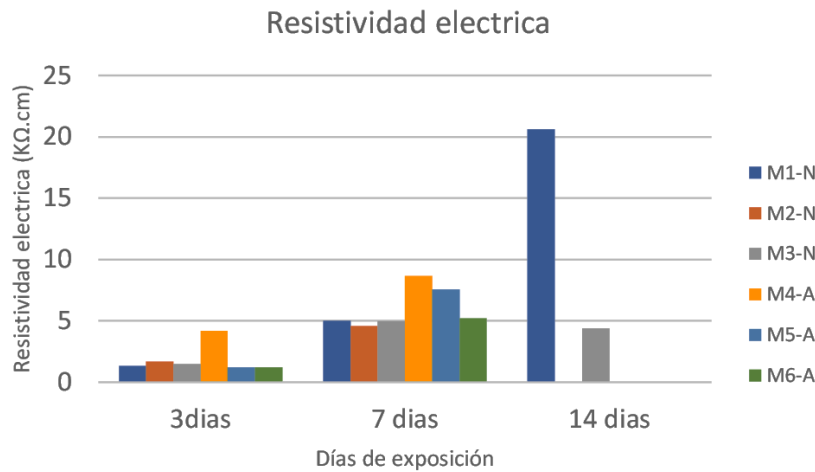


Figura 2. Resistividad eléctrica hasta 14 días para todas las mezclas.

3.3 Velocidad de pulso ultrasónico

Para el estudio de velocidad de pulso ultrasónico se tienen datos de todas las mezclas para las edades de 24 horas y 3 días, para 7 días faltan datos de M2-N Y M6-N, solo se estudiaron las mezclas M1-N y M3-N para 14 días.

Las mezclas de cierta manera se están comportando similar, tienen tendencia a disminuir su velocidad de pulso. La M1-N a 3 y 7 días se mantiene constantes, sin embargo, para el día 7 esta baja hasta 3.43 km/s, esto puede ser debido a la misma heterogeneidad del material y a los múltiples factores que influyen en su proceso de fabricación, manipulación y colocación.

De acuerdo con los criterios de Leslie y Cheesman (Montgomery, y Runger, 2003), tendríamos que nuestras mezclas M1-N, M3-N, M4-A y M5A obtienen una clasificación de cuestionable ya que la velocidad de onda se encuentra entre 3660 a 350. Para las mezclas M2-N y M6-A se valora como bueno, pero ambas mezclas solo tienen datos hasta 3 días por lo que aún no es significativo poder estimar su clasificación.

Sin embargo, estos criterios están establecidos para cemento portland, y no sería un parámetro exacto ya que el mecanismo de reacción es distinto, se recomienda determinar nuevos parámetros de referencia para poder comparar este tipo de materiales.

3.4 Correlaciones

De acuerdo con los datos que se tienen hasta el momento se puede estimar algunos puntos de la correlación, es importante mencionar que estas correlaciones que se presentan no tendrán aún buen porcentaje de confiabilidad debido a que aún no tienen todos los datos requeridos, pero si bien sí se puede ver la tendencia que tendrán, hay que aclarar de igual forma que para algunas mezclas no fue posible realizar cierta correlación debido a los pocos datos que se tienen.

3.4.1 Coeficiente de correlación de Pearson

Pulso ultrasónico vs resistencia a la compresión

Se realizó la correlación para las mezclas M1-N, M3-N, M4-A Y M5-A, debido a que estos ya tenían suficientes datos para observar si tendrá una correlación, así como el tipo al que tiende.

En la figura 4 se puede observar las cuatro correlaciones obtenidas, se observa que al momento existe una correlación, así como que se tiene una relación inversa eso se complementa con la tabla 3 en donde se

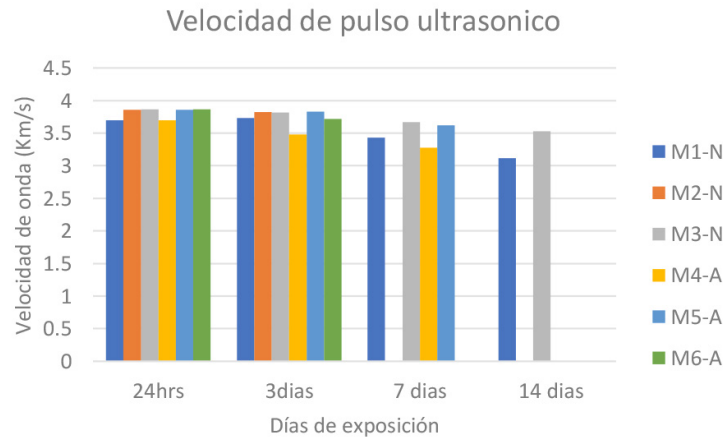


Figura 3. Velocidad de pulso ultrasónico a 14 días para todas las mezclas.

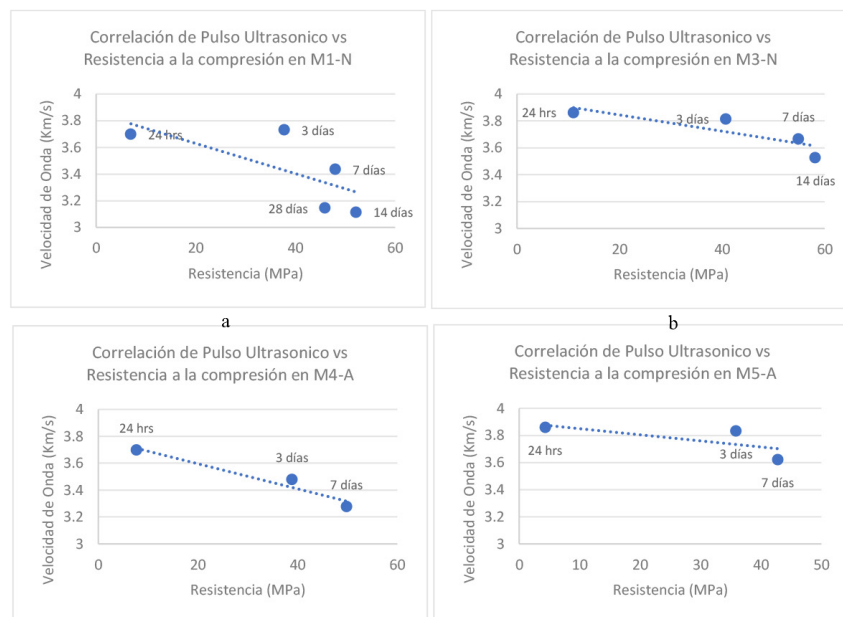


Figura 4. a) Correlación de Pulso ultrasónico vs resistencia a la compresión de M1-N.

b) Correlación de pulso ultrasónico vs resistencia a la compresión de M3-N.

c) Correlación de pulso ultrasónico vs resistencia a la compresión de M4-A. **d)** Correlación de pulso.

muestra el coeficiente de correlación de Pearson, así como su R^2 , la cual nos da el nivel de confiabilidad.

En una correlación lineal el coeficiente de Pearson debe tender a 1 o -1 según corresponda, si tenemos un coeficiente de 1 o -1 es una correlación perfecta, esto quiere decir que entre más cerca se encuentre a la unidad este será más confiable y eso se puede comprobar con su coeficiente de correlación (Casali *et al.*, 2007)

El coeficiente de correlación (R^2) nos ayudará a interpretar el grado de correlación, en otras palabras, que tan buena o mala será nuestra relación, y para ella existen ciertos rangos que se expresan en la siguiente tabla donde aparece su clasificación.

En este caso en la tabla 3 se puede apreciar que la mezcla M4-A tienen una excelente correlación, siguiendo con la mezcla M3-N que se le podría considerar una correlación regular. En el caso de las mezclas M1-N y M5-A que son las que tienen una confiabilidad más baja, obteniendo un valor de R^2 de 0.49 y 0.50 y con ello podemos asegurar que hasta el momento tienen una correlación mala.

Este valor puede modificarse ya que a mayor número de datos la R^2 será más alta, y en este caso aún son pocos valores. Las mezclas M3-N Y M4-A tiene mejores resultados al tener una R^2 de 0.72 y 0.94 correspondiente, siendo M4-A la que tiene un mejor grado de correlación.

Es importante observar tanto en la figura 5 como en la tabla 4 que nuestra correlación está siendo inversa o negativa, ya que en lugar de tender a 1 esta tiende a -1.

Este valor puede modificarse ya que a mayor número de datos la R^2 será más alta, y en este caso aún son pocos valores. Las mezclas M3-N Y M4-A tiene mejores resultados al tener una R^2 de 0.72 y 0.94 correspondiente, siendo M4-A la que tiene un mejor grado de correlación.

Es importante observar tanto en la imagen 10 como en la tabla 4 que nuestra correlación está siendo inversa o negativa, ya que en lugar de tender a 1 esta tiende a -1.

Tabla 2. Clasificación del grado de correlación.

Correlación	Rango
Perfecta	$R^2 = 1$
Excelente	$0.9 \leq R^2 < 1$
Buena	$0.8 \leq R^2 < 0.9$
Regular	$0.5 \leq R^2 < 0.8$
Mala	$R^2 < 0.5$

Tabla 3. Coeficiente de Pearson, ecuación de la gráfica y R^2 para correlación de pulso ultrasónico vs resistencia a la compresión.

Mezcla	Coeficiente de Pearson	Ecuación de la grafica	R^2
M1-N	-0.7	$y = -0.0113x + 3.8555$	$R^2 = 0.4967$
M3-N	-0.85	$y = -0.006x + 3.9648$	$R^2 = 0.7249$
M4-A	-0.97	$y = -0.0093x + 3.7822$	$R^2 = 0.9417$
M5-A	-0.7	$y = -0.0045x + 3.8946$	$R^2 = 0.5017$

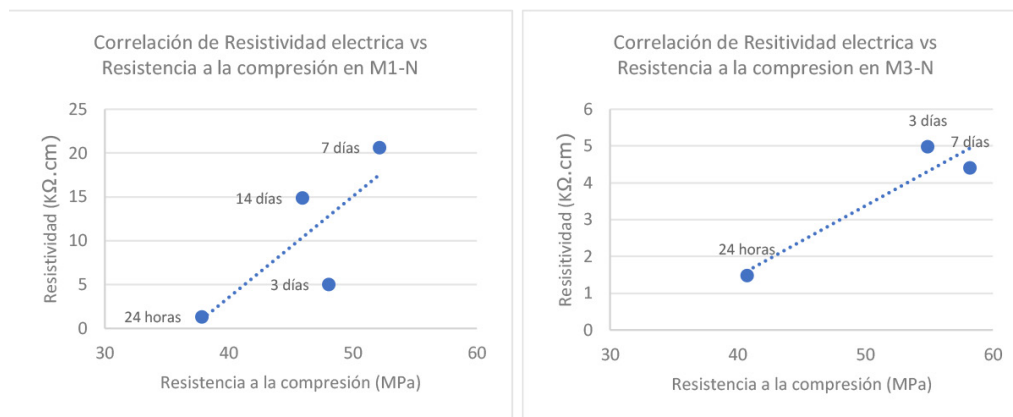


Figura 5. a) Correlación de resistividad eléctrica vs resistencia a la compresión de M1-N.
b) Correlación de resistividad eléctrica vs resistencia a la compresión de M3-N.

Tabla 4. Coeficiente de Pearson, ecuación de la gráfica y R^2 para correlación de resistividad electrica vs resistencia a la compresión.

Mezcla	Coeficiente de Pearson	Ecuación de la grafica	R^2
M1-N	0.784889168	$y = 1.1519x - 42.531$	$R^2 = 0.6161$
M3-N	0.945111388	$y = 0.1912x - 6.1857$	$R^2 = 0.8932$
M4-A	-0.97	$y = -0.0093x + 3.7822$	$R^2 = 0.9417$
M5-A	-0.7	$y = -0.0045x + 3.8946$	$R^2 = 0.5017$

Resistividad eléctrica vs resistencia a la compresión

Para la correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión se seleccionó solo las mezclas M1-N y M3-N, como ya se había mostrado en apartados antes son las que tienen más datos obtenidos hasta el día de hoy.

Se puede observar tanto en la figura 5 como en la tabla 4 que esta correlación es directa o positiva, o sea que su coeficiente de Pearson tiende a 1. A pesar de tener pocos valores la R^2 de la mezcla M3-N es buena, la M1-N se presenta menor, pero tendiendo a una correlación regular, podría esperarse que más adelante con más valores la R^2 aumente.

4. Conclusiones

Basándonos en el programa experimental podemos percibir que aún faltan obtención de datos y resultados para poder especificar con exactitud una correlación entre las pruebas no destructivas y la resistencia a la compresión, sin embargo, se pueden obtener las siguientes conclusiones preliminares:

- Hasta el momento la tendencia de los datos entre la resistencia a la compresión y las pruebas no destructivas revela la existencia de una correlación entre ellas, sin embargo, se presentan en distinto grado,

teniendo algunas correlaciones malas, regulares, buenas y excelentes basándose estadísticamente en el coeficiente de Pearson, así como en el coeficiente de correlación.

- A edades tempranas la velocidad de pulso ultrasónico se observa baja, quedando pendiente verificar si esta tendencia continúa o si existe un incremento a edades tardías.
- Los datos iniciales muestran una correlación positiva entre la resistividad y la resistencia a la compresión, esperando que esta tendencia continúe a edades posteriores.
- La resistencia a la compresión en todas las mezclas parece evolucionar favorablemente en el tiempo, esperando mantener esta tendencia a edades tardías.

5. Agradecimientos

Gracias al instituto de ingeniería civil de la universidad autónoma de nuevo león por ofrecerme sus instalaciones para desarrollar mi experimentación, así mismo al organismo de CONACYT por otórgame apoyo económico.

6. Referencias

- Andrade, C., & D'Andrea, R. (2016). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*. <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- ASTM International. (2001). Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method 1. Current.
- ASTM Standard C805. (2002). Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0805>
- C, A. C. (1989). Pulse Velocity Through Concrete 1. Annual Book of ASTM Standards.
- Casali, R. A., Caravaca, M. A., Acevedo, C., Miño, J. C., Marcela, B., & Torra, R. (2007). Predicción de la Resistencia a la Compresión y Determinación de Propiedades Estructurales a partir de Ensayos no Destructivos . *IV Conferencia Panamericana de END*.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Montgomery, D., & Runger, G. C. (2003). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Probabilidad y Estadística Aplicadas a La Ingeniería, p. 486. <https://doi.org/QA276.12.M645>
- Neupane, K. (2016). "Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry." *Mechanics of Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.09.012>
- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2020). Alkali activated metakaolin with high limestone contents – Statistical modeling of strength and environmental and cost analyses. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications. In *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. <https://doi.org/10.1533/9781845696382>
- Purdon AO. (1940). The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal Society of Chemical Industry*.
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, É. I., & Castillo Pak, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*. 41-52

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



MATERIALES Y NANOMATERIALES

Efecto de la variación de diferentes parámetros durante la síntesis de zeolita LTA

Y. Hernandez-Alejandre, I. Flores-Vivián

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: ismael.floresvvn@uanl.edu.mx

Resumen

Las zeolitas son materiales aluminosilicatos que poseen múltiples cualidades en distintos ámbitos, gracias a sus diversos tipos de estructuras, tamaños y propiedades. Por lo anterior, para esta investigación se ha propuesto sintetizar la zeolita A, para la cual se propone modificar las características de la síntesis por vía sol-gel, esto con el fin de reducir el tamaño de las partículas y volverlas amorfas, para posteriormente su aplicación en materiales cementantes. De los resultados se observó que la disminución del tiempo de aplicación de temperatura resultada en menores tamaños de partícula y estructuras amorfas.

Palabras clave: síntesis; sol-gel; zeolita; nanozeolita; tamaño de partícula.

Abstract

Zeolites are aluminosilicate materials that possess multiple qualities in different fields, thanks to their different types of structures, sizes, and properties. Therefore, for this research it has been proposed to synthesize zeolite A, for which it is proposed to modify the characteristics of synthesis by sol-gel method, this in order to reduce the size of the particles and make them an amorphous, and then their application in cementing materials. The results showed that the decrease in temperature application time resulted in smaller particle sizes and amorphous structures.

Keywords: synthesis, sol-gel, zeolite, nanozeolite, particle size.

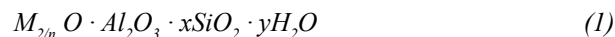
Resumo

Zeolites são materiais aluminossilicatos que possuem múltiplas qualidades em diferentes campos, graças aos seus diferentes tipos de estruturas, tamanhos e propriedades. Portanto, para esta pesquisa foi proposto sintetizar o zeólita A, para o qual se propõe modificar as características da síntese pelo método sol-gel, isto a fim de reduzir o tamanho das partículas e torná-las amorfas, e posteriormente sua aplicação em materiais cimentantes. Os resultados mostraram que a diminuição do tempo de aplicação da temperatura resultou em tamanhos menores de partículas e estruturas amorfas.

Palavras-chave: síntese; sol-gel; zeólito; nanozeólito; tamanho da partícula.

1. Introducción

Las zeolitas son materiales aluminossilicatos, en las que la sustitución de parte de la sílice (Si) por el aluminio (Al) u otros metales, provocando una carga negativa en la estructura. Además, las zeolitas cuentan con cationes, generalmente de sodio (Na), potasio (K) u otros metales alcalinos o alcalinotérreos, dentro de la estructura de los poros. Los marcos zeolíticos son redes compuestas de átomos T tetraédricos (T = Si, Al, etc.) unidos por iones de oxígeno. La fórmula empírica de las zeolitas está dada por la ecuación 1, donde: M es el catión (Na^+ , K^+); n es la valencia catiónica; x es igual o mayor a 2; y y es la cantidad de agua de unión.



La primera zeolita sintética fue hecha de Na, Si y Al en los laboratorios de Linde en Tonawanda, NY. Se denominó zeolita A, siendo la primera, y se encontró que estaba compuesta de jaulas de sodalita dispuestas para dar poros de 8-MR (Membered Rings). La zeolita A también fue capaz de adsorber agua y n -parafinas. Su primera aplicación comercial fue como agente de secado y todavía se usa comúnmente (Duxson *et al.*, 2007). Las principales estructuras de zeolita utilizadas en la separación de hidrocarburos lineales y son las mismas que se utilizan en muchos procesos catalíticos. La estructura LTA tipo A se puede utilizar en el secado, recuperación de CO_2 del gas natural, recuperación de O_2 del aire, así como una separación de hidrocarburos de parafina (Mintova, 2001).

La nanotecnología aplicada en materiales de construcción hace que estos puedan adquirir propiedades de resistencia mayores, ya que las nanopartículas pueden llenar huecos, actuar como núcleos activos que incrementan el proceso de hidratación, ayudan a reducir la porosidad, hasta crear superficies impermeables. Los procesos de producción de nanomateriales suelen clasificarse en dos tipos, donde al primero se le denomina de “arriba-abajo”, que es cuando se reduce el tamaño del material de partida a una escala nanométrica. El segundo tipo es de “abajo-arriba”, es decir, se van formando estructuras átomo por átomo, o molécula por molécula, incrementando el tamaño del material a una escala nanométrica. La síntesis química por vía sol-gel es un proceso con enfoque “abajo-arriba”, mediante el cual se pueden preparar polvos, fibras, películas delgadas y monolitos, los cuales no necesitan tratamiento o procesamiento adicional. Algunas de las ventajas que provee la síntesis por sol-gel, es su baja temperatura de procesamiento y homogeneidad a nivel molecular. En el proceso sol-gel, el sol es una suspensión coloidal de partículas en un líquido; y el gel es una sustancia que contiene una red sólida continua encerrada en una fase líquida continua. En el proceso sol-gel, se forma un sol a partir de un precursor dado y este sufre ciertos cambios químicos y físicos, crece en tamaño y forma un gel. El proceso sol-gel típico consiste en hidrólisis y condensación de los precursores. A menudo se utilizan solventes orgánicos o acuosos para disolver a los precursores y catalizadores para promover las reacciones (Chao Li *et al.*, 2010).

El presente estudio se centra en la caracterización de zeolitas LTA sintetizadas por el método sol-gel, donde la temperatura, el tiempo de mezclado e incubación, así como el filtrado se modificaron durante la producción, con el fin de obtener tamaños de partícula nanométricos y una estructura amorfa. Las zeolitas sintetizadas se caracterizaron mediante técnicas de DLS y MEB para obtener los tamaños de partículas resultantes. Además, los productos se analizaron mediante otras pruebas físicas y químicas, como: el DRX, Densidad y FTIR.

2. Metodología Experimental

La síntesis de las zeolitas se realizó por el método sol-gel mediante los procedimientos que indica la IZA (Mintova, 2001), se modificaron las variables de tiempos de mezclado e incubación, temperatura y tipo de filtrado para la obtención del tamaño de partícula deseado. Una vez obtenidas las zeolitas sintetizadas bajo diferentes condiciones, estas fueron comparadas contra una zeolita natural tipo clinoptilolita. La caracterización de estos materiales se evaluó mediante técnicas de DRX, MEB-EDS, DLS y FTIR.

2.1 Zeolita Natural

La zeolita natural tipo clinoptilolita fue obtenida de la mina San Francisco, ubicada en S. L. Potosí, la cual fue sometido a molienda durante 120 minutos en molino de bolas con la finalidad de reducir su tamaño de partícula. Tras la molienda se obtuvo un $D_{50} = 30.4 \mu\text{m}$.

2.2 Zeolita LTA

La zeolita LTA tipo A, se sintetizó de acuerdo con el procedimiento de la IZA, se fabricó una primera zeolita donde se obtuvieron tamaños de partícula de alrededor de 2 a 3 μm siendo esta la referencia para las variaciones subsecuentes. Las síntesis posteriores se les disminuyó la temperatura de incubación, el tiempo de incubación, el tiempo de mezclado y el tipo de filtrado.

2.1.1 Zeolita LTA Referencia

El procedimiento de referencia para la elaboración de la zeolita LTA consiste en poner a mezclar una cantidad de NaOH con agua para formar una solución, enseguida la solución se separa en dos volúmenes iguales, donde al primero se le añade aluminato de sodio ($\text{NaO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : 3 \text{H}_2\text{O}$) y se mezcla por aproximadamente 10 minutos, al segundo volumen se le agrega el metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : 5 \text{H}_2\text{O}$) y se mezcla por aproximadamente 20 minutos. Se vierte la solución del metasilicato en el aluminato y se mezcla por 10 minutos más hasta hacer que el gel se homogenice. Incubar el gel por 3 o 4 h a 100 °C. Transcurrido el tiempo, enfriar a menos de 30 °C para lavar hasta reducir el pH a 9. Filtrar los sólidos y dejar secar a 100 °C durante la noche.

2.1.2 Variaciones en síntesis de Zeolita LTA

Para disminuir los tamaños de partícula de la síntesis de referencia, se propusieron modificaciones en cuanto a la temperatura, tiempos de mezclado e incubación, etc. La matriz experimental de las modificaciones realizadas al procedimiento original se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Denominación y características de síntesis.

Nombre	Tiempo de mezclado de Aluminato min	Tiempo de mezclado Metasilicato min	Tiempo de mezclado del gel min	Tiempo de incubación	Temperatura de incubación °C	Temperatura de secado °C
LTA 1	10	20	10	3:30 h	100	100
LTA 5	10	20	10	2:00 h, 2:00 h	30,100	100
LTA 6	30	45	10	1:00 h	100	100
LTA 7	30	45	10	2:00 h	100	100
LTA 8	30	45	10	1:00 h	70	100
LTA 9	30	45	10	2:00 h	70	100
LTA 10	60	120	10	1:00 h	100	100
LTA 11	60	120	10	2:00 h	100	100
LTA 12	10	20	10	1:00 h	100	100
LTA 13	10	20	10	10 min	100	100
LTA 14	10	20	10	20 min	100	100

3. Resultados Preliminares

3.1 Caracterización de materiales

3.1.1 Zeolita Natural

La zeolita natural tipo clinoptilolita, se analizó mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X, donde la relación Si/Al presente es de 13.3 aproximadamente, lo que indica un alto porcentaje de silicio, dichos resultados se pueden observar en la tabla 2.

Se realizó el análisis de Difracción de Rayos X, para visualizar las fases mineralógicas del material y corroborar una estructura amorfa. En la figura 1. se puede observar que se presentan los picos característicos principales en los ángulos 10°, 23° y 30° (Montes-Luna *et al.*, 2015). Se encontró que también presenta un halo amorfo entre los 15 y los 35°.

En el análisis de DLS se obtuvo empleando una concentración de 0.05 % y una dispersión ultrasónica de 30 min. a una intensidad de 70 %, 20 kHz. Los resultados se muestran en la figura 2 y en la tabla 3. El pico de mayor intensidad ubicado alrededor de los 400 nm presenta tamaños de partícula mayores. Por otro lado, el pico de menor intensidad ubicado alrededor de los 120 nm concentra un porcentaje menor partículas más pequeñas. De los resultados, se obtuvo que el tamaño promedio de la zeolita natural es de 347.4 nm.

Las micrografías realizadas a la zeolita natural en la figura 3, se puede observar una estructura amorfa con una morfología de partículas redondeadas. Tras la molienda se obtuvo un $D_{50} = 30.4 \mu\text{m}$.

3.1.2 Zeolita LTA Sintetizada Referencia

En la tabla 4 se presenta el análisis químico de Fluorescencia de Rayos X del material, donde se muestran los porcentajes de los componentes expresados como óxidos. Sus principales componentes son SiO_2 , Al_2O_3 , y Na_2O .

Tabla 2. Análisis FRX Zeolita Natural.

Compuesto	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
Concentración (%)	6.422	85.516	1.600	1.478	0.188	0.776	2.877	466.3 ppm

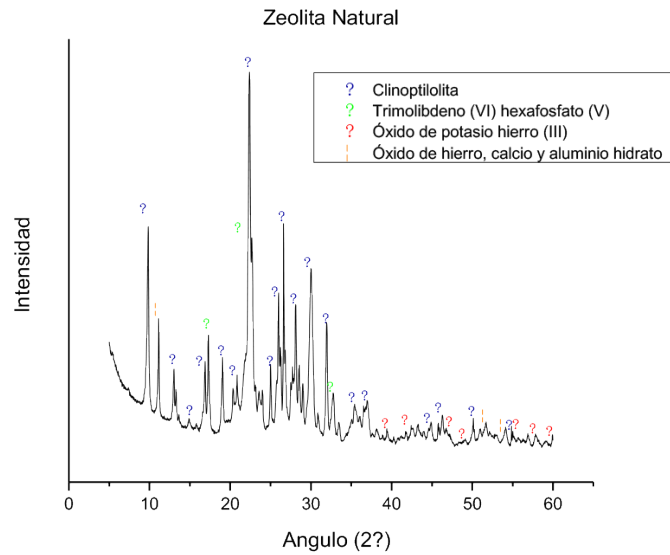


Figura 1. Difractograma de Rayos X de Zeolita Natural.

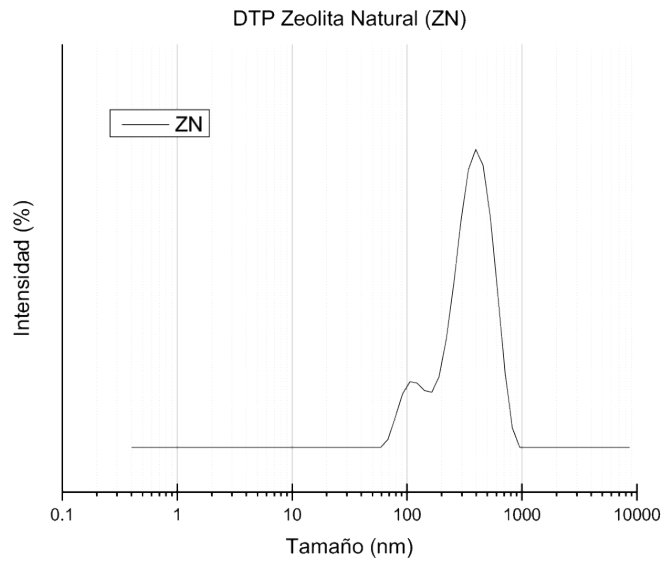


Figura 2. Distribución de tamaño de partícula mediante análisis DLS Zeolita Natural.

Tabla 3. Análisis DLS Zeolita Natural.

Pico No.	Tamaño (nm)	% Intensidad
2	119.2	14.5
3	0.0	0.0
Tamaño promedio (nm)		347.4

Tabla 4. Análisis FRX Zeolita LTA Sintetizada Referencia.

Compuesto	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
Concentración (%)	13.109	15.687	69.462	0.151	0.659	0.777	806.3 ppm

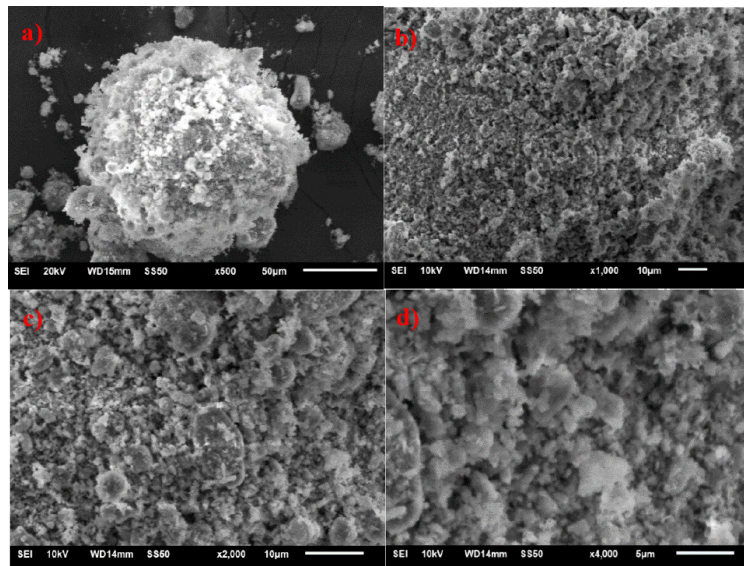


Figura 3. Micrografías (MEB) Zeolita Natural. a) x500, b) x1000, c) x2000, d) x4000.

Del análisis de Difracción de Rayos X, en la figura 4, se encontró evidencia de un material cristalino, el cual se visualiza en las micrografías de MEB en la figura 6. Las fases mineralógicas presentes son zeolita A, zeolita 5A y trióxido de fosforo cálcico.

De acuerdo con el análisis de DLS se obtuvo la figura 5, empleando una concentración de 0.05 % y una dispersión ultrasónica de 30 min. a una intensidad de 70 %, 20 kHz. Los resultados se resumen en la tabla 5. El pico de mayor intensidad ubicado alrededor de los 750 nm, presenta tamaños de partícula mayores. Por otro lado, el pico de menor intensidad ubicado alrededor de los 130 nm concentra un porcentaje menor partículas más pequeñas. De los resultados, se obtuvo que el tamaño promedio de la Zeolita LTA Sintetizada Referencia es de 678.6 nm.

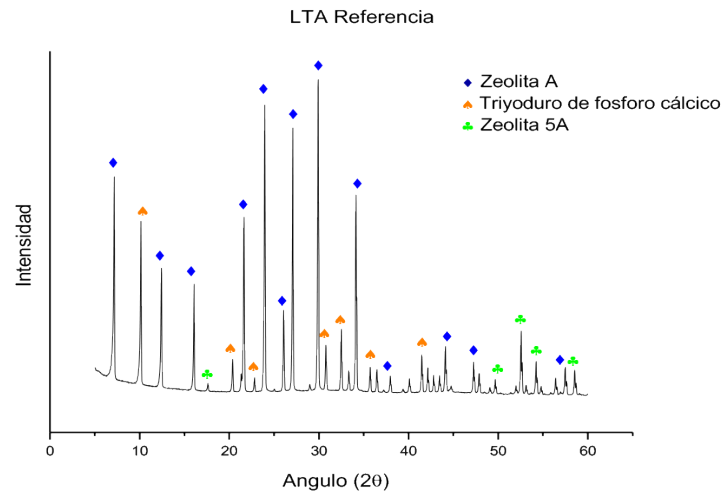


Figura 4. Difractograma de Rayos X de Zeolita LTA Referencia.

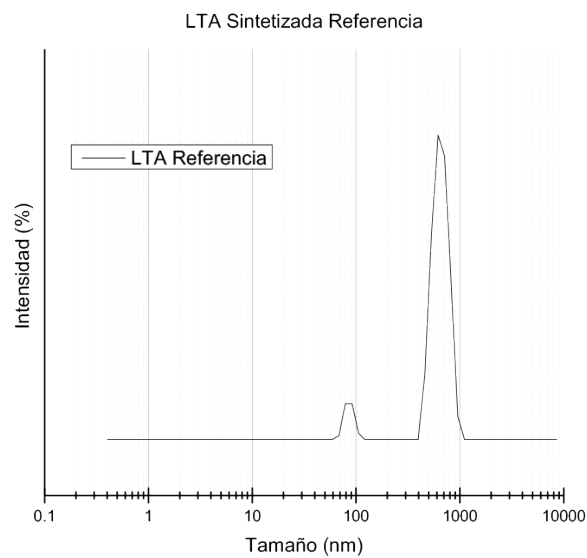


Figura 5. Distribución de tamaño de partícula mediante DLS Zeolita LTA Sintetizada Referencia.

Tabla 5. Análisis DLS Zeolita LTA Sintetizada Referencia.

Pico No.	Tamaño (nm)	% Intensidad
1	734.3	77.6
2	127.9	22.4
3	0.0	0.0
Tamaño promedio (nm)		678.6

En las micrografías presentadas en la figura 6 se observan aglomeraciones del material. La morfología observada es una estructura cristalina cubica con tamaños de partícula de 2 a 3 μm mayormente.

3.1.3 Zeolitas LTA Sintetizadas con modificaciones

Las síntesis realizadas y sus condiciones se muestran en la tabla 1. donde se analizaron los resultados de tamaños de partículas obtenidos mediante la técnica de dispersión de luz dinámica. Las muestras se pusieron en una solución de agua destilada en concentración del 0.05 %, donde fueron sometidas a dispersión ultrasónica a una intensidad de 70 % en periodos de 10, 20, y 30 minutos, para posteriormente ser analizadas en 15 corridas de duración de 10 segundos en el DTP-Nano.

Los resultados obtenidos de DTP-Nano, se muestran en la figura 7, donde se puede observar la distribución granulométrica en nanómetros. Las modificaciones de la síntesis de las zeolitas lograron disminuir su tamaño comparado con la referencia.

Se realizó un análisis de Difracción de Rayos X, a la zeolita LTA 5, que se muestra en la figura 8. donde se puede apreciar que la tendencia original de la referencia cambia completamente. En el Difractograma se puede observar un halo amorfo muy marcado de entre los 15 y 35 grados de (2θ), por lo cual el material tendería a ser reactivo en matrices cementantes.

Se escogieron cuatro síntesis modificadas y la de referencia para hacerle análisis FT-IR en el intervalo en número de onda $4000-400\text{ cm}^{-1}$, los cuales se muestran en la figura 7. Las señales mostradas provienen de las condiciones del análisis y la absorción de frecuencias definidas de las zeolitas. Las zeolitas exhiben las vibraciones de tensión de los puentes de H entre el agua adsorbida físicamente que hay en las cavidades, así como los oxígenos superficiales.

Las vibraciones observadas entre $400-500\text{ cm}^{-1}$ generalmente son ocasionadas a bandas débiles, donde su frecuencia varía inversamente con el radio iónico de los cationes octaédricos, que se podrían confundir con

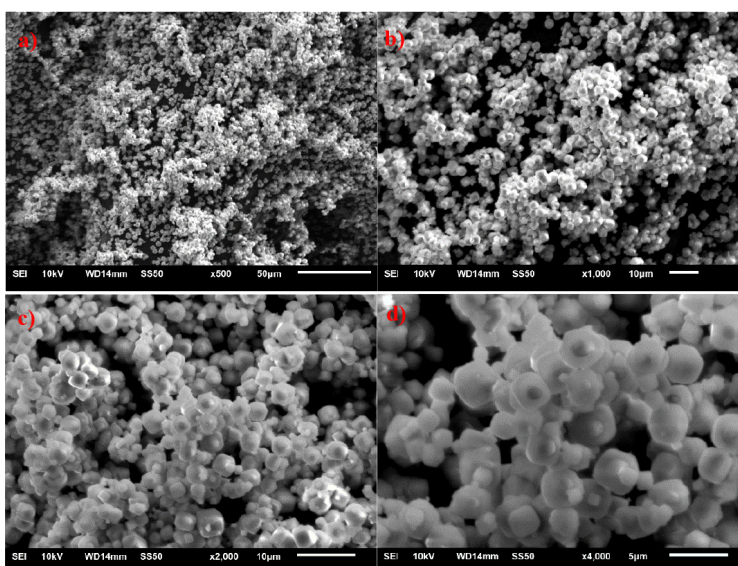


Figura 6. Micrografías (MEB) Zeolita LTA Referencia. a) x500, b) x1000, c) x2000, d) x4000.

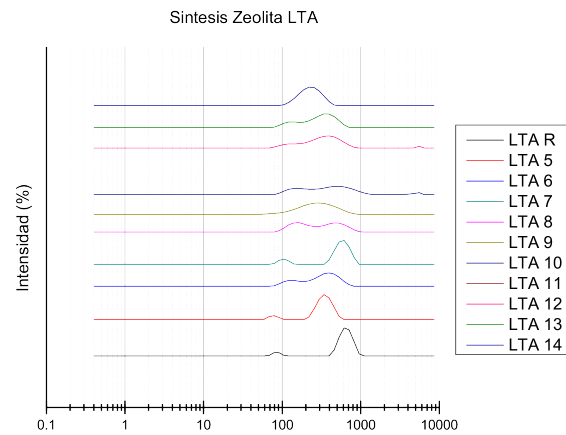


Figura 7. Distribución de tamaño de partícula de síntesis de zeolitas LTA.

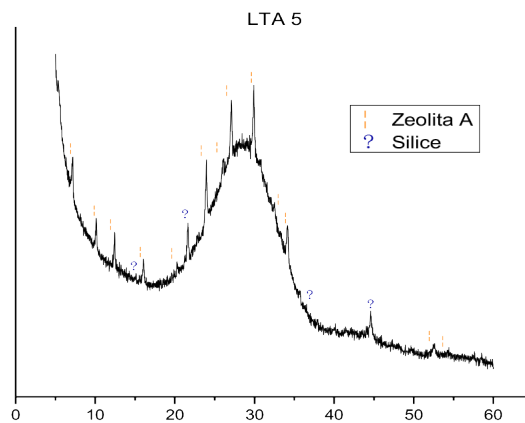


Figura 8. Difractograma de Rayos X de Zeolita sintetizada LTA 5.

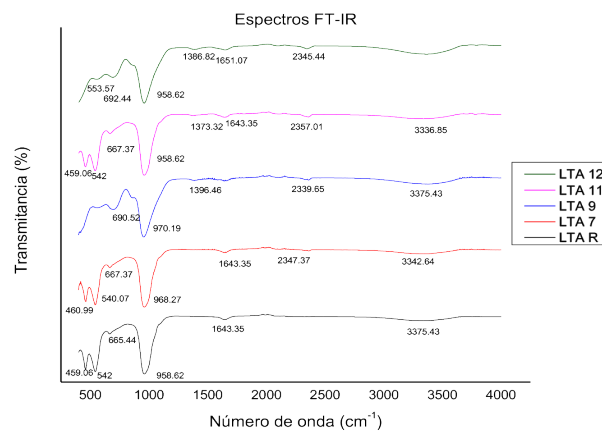


Figura 9. Espectros FT-IR de zeolitas LTA

haluros de alquilo. Las bandas entre $3400\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ que se traslapa con las vibraciones de tensión de los hidroxilos en la capa octaédrica. Este tipo de interacción contempla la vibración de tensión del OH unido a aluminios octaédricos (Al_2OH) con su carga negativa exacerbada por la proximidad de una sustitución de Al por un metal (M^+). Así como las vibraciones de tensión y de deformación de los H-O-H correspondientes al agua molecular adsorbida. Las vibraciones de tensión en el plano de los Si-O-Si de la capa tetraédrica, dan generalmente fuertes bandas de absorción entre 970 y 1070 cm^{-1} que para el caso de esta zeolita LTA aparece aproximadamente a los 1000 cm^{-1} (Corona O *et al.*, 2009).

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de tamaño de partícula obtenidos, los materiales no son cien por ciento nanométrico, esto en relación con los procedimientos que indica la IZA. Lo anterior se pueda deber a que las nanopartículas estuvieran aglomeradas observándose entonces en el DTP tamaños de partículas mayores. Sin embargo, se ha logrado disminuir el tamaño de partícula y generar una distribución de partículas más uniforme, Por lo cual se tiene que encontrar un punto entre la temperatura y tiempo en la formación de los sólidos, donde se sugiere reducir el tiempo de aplicación y temperaturas. Además, sustituir el filtrado con bomba de vacío recomendado por la IZA, por centrifuga favorece el procedimiento de recolección de nanomateriales, ya que se observa que se pierde menos cantidad de partículas pequeñas en el lavado de los sólidos. De acuerdo con el Difractograma presentado en la figura 8, se concluye que la reducción de temperaturas favorece la formación de materiales amorfos, que para aplicaciones en materiales cementantes resulta ser prometedor.

Como trabajo a futuro es encontrar el procedimiento adecuado para la obtención de tamaños nanométricos en la síntesis de zeolitas. Caracterizar las zeolitas sintetizadas mediante técnicas de DLS, MEB, DRX y FT-IR, para concluir cual procedimiento es el óptimo de acuerdo con la aplicación que se le quiera dar. Evaluar la reacción que tienen las zeolitas sintetizadas en una matriz geopolimérica a base de metacaolín, y realizar los análisis correspondientes para concluir los efectos de reacción y beneficios de esta. Estudiar el efecto del pH en los sólidos sin lavado, resultantes de la síntesis de zeolitas LTA y evaluar su comportamiento de acuerdo con la reducción de activadores alcalinos, ya que a mayor pH se puede hacer un menor uso de NaOH.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y servicios brindados por el Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, de la Facultad de ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Al programa de CONACYT con numero de CVU: 1007074, por el apoyo económico brindado a lo largo de este periodo y al proyecto de CONACYT con CLAVE: CB 2017-2018 / A1-S-24552. A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo mediante el proyecto PAICYT 2020 con CLAVE: IT1348-20. Así como al número P/PROFEXCE-2020-19MSU00, por cubrir los cargos de las inscripciones.

6. Referencias

- Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*. 40. Pages 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.
- Corona O, Hernández M, Hernandez Ferney, Rojas F, Portillo Roberto, Lara Valmacco, Carlos F. (2009). Propiedades de adsorción en zeolitas con anillos de 8 miembros: I. microporosidad y superficie externa. *Materia-rio De Janeiro MATERIA*. 14. DOI: 10.1590/S1517-70762009000300004.
- Mintova, S. (2001). “Cap.VI”. *Verified Syntheses of Zeolitic Materials*, Amsterdam, Ed. 2, pp. 255-25.
- Montes-Luna, N. F. López, Y. A. P. Mercado, O. P. Camacho y G. C. d. León. (2015) Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. *Superficies y Vacío*. Volumen 21, Issues 1, Paginas 5-11. ISSN 1665-3521.
- P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven, J.S.J. van Deventer. (2007), The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 292, Issue 1. Pages 8-20. ISSN 0927-7757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





MATERIALES Y NANOMATERIALES

Clasificación logística entre UCS y $I_s(50)$ de material pétreo región Morelia Michoacán

M. A. Navarrete-Seras¹, F. J. Domínguez-Mota², E. M. Alonso-Guzmán³,
W. Martínez-Molina³, H. L. Chávez-García³, J. G. Tinoco-Ruiz²,
J. A. Guzmán-Torres¹

¹ Doctorado en Ciencias en Ingeniería Física F.C.F.M.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² F.C.F.M. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

³ Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: mnavarrete@umich.mx

Resumen

Los materiales pétreos se emplean en casi todos los procesos de edificación en la ingeniería civil. Las rocas se pueden utilizar como elemento estructural, como elemento decorativo, o como agregado pétreo en la elaboración de mezclas de concreto hidráulico y elaboración de mezclas asfálticas. Por todo lo anterior el estudio y uso de este material se vuelve muy importante, para conocer sus propiedades físicas y mecánicas, que permitan elaborar mezclas de concreto o mezclas asfálticas con mejores características. En el presente trabajo se estudiaron las relaciones entre diferentes datos de pruebas mecánicas, los datos que se utilizaron provienen de materiales pétreos de la región Morelia Michoacán México. El ensayo de carga puntual normada por ASTM D 5731-16, que describe el empleo de un equipo Point Load para determinar la resistencia mecánica en rocas no labradas con un tamaño aproximado 30 a 85 mm de diámetro, es una prueba que permite ahorrar tiempo ya que no se tiene que labrar la muestra. Otra de las pruebas empleadas fue la resistencia a compresión uniaxial de la cual se obtuvieron datos que en conjunto con los datos de point load, permiten aplicar técnicas de machine learning específicamente en la clasificación obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras clave: Rocas; correlación; regresión logística; machine learning.

Abstract

Stone materials are used in almost all building processes in civil engineering. Rocks can be used as a structural element, as a decorative element, or as stone aggregate in the production of hydraulic concrete blends and asphalt mixtures. For all the above mentioned, the study and use of this material becomes very important, to know its physical and mechanical properties, which allow the elaboration of concrete

mixtures or asphalt blends with better characteristics. In this work, there were studied the relationships among different data from mechanical tests, the data used came from stone materials from the region of Morelia Michoacán Mexico. The point load test regulated by ASTM D 5731-16, which describes the use of a point load equipment to determine the mechanical resistance in unworked rocks with an approximate size of 30 to 85 mm of diameter, is a test that allows saving time since the sample does not have to be worked. Another test used was the uniaxial compressive strength from which data was obtained which, together with the point load data, allows the application of machine learning techniques specifically in the classification, obtaining satisfactory results.

Keywords: Rocks; correlation; logistic regression; machine learning

1. Introducción

Las rocas se utilizan cada vez más en entornos extremos caracterizados por altas tasas de carga y altas presiones de confinamiento (Yao y Xia, 2019). Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y la solidificación del magma fundido. Se podrían subdividir en tipos plutónicos (intrusivos) y volcánicos (extrusivos) (Siegismund y Sneath, 2011). Además, se han excavado en las rocas piroclásticas cuevas, lugares de culto y casas creadas por el hombre, que a su vez se han utilizado en la construcción arquitectónica como piedra de construcción (Ínce y Fener, 2016). La resistencia a la compresión uniaxial (*UCS*) de los materiales rocosos es un parámetro crucial en el diseño de las estructuras de ingeniería que se construyen en las masas rocosas. Aunque los métodos sugeridos para la determinación de la *UCS* son bien conocidos y requieren procedimientos relativamente sencillos, la preparación de especímenes de núcleo estándar puede no ser fácil para los materiales rocosos de roca fuertemente unida y/o masas rocosas finamente estratificadas (Jalali *et al.*, 2019).

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de las rocas provenientes de diferentes bancos de materiales pétreos de la región Morelia Michoacán México, las muestras utilizadas se labraron en cubos de 5 cm por lado y con los datos se obtuvo el modelo matemático que permiten clasificar la resistencia a compresión uniaxial *UCS* a partir del índice de carga puntual corregido mediante fragmentos de roca irregulares, se correlacionan las variables mediante la regresión logística, todo lo anterior en base al aprendizaje automático.

2. Procedimiento

Se llevaron muestras de roca volcánica y triturada al laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la UMSNH, a las cuales se les realizaron pruebas mecánicas. Dentro de estas últimas se realizó resistencia a compresión uniaxial (D18.12, 2002) y índice de carga puntual (D18.12, 2016). Una vez que se obtuvieron los datos se aplicó regresión logística, la cual es una herramienta de machine learning que permitió la obtención del modelo matemático. A continuación, se describen las pruebas empleadas para obtener las variables utilizadas para el modelo de regresión logística.

2.1 Resistencia a Compresión uniaxial (UCS)

La resistencia a compresión simple o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica o cubica sin confinar en el laboratorio (D18.12 2002; González-De-Vallejo y Ferrer 2011; Navarro, Martínez, y Espinoza 2011).

La resistencia a compresión uniaxial se llevó a cabo en la máquina universal de pruebas, con este ensayo se pudo determinar la resistencia de cada una de las rocas mediante la siguiente

$$UCS = \frac{p}{a} \quad (1)$$

donde UCS es compresión uniaxial, p es la carga máxima aplicada, a es el área de la sección transversal.

2. 2 Ensayo de carga puntual

De acuerdo con la Norma D 5731-16 de la ASTM, el objeto de esta prueba es determinar la resistencia de las rocas al someterlas a cargas puntuales que se aplican mediante un par de piezas cónicas. Es una prueba de índice y está destinado a ser utilizado para clasificar y caracterizar la roca. Esta prueba de carga puntual se realiza sometiendo una muestra de roca a una carga cada vez más concentrada hasta que el fallo se produce por la división de la muestra.

Este ensayo permite la determinación del índice de resistencia de carga puntual no corregido (Is). Este debe ser corregido al diámetro equivalente estándar $De = 50 \text{ mm}$. Si el diámetro del espécimen está cerca de 50 mm (como con los núcleos NX), la corrección no es necesaria. El procedimiento para la corrección por tamaño puede ser obtenido gráficamente o matemáticamente por los procedimientos definidos por el ISRM, para obtener el valor para el $Is(50)$ en MPa (D18.12, 2016).



Figura 1. Muestras de cubos de 5 cm por lado Comanja (CO11) y Mascutan (K8). ¡



Figura 2. Aparato de carga puntual.



Figura 3. Muestra de roca ensayada en el aparato de carga puntual.

2.3 Aprendizaje automático

El aprendizaje automático se clasifica en general como aprendizaje supervisado, no supervisado, semisupervisado y de refuerzo. Un modelo de aprendizaje supervisado tiene dos tareas principales a realizar, la clasificación y la regresión. La clasificación consiste en predecir una etiqueta de clase nominal, mientras que la regresión consiste en predecir el valor numérico de la etiqueta de clase. (Shobha y Rangaswamy, 2018).

En este trabajo de investigación se utilizó regresión logística para analizar los datos obtenidos de las pruebas mecánicas antes descritas.

2.3.1. Regresión logística

El problema de la clasificación es igual que el problema de la regresión, excepto que los valores que ahora queremos predecir toman solo un pequeño número de valores discretos. El problema de clasificación binaria en el que se pueden tomar sólo dos valores, 0 y 1.

Por lo tanto, y \in , 0,1 también se llama la clase negativa, y 1 la clase positiva, y a veces también se denotan con los símbolos “-” y “+”. Dado x^i el correspondiente y^i también se llama la etiqueta para el ejemplo de entrenamiento (Yan-tak Ng, 2019).

La forma de la hipótesis $h_\theta(x)$ satisface $0 \leq h_\theta(x) \leq 1$. Las siguientes ecuaciones utilizan la función sigmoidea también llamada función logística.

$$\begin{aligned} h_\theta(x) &= g(\theta^T x) \\ z &= \theta^T x \\ g(z) &= \frac{1}{1 + e^{-z}} \end{aligned} \quad (2)$$

La función $g(z)$, asigna cualquier número real al intervalo (0, 1), por lo que es útil para transformar una función de valor arbitrario en una función más adecuado para la clasificación (Yan-tak Ng, 2019).

La forma en que se comporta nuestra función logística g es que cuando su entrada es mayor o igual a cero, su salida es mayor o igual a 0.5. El límite de decisión es la línea que separa el área donde $y = 0$ y donde $y = 1$. Es creada por nuestra función de hipótesis.

La función de costo para la regresión logística es:

$$J(\theta) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [y^{(i)} \log(h_\theta(x^{(i)})) + (1 - y^{(i)}) \log(1 - h_\theta(x^{(i)}))] \quad (3)$$

La forma general del gradiente de descenso es:

$$\text{Repeat} \left\{ \theta_j := \theta_j - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_j} J(\theta) \right\} \quad (4)$$

Y se utiliza el cálculo para obtener la derivada.

$$\text{Repeat} \left\{ \theta_j := \theta_j - \frac{\alpha}{m} \sum_{i=1}^m (h_\theta(x^{(i)}) - y^{(i)}) x_j^{(i)} \right\} \quad (5)$$

Se tienen que actualizar simultáneamente todos los valores de (Yan-tak Ng, 2019).

3. Resultados

Los resultados mostrados pertenecen a bancos de materiales triturados (AGC, Colegio) y materiales volcánicos.

En la figura 4 se muestra cada uno de los bancos de materiales pétreos. Se graficó *UCS* contra *Is(50)* y se puede ver que existe una gran dispersión de los datos por lo cual se procedió a aplicar regresión logística.

Dentro de la regresión logística existe la clasificación binaria, con la cual se pueden clasificar las rocas con mayor resistencia a compresión uniaxial (*UCS*) tal como se muestra en la figura 5, y obtener un límite de decisión mediante una recta. Esto nos permite darnos cuenta de una manera muy rápida en que zona se ubican nuestros datos y saber si el material tiene alta resistencia.

En la figura 6 podemos determinar mediante un límite de decisión, los materiales triturados y los volcánicos. Tal como era de esperarse y como se observa en dicha figura un gran porcentaje de los datos se separa de los datos de las rocas volcánicos.

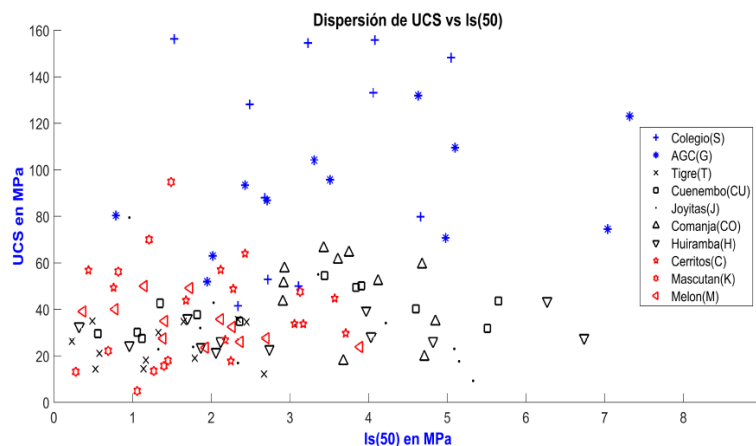


Figura 4. Dispersión de *UCS* vs. *Is(50)*.

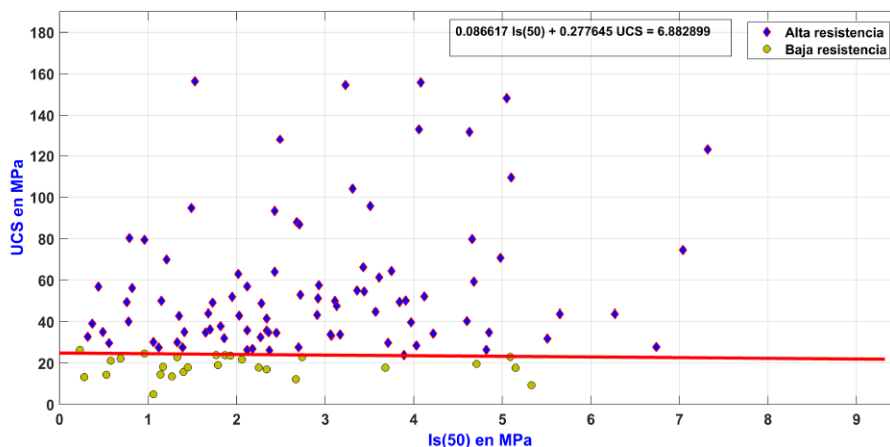


Figura 5. Modelo de regresión logística para los datos del material triturado.

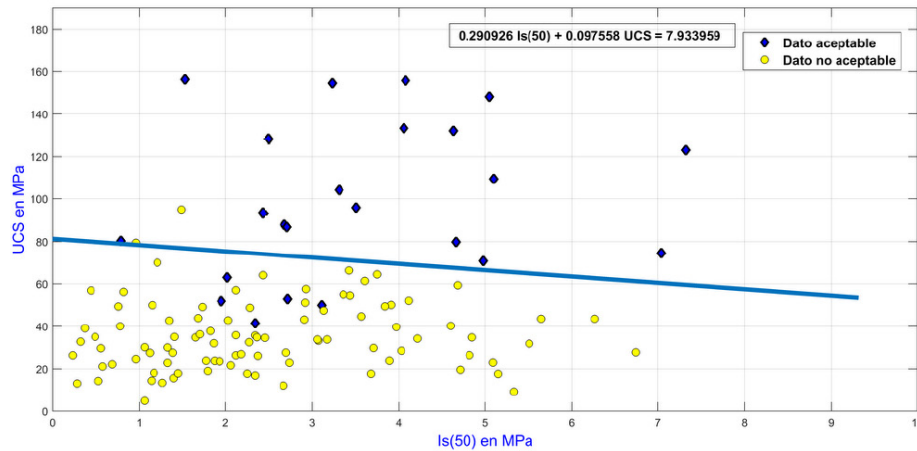


Figura 6. Modelo de regresión logística para los datos del material triturado.

4. Conclusiones

En la clasificación, mediante el límite de decisión se aprecia claramente que los volcánicos se agrupan en una sola zona independientemente del banco que se trate y los triturados se encuentran por encima del límite de decisión con la mejor resistencia a compresión uniaxial (*UCS*).

Además, los modelos de clasificación nos permiten ubicar los datos para las rocas en estudio de una manera rápida y con ello se puede determinar la relación de los datos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del CONACYT, la Coordinación de Investigaciones Científicas (CIC UMSNH), el Aula CIMNE Morelia, México, y el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, FIC UMSNH.

6. Referencias

- D18.12, A. S. (2002) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens (ASTM D2938-95(2002)). American Society for Testing Materials (ASTM).
- D18.12, A. S. (2016) Standard: D 5731-16. Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.
- İnce, İ. and Fener, M. (2016) 'A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks due to freeze-thaw cycle', *Journal of African Earth Sciences*, 120, pp. 134–140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.05.001>.
- Jalali, S. H. et al. (2019) 'Predicting of uniaxial compressive strength of some igneous and metamorphic rocks by block punch index and cylindrical punch index tests', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 119, pp. 72–80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.04.013>.
- Shobha, G. and Rangaswamy, S. (2018) 'Machine Learning', in, pp. 197–228. doi: 10.1016/bs.host.2018.07.004.

• **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



Siegesmund, S. and Snethlage, R. (2011) *Stone in Architecture Properties, Durability*. Fourth. Edited by Springer. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-14475-2.

Yan-tak Ng, A. (2019) 'Coursera Machine Learning', in Stanford University.

Yao, W. and Xia, K. (2019) 'Dynamic notched semi-circle bend (NSCB) method for measuring fracture properties of rocks: Fundamentals and applications', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.03.003>.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Durabilidad y Sustentabilidad





DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Durabilidad y Módulo de ruptura (MR) del concreto hidráulico adicionado con fibras inorgánicas

N. Díaz¹, E. M. Alonso¹, W. Martínez¹, H. L. Chávez¹, E. G. Navarro², R. M. Grajeda², J. A. Velázquez¹

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

² Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: ng.diaz.gonzalez@gmail.com

Resumen

En México, el cemento es indispensable para la construcción de obra civil, lo cual representa un costo significativo para las construcciones y a su vez un impacto ambiental considerable, por lo que en este trabajo se buscó la incorporación de fibras inorgánicas en las mezclas de concreto, y así poder evaluar sus propiedades físico-mecánicas, durabilidad e impacto ambiental para uso en pavimentos rígidos. Se caracterizaron los agregados pétreos y el cemento para el diseño de concreto por el método ACI, se realizaron las mezclas, se determinó el revenimiento y se fabricaron los elementos prismáticos para determinar pruebas no destructivas y destructivas a edades de 14, 28, 70 y 120 días. Los resultados indican que el PET disminuye la resistencia mecánica.

Palabras clave: Concreto; Pavimento; Fibras; Resistencia; Durabilidad.

Abstract

In Mexico, cement is essential for the construction of civil works, which represents a significant cost for constructions and in turn a considerable environmental impact, so in this work the incorporation of inorganic fibers in concrete mixtures was sought, and thus be able to evaluate its physical-mechanical properties, durability and environmental impact for use in rigid pavements. The stone aggregates and cement were characterized for the design of concrete by the ACI method, the mixtures were made, the slump was determined and the prismatic elements were manufactured to determine non-destructive and destructive tests at ages 14, 28, 70 and 120 days. The results indicate that PET decreases mechanical resistance.

Keywords: Concrete; Pavement; Fibers; Resistance; Durability.

Resumo

No México, o cimento é essencial para a construção de obras civis, o que representa um custo significativo para a construção e por sua vez um impacto ambiental considerável, portanto, neste trabalho buscou-se a incorporação de fibras inorgânicas no concreto e misturas de concreto, e assim poder avaliar suas propriedades físico-mecânicas, durabilidade e impacto ambiental para uso em pavimentos rígidos. Os agregados de pedra e o cimento foram caracterizados para o dimensionamento do concreto pelo método ACI, as misturas foram feitas, o abatimento foi determinado e os elementos prismáticos foram fabricados para determinar os ensaios destrutivos e não destrutivos aos 14, 28, 70 e 120 dias. Os resultados indicam que o PET diminui a resistência mecânica.

Palavras-chave: Concreto; Pavimento; Fibras; Resistência; Durabilidade.

1. Introducción

El uso del concreto hidráulico en México marca el desarrollo económico del país, lo cual genera grandes volúmenes de producción de cemento y que a su vez implican alta contaminación ambiental. Aunado a esto las zonas urbanas están construidas de concreto hidráulico principalmente, el cual en su mayoría presenta condiciones físicas y mecánicas adversas. De ahí el interés de mejorar las mezclas de concreto tradicional con adiciones sólidas que puedan incrementar las condiciones mecánicas actuales y la durabilidad de los elementos, y que además coadyuven con el medio ambiente. La adición de fibras inorgánicas de PET y de polipropileno presentan un comportamiento mecánico prometedor en la construcción de obras viales de pavimentos de concreto hidráulico (Kosmatka, 2004). Es por ello que en esta investigación se elaboraron 3 mezclas utilizando adiciones de fibras en un 0.8 % y una mezcla testigo, con la finalidad de comparar los resultados. Las mezclas elaboradas fueron: mezcla testigo (Tt), mezcla con adición de PET triturado (Tp), mezcla con adición de PET molido (Tpm) y mezcla con adición de polipropileno (Tpp).

2. Procedimiento

Se eligieron los materiales a utilizar para el concreto: cemento CPO 30R RS BRA, Cemento Portland Ordinario Resistente a los sulfatos con Baja Reactividad Alcali Agregado; agua potable de la red pública; agregados pétreos finos y gruesos (NMX-C-030-ONNCCE-2004) de origen volcánico y basáltico respectivamente; macrofibras de polipropileno, fibras de PET molido y fibras de PET triturado. Al cemento utilizado se le realizaron pruebas de: Densidad (NMX-C-152-ONNCCE-2010) y Tiempos de Fraguado (NMX-C-059-1997-ONNCCE), para verificar su reacción. Al agua se le realizaron análisis químicos de acuerdo a la norma (NMX-C-122-ONNCCE-2004), para garantizar su pureza. A los agregados pétreos se le realizaron pruebas de: % Humedad de absorción (NMX-C-165-ONNCCE-2004, NMX-C-164-ONNCCE-2004), Densidad (ASTMC 128-01), Masa volumétrica seca varillada (NMX-C-073-ONNCCE-2004), Masa volumétrica seca suelta (NMX-C-073-ONNCCE-2004) y Granulometría (NMX-C-077-1997-ONNCCE). Con estos datos se diseñó el concreto en base al método ACI, se elaboró la mezcla y al concreto fresco se le hicieron pruebas de revenimiento, para analizar su fluidez de acuerdo al método ACI (ACI 211.1-91). Se elaboraron 4 mezclas para un $f'c$ de 300 kg/cm², se fabricaron 12 elementos prismáticos de 15x15x60 cm de cada mezcla (NMX-C-159-ONNCCE-2004) y después de 24 horas se desmoldaron para continuar con su curado por inmersión hasta cumplir la edad de prueba (Navarro, 2011). Se realizaron pruebas de Resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCCE-2016) (RED DURAR), velocidad de pulso ultrasónico (NMX-C-275-ONNCCE-2004) (RED DURAR) y Flexión (NMX-C-191-ONNCCE-2015) a edades de 14, 28, 70 y 120 días.

3. Resultados

Los materiales analizados para esta investigación son los más abundantes y comunes para el uso en pavimentos. En la tabla 1 se presentan las características físico-mecánicas de cada material utilizado en el diseño del concreto por el método ACI para cada una de las 4 mezclas realizadas, destacando que todas las pruebas se realizaron por triplicado.

Los resultados de la prueba no destructiva de resistividad eléctrica se muestran en la figura 1, en la cual se observa que la mezcla Tpm presentó un resultado desfavorable.

Los resultados de la prueba no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico se muestran en la figura 2, en la cual se observa que la mezcla Tt presentó mejor comportamiento respecto a las otras mezclas a edades tardías, caso contrario a edades tempranas. Sin embargo las 4 mezclas presentan un comportamiento homogéneo.

Los resultados de la prueba destructiva a flexión se muestran en la figura 3, en la cual se observa que la mezcla Tt y la Tpp presentan mejor comportamiento respecto a las otras mezclas a edades tardías, sin embargo a la edad de 28 días la mezcla Tt fue la más desfavorable, mientras que la mezcla Tpp mantuvo un comportamiento lineal ascendente.

Tabla 1. Característica de los materiales utilizados.

Material	% H. Absorción	Densidad (g/cm ³)	MVSS (kg/cm ³)	MVSV (kg/cm ³)	MF	TM
Arena volcánica	4.04	2.506	1390.90	1525.45	2.70	-----
Grava triturada	1.72	2.754	1492.45	1610.37	-----	3/4"
Cemento	-----	3.030	1490.00	-----	-----	-----

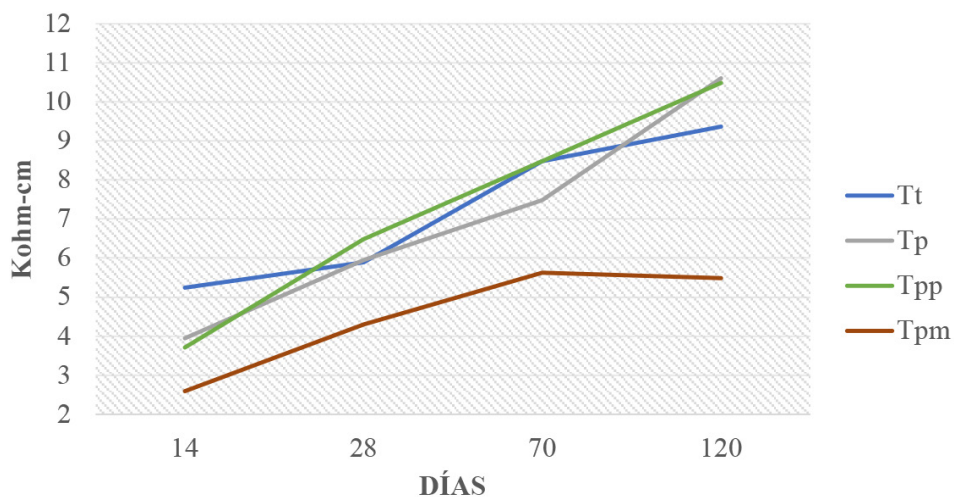


Figura 1. Resistividad eléctrica en prismas.

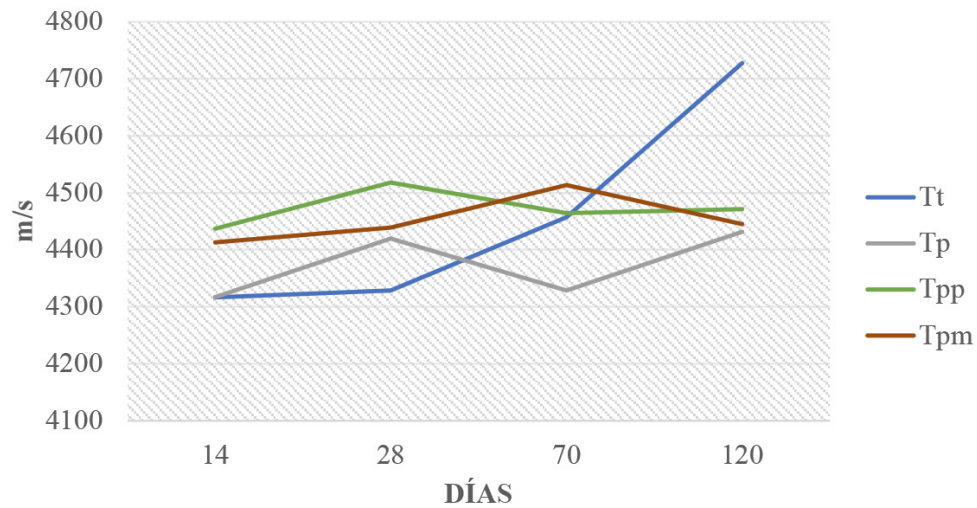


Figura 2. Velocidad de Pulso Ultrasónico.

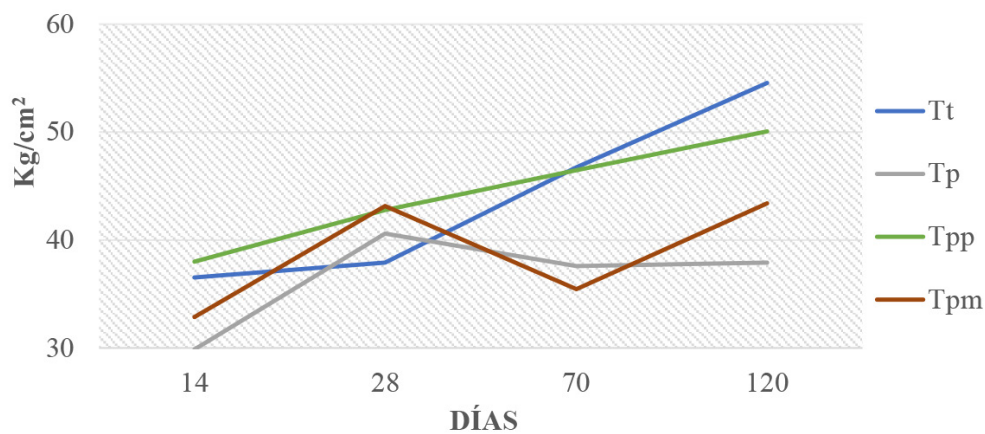


Figura 3. Resistencia a flexión.

4. Conclusiones

De manera general, esta investigación buscó una alternativa para los concretos tradicionales incorporando fibras de PET de desechos de botellas de plástico, con la intención de lograr un beneficio para el medio ambiente y para los pavimentos rígidos, lo cual es muy importante hoy en día. De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica, la resistencia a la corrosión de las 4 mezclas a la edad de 28 días se encuentran en el rango de porosidad interconectada excesiva en base a los parámetros NMX-C-514-ONNCCE-2016, lo cual indica que el concreto no es adecuado para zonas con atmosfera marina, sin embargo la tendencia es ascendente, por lo que se propone continuar la evaluación a edades mayores. De acuerdo a la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, las tres adiciones se ubican dentro de un rango

de poca porosidad con base a la norma NMX-C-275-ONNCCE-2004, lo cual indica que prestan adecuada durabilidad. Sin embargo los resultados obtenidos en la prueba a flexión indican disminución del comportamiento mecánico en las mezclas con PET, de acuerdo a la SCT un pavimento destinado a carreteras o autopistas debe de tener valores de MR de 48 kg/cm², por lo que las mezclas adicionadas con PET de reciclado (Tp y Tpm) no cumplen con estos valores, mientras que la mezcla testigo (Tt) y la mezcla con macro fibra de polipropileno (Tpp) superan el MR. De esta manera se propone evaluar otros porcentajes de PET y cambiar el tipo de fibra a filamentos, lo cual pudiera dar resultados mecánicamente favorables, además de reducir los agrietamientos en el concreto.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Coordinación de la Investigación Científica y del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

6. Referencias

- ASTMC 128-01 Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de los agregados finos.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- Navarro Sánchez, L. M. “et al” (2011). Análisis de Materiales, Editorial Morevallado Morelia, Mich, Mex. Tercera Edición.
- NMX-C-170-ONNCCE-2018. Industria de la construcción-agregados-reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para los ensayos. México.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción. Agregados. Masa volumétrica. Método de prueba. México.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - agregados para concreto hidráulico - especificaciones y métodos de ensayo. México.
- NMX-C-164-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - agregados - determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso. México.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - agregados - determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - método de ensayo. México.
- NMX-C-152-ONNCCE-2010. Industria de la construcción - cemento hidráulico - determinación de la densidad. México.
- NMX-C-057-ONNCCE- 2015. Industria de la construcción - cementantes hidráulicos - determinación de la consistencia normal. México.
- NMX-C-059-ONNCCE-2017. Industria de la construcción - cementantes hidráulicos - determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método vicat). México.
- NMX-C-159-ONNCCE-2017. Industria de la construcción - concreto - elaboración y curado de especímenes de ensayo. México.
- NMX-C-191-ONNCCE-2015. Industria de la construcción - concreto - determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro. México.

• **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



NMX-C-514-ONNCCE-2016. Industria de la construcción - resistividad eléctrica del concreto hidráulico - especificaciones y métodos de ensayo. México.

NMX-C-275-ONNCE-2004. Industria de la construcción - concreto - determinación de la velocidad de pulso a través del concreto - método de ultrasonido. México.

Red tematica XV.B. (DURAR) Durabilidad de la armadura. “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras de hormigón armado”. Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED). Tercera edición, agosto de 2000. ISBN 980-296-541-3.

Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) Reported by ACI Committee 211.



UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de concretos sustentables con altos contenidos de agregados reciclados y 20 % de ceniza de bagazo de caña de azúcar

I A. Landa-Sanchez¹, J. A. Paat-Estrella¹, S. Márquez-Montero²,
Y. Rivera³, R. Croche-Belin³, M. A. Baltazar-Zamora²

¹ Doctorado en Ingeniería, Universidad Veracruzana,

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana,

³ FIME, Universidad Veracruzana,

Autor de Contacto: ismael.floresvvn@uanl.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se evalúan las propiedades físicas y mecánicas de concretos sustentables elaborados a base de sustitución de altos porcentajes del Agregado Grueso por Agregados Reciclados, así como la sustitución del 20 % de Cemento Portland por CBCA. El diseño de las mezclas de concreto fue acorde al ACI 211.1 con curado de 28 días. Los ensayos del concreto en estado fresco y endurecido fueron conforme normativa ONNCCE y ASTM. Se determinó revenimiento, temperatura, resistencia a la compresión (F' C), módulo de elasticidad y tracción indirecta, a 14 y 28 días. Los resultados presentan una disminución en la resistencia a la compresión en los concretos sustentables con agregados reciclados y CBCA, relacionada al % de absorción presente en los AR y la disminución de la adherencia por la pasta presente en ellos.

Palabras clave: concretos sustentables; agregados reciclados; ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Abstract

In the present work, the physical and mechanical properties of sustainable concretes made by substituting high percentages of Gross Aggregate with Recycled Aggregate, as well as the substitution of 20% of Portland Cement by CBCA, are evaluated. The design of the concrete mixtures was according to ACI 211.1 with a 28 day cure. The fresh and hardened concrete was tested according to ONNCCE and ASTM standards. Temperatures, compressive strength (F' C), modulus of elasticity and indirect traction

were determined at 14 and 28 days. The results show a decrease in the resistance to compression in the sustainable concrete with recycled aggregates and CBCA, related to the % of absorption present in the RA and the decrease in the adherence by the paste present in them.

Keywords: sustainable concretes; recycled aggregates; sugar cane bagasse ash.

1. Introducción

La producción de residuos ha aumentado considerablemente en los últimos años, existiendo una clara correlación entre la riqueza de un país y su producción de residuos. Según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, en el 2013 el sector industrial contribuyó con 17 % de las emisiones totales de Gases Efecto Invernadero, de las cuales la industria del cemento aportó 30,244.7 Gg de GEI compuestos principalmente por 30,187.70 Giga gramos (Gg) de CO₂. El INECC divide en dos fases la emisión de gases GEI originada por la industria cementera, la primera es Cemento-Combustión, que produce 9,674.832 Gg de CO₂, 3.264 Gg de CH₄ y 37.662 Gg de N₂O. La otra fase considerada es la de Cemento-Proceso, en donde las emisiones de CO₂ son de 20, 508.894 Gg únicamente. (4, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Inventario de gases y compuestos de efecto invernadero. (Actualización 2013. s.l.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2013.). La Comisión Mundial de Medio Ambiente define a la sustentabilidad como la administración eficiente y racional de los recursos, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras.

Los residuos agroindustriales están siendo en las últimas décadas motivo de diversos estudios, ceniza de cascará de arroz, ceniza de bagazo de caña de azúcar, (CBCA), fibras de coco etc. Para el caso de la CBCA se tienen diversos trabajos en donde es utilizado como sustituto parcial del Cemento Portland para la elaboración de Concretos Ecológicos o Sustentables, en donde han estudiado su efecto en las propiedades mecánicas, así como su durabilidad al ser expuestos a medios sulfatados y medios marinos (Landa A.E. *et.al.*, 2018; Ruíz, 2019; Landa *et.al.*, 2018; Santiago, 2016; Landa *et.al.*, 2019), el uso de la CBCA como sustituto de Cemento Portland se debe a que sus componentes le dan características químicas de material puzolánico (Cordeiro *et.al.*, 2008; Landa *et.al.*, 2018; García *et.al.*, 2019; Landa *et.al.*, 2019;).

El tema del reciclaje de concreto se considera muy importante en el intento general un desarrollo sostenible en nuestros tiempos. De forma paralela, está directamente relacionada con (a) el aumento de estructuras de demolición fuera del tiempo de ejecución, (b) la demanda de nuevas estructuras y (c) los resultados de destrucción por fenómenos naturales (terremotos, etc.). La protección del medio ambiente es un factor básico, que está directamente relacionado con la supervivencia de la raza humana. Parámetros como la conciencia ambiental, la protección de los recursos naturales, el desarrollo sostenible desempeña un papel importante en los modernos requerimientos de obras de construcción. Los materiales de construcción son muy significativos en nuestras vidas, porque pasamos el 90 % de nuestro tiempo en edificios o infraestructuras (carreteras, autopistas, puentes, etc.). El sector de materiales de construcción corresponde de 3 - 4% del total del producto en Europa, y la industria de la construcción, así como obras de construcción, ocupa millones de personas. La necesidad de producción y uso de RCA (RILEM, 1996; USA-DT, 1997; Henderson, 1998; BRITE/EURAM, 2000; USA-DT-2000 BRITE/EURAM, 2002) es hoy en día muy urgente. Este tema ya se ha considerado como muy importante en Europa y en países Desarrollados como E.U.A, Canadá, entre otros. Existe un establecimiento de propuestas para una protección sustancial de las fuentes naturales en el mundo, desafortunadamente no son ni infinitas ni económicas. Se produce volúmenes considerados de desechos de concreto hidráulico, los cuales terminan ilegalmente en áreas no controladas para su depósito.

Se sigue el objetivo del desarrollo sostenible y, en consecuencia, se establece la base de una convivencia amistosa entre el hombre y la naturaleza. Datos indican que el 10 % de los agregados usados en Gran Bretaña (Collins, 1996) son RCA, 78.000 toneladas de RCA se utilizaron en Holanda (De Vries, 1996) en 1994, ya que la organización nacional correspondiente admitió que el uso del 20% de RCA grueso no diferenciaba propiedades del concreto en estado fresco o endurecido. Además, el reciclaje de BDW en el 40% se ha establecido como objetivo en Alemania (Acker, 1996) desde 1991. Un informe reciente de la administración federal de carreteras se refiere a la relativa experiencia de los datos europeos sobre el pavimento de concreto y asfalto reciclado. El rápido desarrollo de la investigación sobre el uso de RCA para la producción de concreto nuevo también ha llevado a la producción de concreto de alto rendimiento y resistencia (Limbachiya, 2000). Debe observarse, por supuesto, que normalmente se recomienda el uso de RCA grueso (hasta un 30%), pero a menudo se considera necesario añadir super plastificantes (RILEM, 1994; Zankler, 1999) para lograr la trabajabilidad requerida del nuevo concreto. Por estas razones es importante y necesario que la construcción tenga cambios que beneficien y ayuden al mejoramiento de nuestro entorno.

2. Procedimiento

2.1 Acopio y trituración del agregado reciclado

El acopio del agregado fue en la calle Enríquez de la Ciudad de Xalapa Veracruz. Se habló con el encargado de la obra y se llevó un camión de 7 m³ de capacidad, se levantó el material con una máquina Excavadora 320 con martillo, se cargó el material y se llevó a la trituradora para gravas de 3/8" a finos. Se depositó el material, en cuanto se descargó se procedió con un marro a disminuir las dimensiones a un tamaño de aproximadamente de 10 a 15 pulgadas para que pudiera pasar por la máquina de trituración. Posterior a esto con un cepillo de acero se eliminó lo más posible los residuos de la base del concreto que se demolió. Se ingresó el material a la máquina y se trituró.

2.2 Obtención y muestreo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

Se obtiene la ceniza de la zafra 2017, muestreada en calderas 2 y 3 del ingenio. Esta caldera es una Babcock Wilcox con capacidad nominal de 3,248 caballos caldera. El horno es un tipo Ward que suministra aire caliente lateralmente y por debajo mediante una placa con rejillas. El muestreo se llevó a cabo durante la mañana aproximadamente a la segunda hora de limpieza de los ceniceros, concentrando la ceniza retirada en un recipiente de material adecuado para resistir la alta temperatura y con el equipo de protección que permitiera realizar el muestreo.

2.3 Obtención de los agregados naturales.

Los agregados naturales fueron obtenidos de bancos de material para la construcción, se eligió un banco cerca de la Cd. De Xalapa y éste se encuentra en la lista de bancos de material de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Para el caso de la grava se solicitó material de ¾ a finos, y se indicó que se utilizaría para elaboración de concreto para utilizar en pavimento. En el caso de la grava, fue grava de río por las características del mismo banco y ésta fue cribada para que cumpliera con su tamaño nominal para ser caracterizada como una arena.

2.4 Caracterización de las propiedades físicas de la arena y de la grava

Obtenido el material para la elaboración de los concretos se tomaron muestras de cada material para que de acuerdo a la normativa y se caracterizaran de acuerdo a sus propiedades físicas.

Para el caso de la grava, se obtuvo una muestra de aproximadamente 7 kg, por el método de cuarteo, y para el caso de la arena la muestra fue de casi 2 kg a ambos materiales se les determinó el peso volumétrico seco suelto, el peso volumétrico compacto, su densidad aparente y su porcentaje de absorción. Además de que ambos materiales se procedieron a cribar para su caracterización, todo esto en base a las normas que se muestran en la tabla 1.

2.5 Nomenclatura de los especímenes

La nomenclatura será de acuerdo a cada porcentaje utilizado de agregado reciclado, como se muestra en la tabla 2.

2.6 Diseño de mezclas de concreto

El método utilizado para el diseño de las mezclas de concreto es de acuerdo a lo que especifica el Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute) en el apartado 211.1, el cual tiene como objetivo

Tabla 1. Pruebas a agregados.

Norma	Significado
NMX-C-030ONNCCE-2004	Muestreo de agregados
NMX-C-164-ONNCCE-2014	Determinación de la densidad y absorción agregado grueso
NMX-C-165-ONNCCE-2014	Determinación de la densidad y absorción agregado fino
NMX-C-166-ONNCCE-2006	Determinación del contenido de humedad
NMX-C-170-1997-ONNCCE	Reducción de muestras
NMXC-073-ONNCCE-2004	Determinación de la Masa volumétrica
NMX-C 077-1997-ONNCCE	Análisis granulométrico
NMX-C-416-ONNCCE-2003	Determinación de Equivalente de arena

Tabla 2. Nomenclatura de los especímenes de prueba.

REL. a/c	Nomenclatura	Significado
0.65	MC	Concreto Normal (100% CPC y 100% AN)
	M80	(CONCRETO: 80% AR -20% CBCA- 80% CPC)
	M100	(CONCRETO: 100% AR -20% CBCA- 80% CPC)
CPC: Cemento Portland compuesto 30 R. CBCA: Ceniza de bagazo de caña de azúcar. AR: Agregado reciclado. AN: Agregado natural.		

determinar la combinación más práctica de los materiales con los que se dispone para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para este trabajo el concreto deberá de poseer las siguientes propiedades: en el concreto fresco, trabajabilidad aceptable: en el concreto endurecido, resistencia, durabilidad, densidad, apariencia y por último economía. Las especificaciones que se tomaron para este trabajo son las que se presentan a continuación:

- Concreto Normal.
- Concreto sin aire incluido.
- Relación agua/cemento de 0.65
- Tamaño Máximo Nominal de 19 mm.
- Revenimiento de 7.5 cm.
- Ensayos en el concreto fresco.

Los ensayos realizados en las mezclas de concretos sustentables en su estado fresco, contribuyen en la evaluación de las propiedades de trabajabilidad, temperatura, masa volumétrica y revenimiento. La tabla 3 muestra bajo que norma se realizaron.

2.7 Ensayos al concreto endurecido

Los ensayos de concreto endurecido que se analizaron en este proyecto se presentan en la tabla 4.

Tabla 3. Pruebas al concreto fresco.

Ensayo	Norma
Muestreo	NMX-C-161-ONNCCE-2013
Determinación de la temperatura del concreto fresco	NMX-C-435-ONNCCE-2010
Determinación del revenimiento en el concreto fresco	NMX-C-156-ONNCCE-2010
Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico	NMX-C-162-ONNCCE-2014
Elaboración y curado de especímenes de ensayo	NMX-C-159-ONNCCE-2016

Tabla 4. Pruebas al concreto endurecido.

Ensayo	Norma
Determinación de la resistencia a la compresión simple de especímenes.	NMX-C-083-ONNCCE-2014
Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de poisson	NMX-C-156-ONNCCE-2010

3. Resultados y Análisis

3.1 Propiedades físicas de la arena y de la grava.

3.1.1 Masa volumétrica

Los resultados del ensaye de masa volumétrica del agregado fino y grueso, en estado suelto y varillado se muestran en la tabla 5:

3.1.2 Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino y grueso

Los resultados de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino y grueso se presentan en la tabla 6.

Como se puede apreciar en la tabla 6, la densidad del agregado pétreo es de 2.20, de acuerdo al tipo de material, se encuentra dentro de los parámetros de densidades de agregados finos de río. La absorción que se obtiene es de 1.80 %. De acuerdo a lo anterior se considera aceptable los resultados obtenidos en este ensaye, para ambos agregados.

3.2 Concreto fresco

3.2.1 Temperatura.

En la figura 1 se muestra la temperatura de las mezclas de referencia encontrándose dentro de las especificaciones de la norma C-435.

3.2.2 Revenimiento

Las especificaciones del revenimiento del concreto hidráulico de igual manera están establecida por la norma mexicana NMX-C-155, la cual en su apartado 5.2.2 nos especifica los parámetros que se pueden utilizar en las diferentes circunstancias en las que nos encontremos. La especificación que rige para la evaluación de los resultados de revenimiento es del valor nominal del cual fue diseño, el cual es de 7.5 cm, por lo que tenemos una tolerancia de ± 2.5 cm. En la figura 2 se aprecia que los dos resultados de los revenimientos es-

Tabla 5. Masa volumétrica de agregados.

Agregado	Norma	Resultado
Fino	NMX-C-073-ONNCCE-2004	Masa Volumétrica Suelta: 1,442 Kg/m ³
		Masa Volumétrica Varillada: 1,695 Kg/m ³
Grueso	NMX-C-073-ONNCCE-2004	Masa Volumétrica Suelta: 1,332 Kg/m ³
		Masa Volumétrica Varillada: 1,433 Kg/m ³

Tabla 6. Densidad y porcentaje de absorción de agregados.

Agregado	Norma	Resultado
Fino	NMX-C-165-ONNCCE-2014	% A = 1.80% Dr SSS = 2.20
Grueso		%A=1.70% Dr SSS = 2.60

tán fuera de la especificación de la norma, pero dentro de la misma hay notas aclaratorias que indican que si los revenimientos son inferiores al límite especificado, el concreto puede aceptarse si no existen dificultades de colocación (ONNCCE, 2014).

Los revenimientos son aceptables puesto que solo se elaboraron probetas de ensaye. Los resultados obtenidos de revenimientos muestran un decrecimiento de la trabajabilidad del concreto considerablemente y esto se atribuye al porcentaje utilizado de puzolanas y al porcentaje de absorción que tiene el agregado reciclado.

3.2.3 Masa Unitaria

En este apartado se presentan los resultados de la masa unitaria de los concretos sustentables elaborados. Como se especifica en la norma mexicana NMX-C155, los concretos hidráulicos de uso estructural deben de tener una masa unitaria normal en estado fresco de 1,900 kg/m³ hasta 2,400 Kg/m³ (ONNCCE, 2014). Como se muestra en la gráfica las mezclas se encuentran dentro del rango de aceptación. Siendo la mínima la M100, que es la mezcla con 100 % de agregado reciclado.

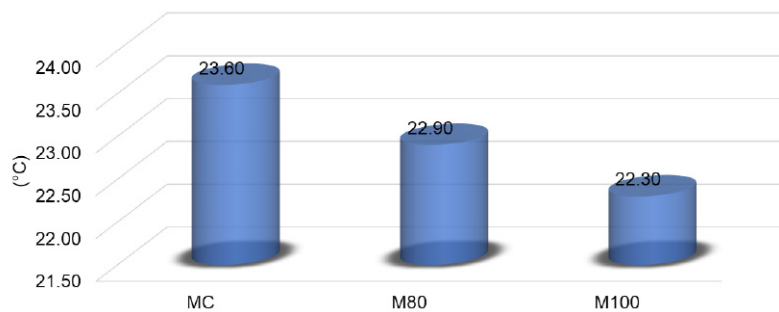


Figura 1. Temperatura de los concretos sustentables con alto contenido de agregados reciclados en estado fresco.

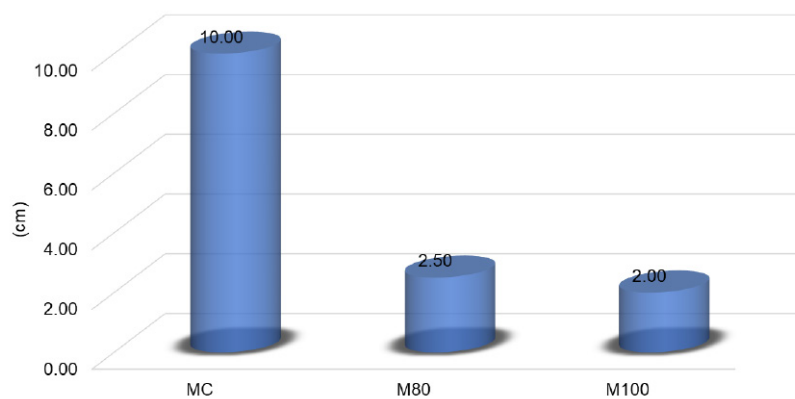


Figura 2. Revenimiento de los concretos sustentables con altos contenidos de agregados reciclados.

3.3 Concreto endurecido

3.3.1 Resistencia a la compresión

En la figura 4 se muestra la resistencia a la compresión de las 3 mezclas a las edades de 14 y 28 días. De acuerdo al diseño de la mezcla el concreto debe alcanzar resistencias dentro de los parámetros de 180 kg/cm² a 200 kg/cm² que fue de acuerdo a la relación agua cemento.

De acuerdo a los resultados presentados en la gráfica, se aprecia que a los 14 días las mezclas tienen menor resistencia en cuanto a la mezcla control, lo que era de suponerse por las sustituciones de material cementante y reciclado. Existiendo una variación en cuanto a la mezcla M80 que presenta un comportamiento de resistencia alto para el porcentaje que tiene de agregado reciclado. También se observa como la mezcla con el 100 % de agregado reciclado tiene una resistencia que alcanzó el 50 % en referencia a la mezcla control. Todas las mezclas a los 28 días presentan que siguen desarrollando resistencia, pero presentando en todas también, un decremento en la resistencia en referencia con la mezcla control.

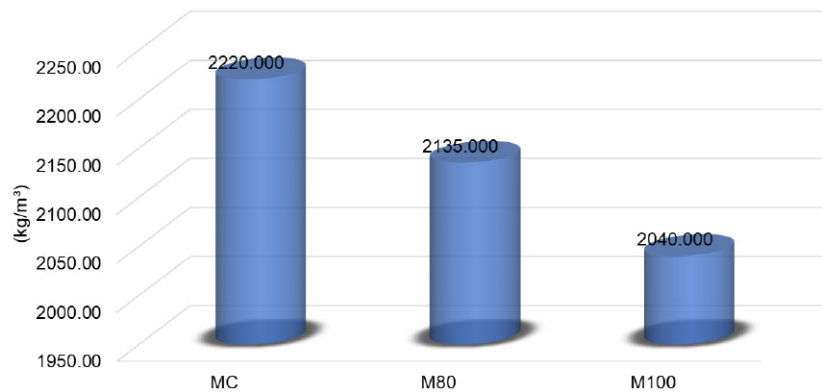


Figura 3. Masa unitaria de los concretos sustentables.

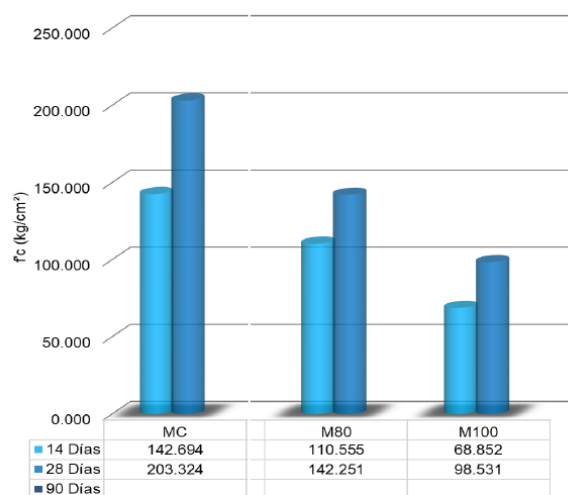


Figura 4. Resistencia a la compresión de concretos sustentables.

3.3.2 Módulo de elasticidad

En la figura 5, se pueden observar los resultados de las mezclas elaboradas, a la edad de 28 días, el concreto que presentó mejor desempeño fue el M100 que es el que cuenta con el 100% de agregados reciclados, aunque se encuentra por debajo del resultado obtenido por la mezcla control más de un 19%, mientras que el M80 el valor no pasa los 150 kg/cm². Los resultados obtenidos no se podrán comparar con otras investigaciones debido al método de ensayo que se utilizó fue el de dos anillos un micrómetro. Por lo cual obtenemos menos deformación y los módulos de elasticidad se elevan, estos resultados dan un parámetro del comportamiento elástico de cada concreto sustentable elaborado.

4. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados de las temperaturas obtenidas, son de acuerdo a las condiciones climáticas cuando se realizaron las mezclas de concreto sustentables con altos contenidos de agregados reciclados. Dichos resultados están dentro de las especificaciones de la norma NMX-C155. En el ensayo de revenimiento, se obtuvieron las diferentes consistencias de los concretos, en los cuales se apreció una disminución de consistencia considerable por el aumento en el porcentaje de las adiciones de agregado reciclado, esto se atribuye a que las diferentes densidades y absorciones de los agregados reciclados. Las masas unitarias de los concretos sustentables se encuentran dentro de las especificaciones para ser utilizados como concretos de uso estructural.

En cuanto a los resultados del concreto en estado endurecido se observó que la mezcla con el 80 % de AR, presentó mejor comportamiento en cuanto a resistencia y muy cercano a la mezcla control.

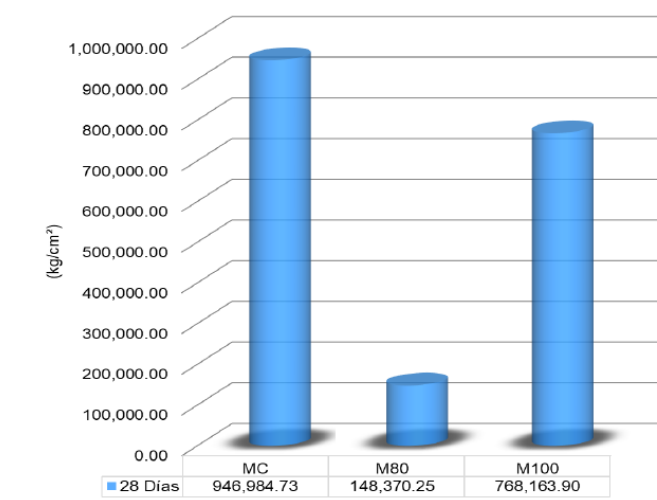


Figura 5. Modulo de elasticidad de concretos sustentables con altos contenidos de agregados reciclados.

5. Agradecimientos

M.A. Baltazar-Zamora *et al.*, agradecen a PRODEP por el Apoyo otorgado por la SEP, al Cuerpo Académico UV-CA-458 “Sustentabilidad y Durabilidad de Materiales para la Infraestructura Civil”, en el marco de la Convocatoria 2018 para Fortalecimiento de Cuerpos Académicos con IDCA 28593. Así también A. Landa-Sanchez, agradece al CONACYT por la beca de otorgada para cursar el programa de Doctorado en Ingeniería perteneciente a FIME-Xalapa de la Universidad Veracruzana.

6. Referencias

- A. Landa Sánchez, A.E. Landa Gómez, J.M. Mendoza Rangel, F. Almeraya Calderón, R. Croche Belín y M.A. Baltazar Zamora. *Comportamiento de la corrosión del acero AISI 316 como refuerzo en Concretos Ternarios Sustentables con sustitución parcial de CPC en 10%, 20% y 30% de CBCA-HS inmersos en Agua de Mar*. 34° Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 2019 y 12th Meeting of the Mexican section of the Electrochemical Society. Querétaro, México.
- Aldo Emelio Landa-Gómez, René Croche, Sabino Márquez-Montero, Rafael Villegas Apaez, Ha Ariza-Figueroa, Francisco Estupiñan López, Citlalli Gaona Tiburcio, Facundo Almeraya Calderón, Miguel Angel Baltazar-Zamora (2018). *Corrosion Behavior 304 and 316 Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Based on Sugar Cane Bagasse Ash Exposed to Na₂SO₄*. ECS Transactions Vol. 84. Pags. 179-188
- Aldo Landa-Gómez, Saúl Castillo Aguilar, Jose Alberto Reyes Jimenez, Rafael Villegas Apaez, Ricardo Galván-Martínez Sr., Jose A. Cabral-Miramontes, Citlalli Gaona Tiburcio, Facundo Almeraya and Miguel Angel Baltazar-Zamora. (2018) *Evaluation of the Corrosion of AISI 304 Stainless Steel Embedded in Sustainable Concrete with High Volumes of Scba-SF Exposed in Marine Environment*. ECS Transactions
- Aldo Emelio Landa-Gómez, René Croche, Oscar Manuel Lopez Yza, Ricardo Galván Martínez, Jose A. Cabral Miramontes, Citlalli Gaona Tiburcio, Facundo Almeraya Calderón, Miguel Angel Baltazar-Zamora (2018), *Corrosion Behavior of AISI 316 Stainless Steel As Reinforcement in Ternary Sustainable Concrete Based on Scba-SF Exposed in Seawater*. ECS Transactions
- Ariza H.A., Croche R., Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Villegas R., Márquez S., Baltazar M.A.,(2019) “Evaluación de la corrosión del acero galvanizado y acero AISI 304 embebidos en concretos ecológicos con sustitución de CPC por 10, 20 y 30% de CBCA-HS expuestos a Na₂SO₄ al 3.5%” in Meas Y., Morales J. Frontana C.E. (Eds), Corrosión y tratamientos superficiales, SMEQ, Querétaro (México), pp.
- De Vries, P., (1996)., “Concrete recycled: crushed concrete aggregate”. In: Proc. of the International Conference: Concrete in the Service of Mankind. I. Concrete for Environment Enhancement and Protection, Dundee, Scotland, pp. 121–30.
- Dhir Aker Av. Recycling of concrete at a precast concrete plant. *Betonwerk+Fertigteil-Tech* 1996;6:91–101.
- Dhir R, Henderson N, Limbachiya M., Editors, (1998). *Proceedings of International Symposium: Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. Thomas Telford.
- García D.L, Cabral J.A, Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Villegas R., Marquez S., Baltazar M.A.,(2019). “Eficiencia anticorrosiva del acero AISI 304 como refuerzo en concretos ecológicos ternarios base CBCA-HS expuestos a sulfato de magnesio” in Meas Y, Frontana C. E., Pérez J. de J. (Eds), Electrodepositos y modificación de superficies, SMEQ, Querétaro (México), pp.
- García D.L, Cabral J.A, Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Croche R., Baltazar M.A.,(2019) “Influencia del medio ambiente de exposición y tipo de curado en la cinética de corrosión de concreto reforzado” in Meas Y, Frontana C. E., Pérez J. de J. (Eds), Electrodepositos y modificación de superficies, SMEQ, Querétaro (México), pp.

- J.A. Cabral M., C. Gaona-Tiburcio, F. Almeraya-Calderón, A.C. Ramírez-García, R. Villegas-Apaez, S. Marquez-Montero, M.A. Baltazar-Zamora. Universidad Veracruzana. “Eficiencia anticorrosiva del acero AISI 304 como refuerzo en concretos ecológicos ternarios base CBCA-HS expuestos a sulfato de magnesio.” 34° Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 2019 y 12th Meeting of the Mexican section of the Electrochemical Society. Querétaro, México.
- Landa A., Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., López O. M., Vélez J.A., Solorzano R., Márquez S., Baltazar M.A.,(2019) “Evaluación electroquímica del acero inoxidable AISI 316 embebido en concretos sustentables base ceniza de bagazo de caña de azúcar expuestos a un medio marino” in Meas Y, Frontana C. E., Pérez J. de J. (EDS), Electrodepositos y modificación de superficies, SMEQ, Querétaro (México), pp.
- Landa Gómez (2018). *Evaluación de la corrosión de concretos sustentables ternarios inmersos en agua de mar*: Tesis maestría. Universidad Veracruzana.
- Limbachiya MC, Leelawat T, Dhir RK., (2000), “Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete”, Mater Struct, Vol. 33, pp. 574–580
- O. Ojeda Farías, J.M. Mendoza Rangel, M. A. Baltazar Zamora (2018). Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material. Alconpat internacional 8 (2): 194-208.
- ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en Campo al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Prueba*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Concreto - Terminología*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo*. México, MÉXICO: ONNCCE.
- ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto - Especificaciones*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2006). *Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de prueba*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Resistencia a la Degradación por Abrasión e Impacto de Agregados Gruesos Usando la Máquina de los Ángeles*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Temperatura del Concreto Fresco*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Fresco - Muestreo*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Sometido a Compresión - Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación Poisson*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. México: ONNCCE.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

- ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - *Agregados para Concreto Hidraulico - Especificaciones y Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - *Concreto Hidráulico - Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - *Concreto Hidráulico - Dosificado en Masa - Especificaciones y Método de Prueba*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - *Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- ONNCCE. (2016). Industria de la Construcción - *Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-169ONNCCE-2009, “*Extracción de especímenes cilíndricos o prismáticos de concreto hidráulico endurecido*.”
- IMCYC (Construcción y tecnología del concreto, Enero 2015)
- Ruíz M., Landa A., Cabral J.A., Gaona C., Almeraya F., Malpica R., Márquez S., Baltazar M.A., (2019) “*Influencia del tipo de acero en el comportamiento de la corrosión de concretos sustentables ternarios elaborados con ceniza de bagazo de caña de azúcar y humo de sílice expuestos a sulfato de sodio*” in Meas Y., Morales J. Frontana C.E. (Eds), *Corrosión y tratamientos superficiales*, SMEQ, Querétaro (México), pp.
- Zankler G., (1999)., “*Recycled materials in concrete construction: fields of application, development tendencies and quality assurance*”, *Betonwerk+Fertigteile-Tech*, Vol. 4, pp. 38–43.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Sustitución parcial del agregado fino por partículas de PET reciclado en una matriz base cemento Portland

B. F. Arce-Vázquez¹, J.M. Mendoza-Rangel¹, P. Castro-Borges²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida

Autor de Contacto: blanca_arce@live.com

Resumen

En el presente estudio se reportan los efectos que la sustitución del 5, 15 y 30% (volumen) del agregado fino (AF) por partículas de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) menores a 4.75 mm tiene en propiedades en estado fresco y en propiedades como la resistencia a la compresión de morteros base cemento portland. Los resultados obtenidos mostraron conforme aumenta el porcentaje de sustitución del AF por partículas PET la fluidez y la densidad de los morteros tienden a disminuir y el contenido de aire aumenta. La resistencia a la compresión disminuyó de 40 MPa hasta 29 MPa debido a la sustitución del 30 % del AF.

Palabras clave: Residuos PET; Mortero; Fluidez; Resistencia a la compresión

Abstract

The present study reports the effects that the replacement of 5, 15 and 30 % (volume) of the fine aggregate (AF) by polyethylene terephthalate-type plastic particles (PET) smaller than 4.75 mm have on the properties in fresh state and in properties such as compressive strength of portland cement-based mortars. The results obtained showed that as the percentage of AF replacement by PET particles increases, the flow and density of mortars tend to decrease and the air content increases. The compressive strength decreased from 40 MPa to 29 MPa due to the 30% replacement of AF.

Keywords: PET waste; Mortar; Flow; Compressive strength

Resumo

O presente estudo relata os efeitos que a substituição de 5, 15 e 30 % (volume) do agregado fino (AF) por partículas de plástico do tipo tereftalato de polietileno (PET) menores que 4.75 mm tem nas propriedades a fresco e nas propriedades tais como resistência à compressão de argamassas à base de cimento portland. Os resultados obtidos mostraram que à medida que aumenta a porcentagem de substituição de AF por partículas de PET, o fluxo e a densidade das argamassas tendem a diminuir e o teor de ar aumenta. A resistência à compressão diminuiu de 40 MPa para 29 MPa devido à substituição de 30 % do AF.

Palavras-chave: Resíduos de PET; Argamassa; Fluência; Resistência à compressão

1. Introducción

Derivado de los crecientes problemas ambientales, el uso y aprovechamiento de distintos residuos sólidos (Ej. Ceniza volante, residuos vegetales, residuos cerámicos, ceniza de bagazo de caña, escoria granulada de alto horno, etc.) mediante la incorporación de estos en materiales de construcción es una práctica cada vez más adoptada (Siddique, 2007) que tiene como primicia la disminución del impacto ambiental. Por otro lado, el exceso de materiales plásticos que el ser humano consume es tal que, los desechos generados por estos representan un riesgo contundente al ecosistema. Además de ser abundantes, su gravedad radica en el prolongado tiempo de degradación y el alto volumen de ocupación. Como una de las soluciones, diversos investigadores han propuesto la incorporación de diversos tipos de plásticos en una matriz cementante (Siddique *et al.*, 2008; Gu y Ozbakkaloglu, 2016; Sharma y Bansal, 2016). Más puntualmente, son diversos los estudios que se han realizado sobre la inclusión de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) reciclado en matrices de mortero y concreto base cemento Portland.

De primera instancia se ha estudiado la incorporación de PET en diversas presentaciones, algunas de estas involucran un proceso que demanda mayor gasto energético, como por ejemplo la pelletización del PET (Saikia y de Brito, 2014) o la elaboración de un agregado base PET derivado de un proceso de mezclado y fundición con arena (Choi *et al.*, 2009) o escoria granulada de alto horno (Choi *et al.*, 2005). Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados proponen la incorporación de partículas PET provenientes de botellas trituradas sin ningún tratamiento previo (excepción del lavado con agua) como sustituto parcial del agregado fino en matrices de mortero o concreto (Azhdarpour *et al.*, 2016; Nikbin *et al.*, 2016; Mohammed, 2017; Saxena *et al.*, 2018; Thorneycroft *et al.*, 2018). Esto se puede deber a la identificación de un residuo sólido procedente del reciclaje de botellas de PET y a la no justificación de un gasto energético mayor para la transformación de residuos de PET para su uso de este tipo de matrices.

Con respecto a la evaluación de las propiedades de este tipo de matrices en estado fresco los autores que reportan la densidad de la matriz en estado fresco coinciden de manera absoluta en la disminución de la densidad de la matriz conforme incrementa el porcentaje de sustitución de los agregados naturales por partículas PET. Esto debido a la baja densidad de las partículas PET comparada con la densidad del resto de los componentes de la matriz de mortero o concreto (Silva *et al.*, 2013; Rahmani *et al.*, 2013; Saikia y de Brito, J., 2014; Akçaözoglu y Ulu, 2014).

En el caso de la trabajabilidad y/o fluidez, autores que utilizaron partículas PET tipo esfera con una geometría curva y de textura suave registraron un aumento de esta propiedad conforme aumentaba el contenido de partículas PET (Choi *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2009; Islam *et al.*, 2016). En el caso de la incorporación de partículas PET provenientes de botellas trituradas y mezclas con relación agua/cemento constante, se presentó un consenso entre los diferentes estudios que utilizaron partículas PET donde se observa que debido

a la naturaleza angulosa y rugosa de las partículas existe una disminución de la trabajabilidad y/o fluidez de las mezclas conforme se incrementa el porcentaje de sustitución de los agregados naturales por partículas PET (Albano *et al.*, 2009; Rahmani *et al.*, 2013; Sadrmomtazi *et al.*, 2016), atribuible a la fricción que se crea entre la matriz cementante y las partículas PET.

Pocos son los estudios que han evaluado el contenido de aire en matrices cementantes con partículas PET. De los estudios que han reportado este parámetro, Choi *et al.* (2009), quienes sustituyeron el agregado fino por partículas elaboradas a base de PET y arena de río con una morfología redonda y superficie lisa, registraron una ligera tendencia a la disminución del contenido de aire en las mezclas conforme incrementaba el porcentaje de sustitución del agregado fino.

La evaluación de las propiedades mecánicas de concreto o mortero que incorporan partículas PET en su matriz es una constante en la mayoría de los estudios reportados, sin embargo, debido a variables como la relación agua/cemento de las matrices, uso de materiales cementantes suplementarios, tratamiento de las partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución, morfología de las partículas PET, entre otras, en los diversos estudios no se percibe una tendencia marcada del comportamiento de este tipo de matrices en base a sus propiedades mecánicas, pero se puede identificar que de manera general los autores reportan una disminución de la resistencia a la compresión conforme incrementa el porcentaje de sustitución (Hannawi *et al.*, 2010; Saikia y de Brito, 2014; Silva, 2013; Sadrmomtazi *et al.*, 2016).

Con el objetivo de sumar al acervo del estudio de este tipo de matrices, la presente investigación se enfoca en el análisis de las propiedades en estado fresco (densidad, fluidez y contenido de aire) y propiedades en estado endurecido como la resistencia a la compresión de matrices de mortero base cemento portland en donde se plantea el uso partículas menores a 4.75 mm de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) como sustituto del agregado fino. Estas partículas son un subproducto del proceso de reciclaje de botellas del mismo material.

2. Procedimiento experimental

2.1 Materiales

Para la elaboración de los morteros se utilizó cemento portland CPO 40, con una densidad de 3.04 g/cm³, agregado fino (AF) procedente del área metropolitana del Monterrey, Nuevo León, México y partículas PET (véase figura 1) resultado de un proceso de trituración.

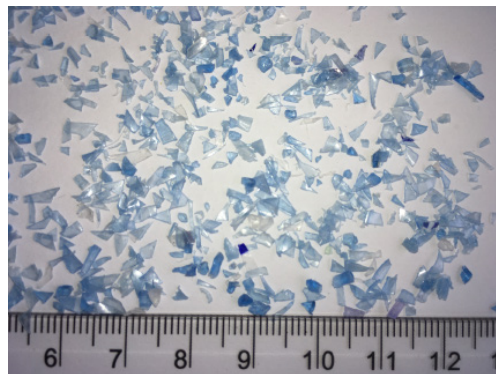


Figura 1. Partículas PET.

En la tabla 1 se presentan las propiedades del agregado fino (AF) y de las partículas PET (PET) y en la figura 2 se presenta su respectiva granulometría.

2.2 Dosificación de morteros

Derivado de un análisis y segregación de los estudios hasta ahora realizados sobre este tipo de matrices se diseñaron un total de 4 mezclas de mortero en las cuales se sustituyó el 0, 5, 15 y 30 % del volumen del agregado fino (AF) por partículas PET (PET) reciclado. Se utilizaron 518 kg/m³ de cemento, una relación a/c de 0.6 y una relación cemento-arena de 2.8 (todos constantes en las diferentes mezclas). Todas las mezclas de mortero se elaboraron siguiendo la práctica estándar ASTM C305.

2.3 Métodos de ensayo

En la Tabla 2 se presentan los métodos de ensayo seguidos para la determinación de las propiedades en estado fresco de las mezclas de mortero.

Tabla 1. Propiedades de los agregados.

	AF	PET
Módulo de finura	2.91	-
Peso unitario (compacto) (kg/m³)	1827.5	542
Peso unitario (suelto) (kg/m³)	1527	450.33
Gravedad específica	2.79	1.38
Absorción (%)	1.9	-

Tabla 2. Métodos de ensayo para la determinación de las propiedades en estado fresco.

Propiedad	Método de ensayo
Densidad	ASTM C138
Fluidez	ASTM C1437
Contenido de aire	ASTM C185

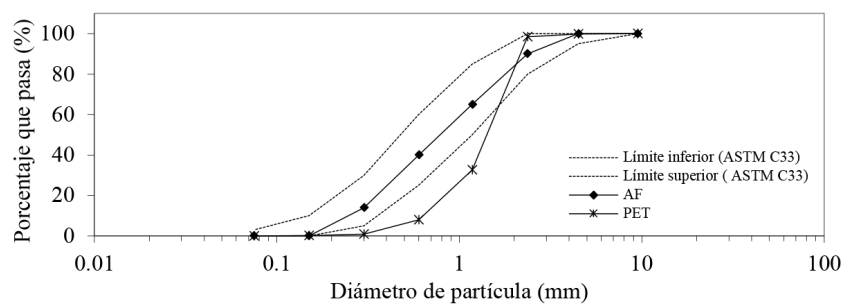


Figura 2. Granulometría de los agregados.

La determinación de la resistencia a la compresión se realizó según el método normalizado de la ASTM C109. Tres especímenes cúbicos (50 mm) por mezcla de mortero fueron ensayados a la edad de 28 días.

3. Resultados

3.1 Propiedades en estado fresco

En la tabla 3 se presenta un compilado de los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros evaluados en las mezclas de mortero en estado fresco. La fluidez de los morteros tiende a disminuir conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET, esta disminución tiende a ser hasta 33% menor cuando se sustituye el 30 % del agregado fino (consistencia media), sin embargo, si se toma en cuenta la clasificación de los morteros según su porcentaje de fluidez el resto de las mezclas en donde se sustituyó el agregado fino por partículas PET siguen teniendo una consistencia fluida. Se atribuye la disminución de la fluidez a la geometría angular e irregular de las partículas PET que ejercen una fricción con el resto de la matriz.

Con respecto al contenido de aire y la densidad de los morteros con partículas PET, en la figura 3 se puede apreciar una tendencia del contenido de aire conforme incrementa el porcentaje de sustitución, esta tendencia se ajusta significativamente a la ecuación presentada en la gráfica, es decir, cada 5 % de sustitución del agregado fino (volumen) por partículas PET significa un incremento del contenido de aire de $\pm 0.55\%$. La densidad de los morteros disminuyó conforme se incrementó el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET, esto debido en su mayoría a la diferencia entre la gravedad específica del agregado fino y las partículas PET. La densidad disminuye 2, 6 y 11% cuando se sustituye 5, 15 y 30% correspondientemente del agregado fino por partículas PET.

3.2 Propiedades en estado endurecido

La relación entre la resistencia a la compresión con el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET se presenta en la figura 4. Como se observa en la gráfica, a los 28 días la resistencia a la compresión varía de 40 MPa a 29 MPa, una tendencia a la baja que representa una disminución del 5, 15 y 28% cuando se sustituye el 5, 15 y 30% del agregado fino por partículas PET, es decir, la reducción de la resistencia a la compresión es proporcional al porcentaje de sustitución. Esta reducción se le atribuye a una baja adherencia de las partículas PET con la matriz cementante y al incremento en el contenido de aire que estas propician en la mezcla.

Tabla 3. Fluidez, contenido de aire y densidad de morteros con partículas PET.

Porcentaje de sustitución PET (%)	Fluidez (%)	Contenido de aire (%)	Densidad en estado fresco (kg/m ³)
0	144	1.60	2207
5	144	2.28	2159
15	132	3.30	2070
30	111	4	1955

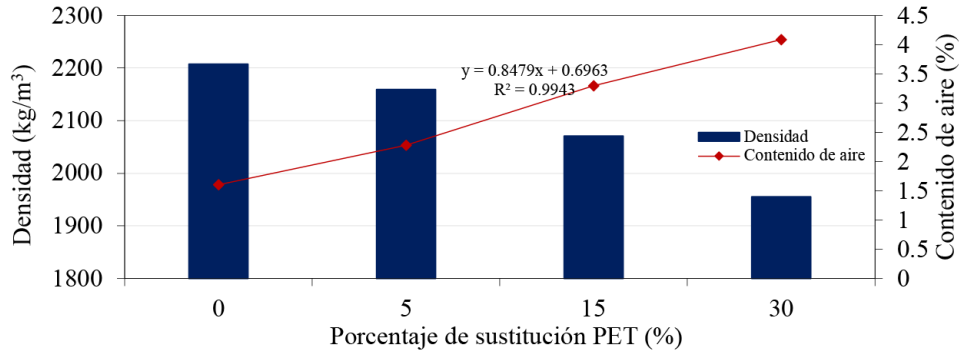


Figura 3. Densidad y contenido de aire de morteros con partículas PET.

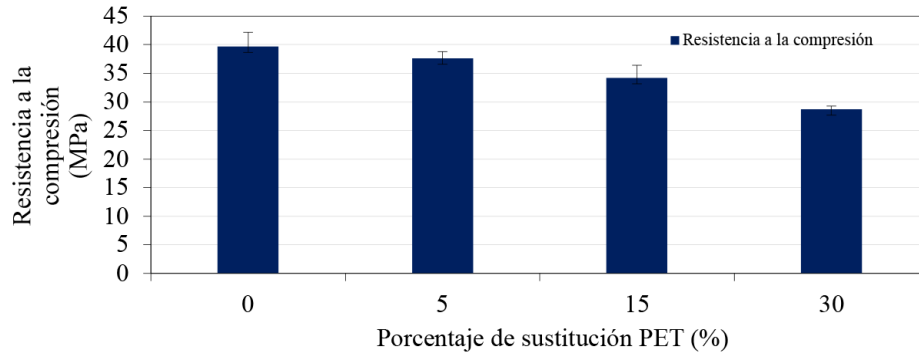


Figura 4. Resistencia a la compresión de morteros con partículas PET.

4. Conclusiones

- La incorporación de partículas PET trituradas disminuye la fluidez de los morteros probablemente debido a la fricción entre la matriz cementante y las partículas PET con superficie rugosa y formas angulosas.
- El contenido de aire de los morteros aumenta conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET. En este estudio se identificó que por cada sustitución del 5% el contenido de aire aumenta $\pm 0.55\%$.
- Como resultado de la diferencia entre la gravedad específica del agregado fino y las partículas PET, la densidad de los morteros tiende a disminuir conforme incrementa el porcentaje de sustitución. En el presente estudio se registró hasta una reducción del 11% de la densidad de los morteros cuando se sustituyó el 30% del agregado fino por partículas PET.
- Debido a una baja adherencia entre las partículas PET y la matriz cementante más la suma del aumento del contenido de aire que estas propician cuando se incorporan a la matriz se registró una tendencia a la baja de la resistencia a la compresión de los morteros conforme incrementa el porcentaje de sustitución.

En este estudio se identificó una reducción de la resistencia a la compresión proporcional al porcentaje de sustitución.

- La incorporación de partículas de PET reciclado en una matriz de mortero propicia cambios significativos en las propiedades de los morteros, sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que es viable la incorporación de partículas de PET reciclado en matrices base cemento Portland. Estudios futuros se enfocarán en el estudio de indicadores de calidad de este tipo de matrices.

5. Agradecimientos

Agradecimientos a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y al proyecto CONACyT Ciencia Básica No. 285976 por los estímulos económicos y facilidades para la realización de la presente investigación. Se agradece también a los proyectos IT- 301307 y P/PROFEXCE-2020-19MSU00. Blanca Fernanda Arce Vázquez agradece a CONACyT por la beca otorgada (CVU: 890692) para la realización de sus estudios de posgrado.

6. Referencias

- Akçaözöğlü, S., & Ulu, C. (2014). "Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends". *Construction and Building Materials*, 58, 31-37.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. (2009). "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios". *Waste Management*, 29(10), 2707-2716.
- ASTM International. (2015). ASTM C1437-15 "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar".
- ASTM International. (2017). ASTM C138/C138M-17a "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete".
- ASTM International. (2020). ASTM C109/C109M-20b "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)".
- ASTM International. (2020). ASTM C185-20 "Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar".
- ASTM International. (2020). ASTM C305-20 "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency".
- Azharpour, A. M., Nikoudel, M. R., & Taheri, M. (2016). "The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation". *Construction and Building Materials*, 109, 55-62.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete". *Cement and concrete research*, 35(4), 776-781.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles". *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835.
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). "Use of recycled plastics in concrete: A critical review". *Waste Management*, 51, 19-42.
- IEEE (2018). "Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials".
- Islam, M. J., Meherier, M. S., & Islam, A. R. (2016). "Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete". *Construction and Building materials*, 125, 946-951.

- Mohammed, A. A. (2017). “*Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete*”. *Construction and Building Materials*, 155, 593-604.
- Nikbin, I. M., Rahimi, S., Allahyari, H., & Fallah, F. (2016). “*Feasibility study of waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete*”. *Journal of cleaner production*, 126, 108-117.
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). “*On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles*”. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., & Sadeghi-Nik, A. (2016). “*The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete*”. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373.
- Saikia, N., & de Brito, J. (2014). “*Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate*. *Construction and building materials*”, 52, 236-244.
- Saxena, R., Siddique, S., Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2018). “*Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste*”. *Construction and Building Materials*, 176, 415-421.
- Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). “*Use of different forms of waste plastic in concrete—a review*”. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.
- Siddique, R. (2007). “*Waste materials and by-products in concrete*”. Springer Science & Business Media.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). “*Use of recycled plastic in concrete: A review*”. *Waste management*, 28(10), 1835-1852.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). “*Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates*”. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.
- Thornycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). “*Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand*”. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69.



UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Análisis de mezclas asfálticas en caliente con adición de concreto reciclado en un 20 % y 30 % como sustitución de agregado pétreo natural

C. U. Espino González, H. Luis Chávez García, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, R. Ruiz Ruiz, S. C. Arguello Hernández, M. Sánchez Arreola

Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: carlosurieleesp@gmail.com

Resumen

La industria de la construcción es una parte fundamental para el desarrollo de cualquier nación por lo tanto durante su proceso y posteriormente al final de su vida útil los residuos generados por esta infraestructura son muy grandes por lo que se ha convertido en un problema de contaminación ambiental, por lo que con esta investigación se busca la mitigación y el aprovechamiento de una parte de estos residuos que actualmente son solo un desperdicio. Para esta investigación se aplicó la metodología Marshall para la elaboración de mezclas asfálticas con sustitución en porcentaje de 20% y 30% de concreto reciclado. El mejor diseño propuesto es el de 70% agregado pétreo natural y 30% RCD ya que hay un ahorro de masa en agregado pétreo de 2002.25 kg vs 2200.16 y un ahorro de masa de asfalto de 137.75 vs 146.53. **Palabras Clave:** Mezcla asfáltica; Concreto Reciclado; Reciclaje; Agregado pétreo; Ahorro ecológico.

Abstract

The construction industry is a fundamental part for the development of any nation, therefore, during its process and later at the end of its useful life, the waste generated by this infrastructure is very large, which is why it has become a problem of environmental pollution. Therefore, this research seeks to mitigate and take advantage of a part of this waste that is currently only a waste. For this investigation, the Marshall methodology was applied for the elaboration of asphalt mixtures with substitution in percentage of 20% and 30% of recycled concrete. The best proposed design is that of 70% natural stone aggregate and 30% RCD since there is a mass saving in stone aggregate of 2002.25 kg vs 2200.16 and an asphalt mass saving of 137.75 vs 146.53.

Keywords: Asphalt mixture; Recycled Concrete; Recycling; Stone aggregate; Ecological savings.

1. Introducción

Hoy en día en la industria de la construcción hay demasiada generación de residuos a nivel mundial con una generación aproximada de 900 millones de toneladas al año (Martinez Molina, 2015), en México generan tan solo en el Distrito Federal alrededor de 12,000 t/día de residuos sólidos urbanos, de los cuales el 50 % (6,000 t/día) son residuos de construcción y demolición (RCD) y solamente un porcentaje muy bajo es tratado (Daniel, 2013); siendo muy poca la gestión de estos residuos, esto ocasiona que la mayor parte de los mismos acabe en la vía pública, en tiraderos clandestinos, a orillas de las carreteras esto con los problemas que eso implica, y lo peor de todo es el desaprovechamiento de la vida útil que aún les queda. Los RCD están formados por diferentes materiales de construcción, entre los que por su composición y porcentaje de generación (65 al 75 % de los RCD) destacan los materiales de origen pétreo (concretos, morteros, ladrillos, azulejos, losetas, etc.), composición que los hace valorizables y por lo tanto adecuados para su retorno al ciclo de vida de la construcción.

El desarrollo sustentable en el sector de la construcción y en particular en la gestión de los RCD ha sido muy pobre en México, sin embargo es una necesidad que la sociedad demanda con una preocupación creciente sobre los sistemas tradicionales de eliminación de residuos y sus consecuencias para el medioambiente. Los objetivos principales medioambientales de la reducción, reutilización, reciclado y valorización de RCD se centran principalmente en la gestión de los RCD, donde el objetivo principal debe ser el minimizar su generación y en caso de existir, buscar su reciclaje o reaprovechamiento; siendo una etapa fundamental de este proceso de reciclaje la recogida selectiva, posteriormente adecuado proceso de transformación del residuo al agregado reciclado. Debido al gran impacto que la industria de la construcción genera a nivel mundial y al finalizar su vida útil no se le da un adecuado encausamiento a los RCD surge la necesidad de incorporar nuevas tendencias en la gestión de RCD, con un mayor respeto al medio ambiente, implementando técnicas de procesamiento, que ayuden a la reducción del volumen de desechos, en el número de rellenos sanitarios, explotación de recursos vírgenes, emisiones de CO₂ al ambiente, generando así posibilidades de crecimiento para la industria del reciclaje.

Actualmente el reciclaje de RCD en México, está en la línea de convertirse en una actividad con interesantes expectativas de crecimiento. El mantenimiento de esta tendencia depende en gran medida de ver de otra manera el reciclaje de estos residuos, no verlos como basura si no como un material con una nueva utilidad. Por lo que se considera que en no mucho tiempo el empleo de estos residuos como productos sustitutos de los convencionales se vuelva una práctica común lo que generaría la aparición de actividades económicamente interesantes, además de contribuir a una reducción de la huella ecológica.

México un país que cuenta con poca experiencia para el manejo de los RCD tanto en su normatividad como en su gestión y aplicación en campo por esto es que surge la necesidad de implementar procesos para una adecuada finalidad de uso de residuos con lo que se pretende obtener mejoras tanto en el proceso de tratamiento del residuo como en la obtención de agregados reciclados (AR) de calidad. Son productos que pueden ser utilizados y reincorporados en la industria de la construcción de manera segura y eficiente, garantizando así una construcción sustentable.

Se debe de realizar una adecuada gestión de los RCD para obtener un material de calidad; queda claramente comprobado que la parte fundamental para conseguir su reutilización y extensión de vida útil, es a través de un adecuado tratamiento, donde el objetivo principal de este proceso es la obtención de agregados reciclados que cumplan con los requisitos exigidos por la normativa vigente.

Una de las practicas de construcción que más utilización de agregados requiere es la construcción de carreteras ya que prácticamente el 95 % de los materiales utilizados son agregados petreos naturales, en base a esto se penso en el diseño de una mezcla asfáltica con agragados de concreto reciclado en un porcentaje de 20 % y 30 % con tamaño de particulas mayores a 4.25 mm y hasta ¾” de pulgada. A continuación se presenta el desarrollo de la investigación.

2. Procedimiento

Para esta investigación se aplicó la metodología Marshall (Co.) para la elaboración de mezclas asfálticas con sustitución en porcentaje de 20 % y 30 % de concreto reciclado. A continuación, se muestra la metodología de ensayo que se siguió para la obtención de los resultados.

2.1 Metodología de ensayos

- Caracterización de agregados gruesos.
- Caracterización de agregados finos.
- Caracterización del asfalto.
- Diseño de las Mezclas Asfálticas con agregados RCD.

La realización del programa experimental consta de 2 etapas:

Primera etapa: Obtención y estudio de las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, que serán comparadas con las de los agregados naturales seleccionados para realizar las diversas experimentaciones.

Segunda etapa: Se planteará el uso de gruesos y finos en la composición de una mezcla asfálticas densa para carpeta de rodadura con la adición de un porcentaje controlado de árido reciclado. Así como el diseño volumétrico para la obtención del contenido óptimo de asfalto para cada uno de los porcentajes, la prueba testigo, con 20% de agregado reciclado 30% mediante la metodología Marshall.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado, ya que es importante determinar este parámetro que es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través del concreto asfáltico. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento. (Garnica Anguas, 2005).



3. Resultados

Para la obtención de resultados se elaboraron 24 especímenes por cada porcentaje de agregados (100 % agregado natural, 20 % agregado de concreto reciclado y 30 % agregado de concreto reciclado) para la obtención del contenido óptimo y para posteriormente con el contenido óptimo de cada porcentaje de agregado se elaboraron 8 especímenes por porcentaje para realizar las pruebas correspondientes marcadas por la normativa mexicana (6) (SCT, 2008) para calidad de mezclas asfálticas.

A continuación, se muestran los resultados de los diseños que se compararon en lo que es la mezcla testigo con agregado 100 % natural con un porcentaje óptimo 6.66 % de asfalto, 20 % agregado reciclado con un porcentaje óptimo de asfalto de 6.84 % y 30% agregado reciclado con un óptimo de asfalto de 6.88% como sustitución del agregado natural. Para el diseño todas las propuestas se elaborarán para un tráfico de más de un millón de ejes equivalentes y hasta diez millones de ejes equivalentes el cual tiene que cumplir con las especificaciones marcadas por la normativa de la SCT (2008) por el método de diseño Marshall.

El material en estudio es proveniente de la región de Morelia, Michoacán con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ "; estos agregados pétreos naturales fueron obtenidos del banco de material llamado la Roka ubicado en la carretera Morelia - Uriangato 634, Cuto del Porvenir, Mich, México los cuales son producto de la trituración de las canteras cercanas del banco es material 100% triturado tanto la grava, sello y arena.

En la tabla 1 se muestran las características de cada una de las mezclas asfálticas elaboradas con cada uno de los diferentes porcentajes de agregado de concreto reciclado.

A continuación, se presentan las diferentes gráficas comparativas en las cuales se muestra el promedio de los 8 especímenes por porcentaje de agregados (100 % AN, 20 % AR y 30 % AR).

En la figura 1 se puede observar que los resultados para 20 % y 30 % de agregado pétreo reciclado se mantienen dentro de las recomendaciones por parte de la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que marca que el flujo máximo para un tránsito con más de un millón de ejes equivalentes y hasta 10 millones de ejes equivalentes es de 3.5 mm.

En la figura 2 se observa que la estabilidad en el porcentaje de 20 % y 30 % de agregado reciclado cumplen con lo establecido por la normativa de la SCT que indica que la estabilidad mínima requerida para tránsito de un millón a 10 millones de ejes equivalentes debe ser de 816 kg.

Tabla 1. Características de cada una de las mezclas asfálticas elaboradas con cada uno de los diferentes porcentajes de agregado de concreto reciclado.

Características de la Mezcla Asfáltica	Control	ACR 20 %	ACR 30 %	Normativa SCT [24]
Contenido optimo de asfalto (%)	6.66	6.84	6.88	-
Densidad especifica	2.347	2.190	2.138	-
Estabilidad (kg)	809	828	885	816 min
Vacios de aire (%)	4.8	6	5	3 - 5
Flujo	3.24	3.55	3.5	2 - 3.5
Vacios en el agragado mineral (VMA) (%)	17.6	11.8	9.1	14 max
Vacios llenos de asfalto (VFA) (%)	72.7	47.8	44.5	65 - 75
Especímenes compactados a 75 golpes por cara y a una temperatura de 160 °C				

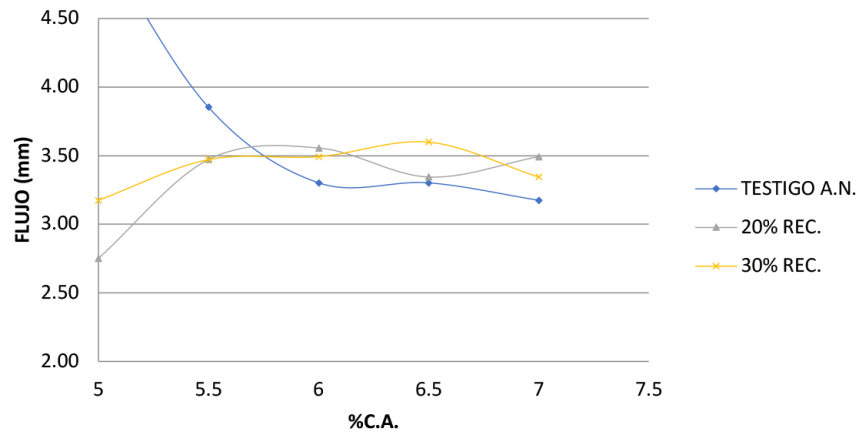


Figura 1. Resultados para 20 % y 30 % de agregado pétreo reciclado.

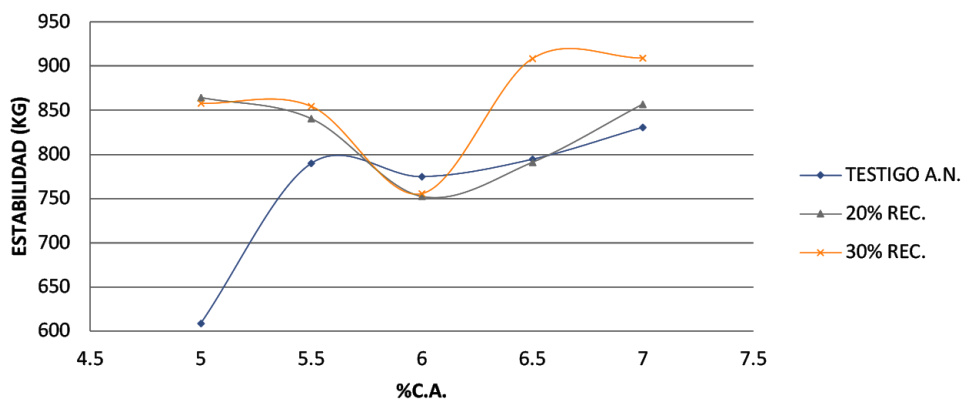


Figura 2. Estabilidad en el porcentaje de 20 % y 30 % de agregado reciclado.

En la figura 3 se hace un análisis comparativo donde:

- 1 es el diseño óptimo con agregado pétreo 100 % natural.
- 3 es el diseño óptimo con agregado pétreo 80 % natural 20 % reciclado.
- 4 es el diseño óptimo con agregado pétreo 70 % natural 30 % reciclado.

Se puede observar que la masa requerida de agregado por m³ va disminuyendo conforme va aumentando el agregado de RCD, por lo que esto podría significar un ahorro.

En la figura 4 se trata de hacer un contraste entre los diferentes diseños óptimos mostrando el porcentaje de agregado, de asfalto y de vacíos. Donde:

- 1 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 100% natural.
- 3 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 80% natural y 20% reciclado.
- 4 es el diseño de la mezcla con agregado pétreo 70% natural 30% reciclado.

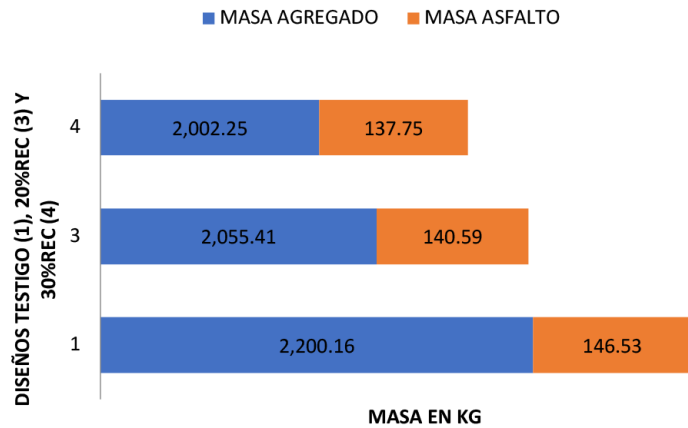


Figura 3. Masa por m³ de cada diseño óptimo de mezcla.

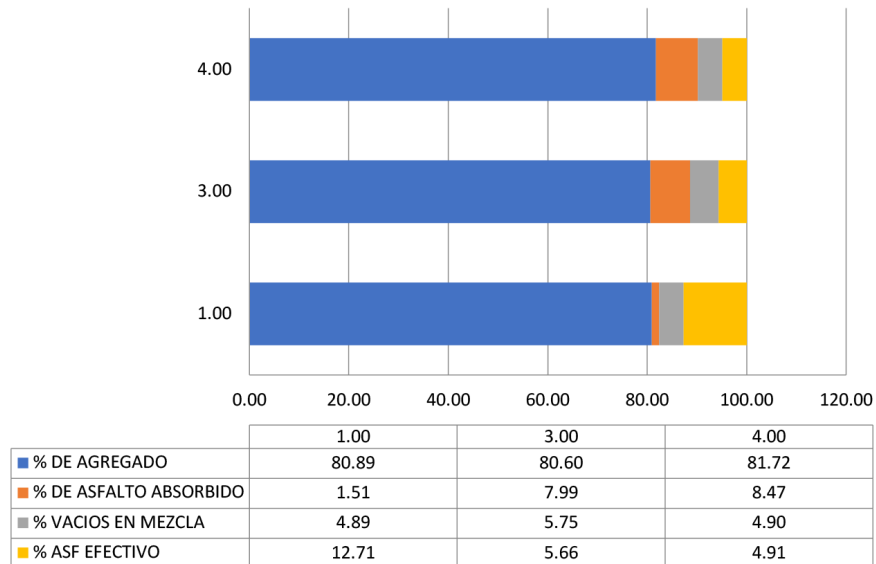


Figura 4. m³ de mezcla asfáltica por diseño.

Así podemos observar que en cuanto al volumen de agregado va paulatinamente aumentado conforme se añade más % de RCD, el asfalto absorbido al igual se muestra que va aumentando y por lo tanto el efectivo disminuye y finalmente los vacíos en la mezcla se mantienen en el mismo porcentaje aproximadamente para los 3 diseños.

4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que para la mezcla testigo obtuvimos un porcentaje de asfalto de 6.66 % con una estabilidad de 809 kg y un flujo de 3.24 mm.

Para la mezcla con un porcentaje de 20 % de agregado de concreto reciclado obtuvimos un porcentaje óptimo de asfalto de 6.84 % una estabilidad de 828 kg y un flujo de 3.55 mm.

Para la mezcla con un porcentaje de 30 % de agregado de concreto reciclado obtuvimos un porcentaje óptimo de asfalto de 6.88 % una estabilidad de 885 kg y un flujo de 3.5 mm.

Finalmente, después del estudio realizado se puede llegar a la conclusión que entre más agregado reciclado se aumente a la mezcla asfáltica la masa de asfalto por m³ utilizado va disminuyendo por lo que esto se traduce en un ahorro económico como se muestra en la figura 3.

Por otra parte, la utilización de agregado reciclado dentro de la mezcla asfáltica ayuda en el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición que en este caso específico son los agregados de concreto reciclado.

El mejor diseño propuesto es el de 70 % agregado pétreo natural y 30 % RCD ya que hay un ahorro de masa en agregado pétreo de 2002.25 kg vs 2200.16 y un ahorro de masa de asfalto de 137.75 vs 146.53.

5. Agradecimientos

Agradecimientos al CONACYT, al laboratorio de materiales Ing. Luis Silva Ruelas perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

6. Referencias

- Co., H. M. (S.F.). *Marshall Mix Design*. Illinois 60176 U.S.A.
- Daniel, I. M. (2013). *Residuos De Cosntrucción Y Demolición (Rcd) Situación Actual Y Correcta Gestion Para El Proceso De Reciclaje En La Industria Mexicana*. Mexico Df.
- Garnica Anguas, P. M. (2005). *Caracterización Geomecanica De Mezclas Asfálticas*. Instituto Mexicano Del Transporte, Sanfandila, Queretaro: Publicación No. 267.
- Martinez Molina W., A. A.-A.-G.-G.-B.-G. (2015). Concreto Reciclado: Una Revisión. *Alconpat*, 235-248.
- Pérez Ignacio, M. T. (2007). Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente Fabricadas Con Áridos Reciclados de residuos de construcción y demolición. *Materiales de Construcción Vol. 57*, 17-29.
- Sct. (2008). Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. En SCT, *Características de los Materiales*.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Estudio de la carbonatación del concreto con agregado reciclado modificado con adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii*

J. R. Nahuat Sansores, L.F. Jiménez

Tecnológico Nacional de México Campus Chetumal

Autor de Contacto: M14390332@chetumal.tecnm.mx

Resumen

Este trabajo se desarrolla partiendo del interés por estudiar el comportamiento de especímenes de concreto con agregado reciclado y bacteria *Sporosarcina pasteurii*, ante los efectos de la carbonatación. El proceso se llevará a cabo en una cámara de carbonatación acelerada y posterior a esta exposición se analizará el avance de dicha carbonatación y la microestructura de los especímenes. Se prevé una validación de la formación de calcita en la microestructura del concreto con agregado reciclado derivado de la bioprecipitación, sellando poros y microfisuras.

Palabras clave: Bioprecipitación; concreto bacteriano; carbonatogénesis; bioconcreto; biomineralización.

Abstract

The present work aims to study the behavior of recycled aggregate and bacteria *Sporosarcina pasteurii* in concrete specimens exposed to carbonation. Such process will take place in an accelerated carbonation chamber, carbonation front depth and microstructure will be analyzed thereafter. It is foreseeable that calcite formation ought to be encountered in the recycled aggregate concrete microstructure due to bacterial activity which in turn fills microcracks.

Keywords: Bioprecipitation; bacterial concrete; carbonatogenesis; bioconcrete; biomineralization.

1. Introducción

Se ha demostrado que la carbonatación como fenómeno disminuye la alcalinidad y daña la capa de pasividad que recubre el refuerzo en el concreto, su avance es progresivo hacia el interior del concreto y las características que más inciden en la velocidad de avance son: humedad relativa, concentración de CO_2 , la cantidad de cemento que se utilizó en la mezcla, humedad y porosidad (Jiménez y Moreno, 2015).

A pesar de que la literatura sugiere que la carbonatación es un proceso altamente repetitivo su reproducibilidad es sumamente baja, debido a la complejidad temporal inherente al fenómeno. Es por esta razón que autores como Sanjuán *et al.*, 2003, Jiménez y Moreno, 2015, y Campos-Silva *et al.*, 2016, han empleado las cámaras de carbonatación acelerada para estudiar los efectos del fenómeno en concretos.

Dichas cámaras de carbonatación acelerada permiten simular la acción de este fenómeno en el concreto al elevar la concentración de CO_2 controlando la humedad relativa en el interior de la misma, para luego determinar el avance de los frentes de carbonatación, es decir, la resistencia que pueden ofrecer los concretos en estudio ante los efectos de dicha carga ambiental. Autores como Farah *et al.* (2019), consideran crucial el estudio de la carbonatación y sus efectos en el concreto, ante las constantes amenazas del cambio climático (IPCC, 2018).

De igual manera, en atención a la demanda global de soluciones sostenibles surge la necesidad de proporcionar literatura e insumos experimentales que validen la sustitución de agregado natural por agregado reciclado en apoyo al concepto de régimen circular de consumo y promoviendo una regeneración de los geoeosistemas dañados por la sobreexplotación de agregados pétreos.

La aportación del presente estudio a la demanda global de soluciones sostenibles también incluye la adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii* a la mezcla de concreto con agregado reciclado, con miras a reducir el consumo de cemento que normalmente se utilizaría para subsanar las propiedades de la mezcla con agregado reciclado, ya que estudios previos (Achal *et al.*, 2011; Chidara *et al.*, 2014) demuestran efectos positivos en las propiedades de los concretos bacterianos, tales como una disminución de la porosidad, un aumento de la densidad y la respectiva consolidación de la zona interfacial de transición (ITZ, por sus siglas en inglés), aumentando la resistencia de los concretos ante la penetración de cloruros y la corrosión por efectos de carbonatación.

2. Procedimiento

2.1 Materiales

Las muestras se elaboraron considerando el método de factores empíricos del ACI, determinándose su revenimiento, tamaño máximo del agregado, cantidad de agua, cemento, agregado grueso (grava) y agregado fino (arena). Los materiales utilizados fueron cemento Portland ordinario (30 MPa), agregado grueso y fino de banco (obtenidos por trituración de piedra caliza en una cantera local), agregado grueso reciclado recuperado de elementos estructurales heterogéneos.

Por otra parte, se obtuvo una cepa de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* proporcionada por el laboratorio Científica Senna, con las siguientes características de crecimiento y estabilización:

- Condiciones de crecimiento: Temperatura 30° C y ambiente aeróbico
- Condiciones de estabilización: Temperatura 2° C a 8° C

Después del proceso de colado, se moldearon un total de 56 especímenes de concreto (5 cm de diámetro x 15 cm de altura), pertenecientes a las familias de concretos de estudio con agregado reciclado (CAR) y agregado natural (CN), con dos porcentajes de adición de bacteria, 0.5 % y 1.0 % del peso del cemento y

relaciones agua/cemento de 0.5 y 0.7 (la primera por criterios de durabilidad y la segunda por requisitos estructurales).

El experimento fue diseñado con ocho grupos experimentales y cuatro de control:

- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii* (0.5 CN 0.5% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii* (0.5 CN 1.0% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii* (0.5 CAR 0.5% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii* (0.5 CAR 1.0% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii* (0.7 CN 0.5% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii* (0.7 CN 1.0% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii* (0.7 CAR 0.5% B).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii* (0.7 CAR 1.0% B).

Establecidos los grupos experimentales, los grupos de control fueron:

- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0 % de agregado reciclado (0.5 CN).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0 % de agregado reciclado (0.7 CN).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100 % de agregado reciclado (0.5 CAR).
- Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado (0.7 CAR).

Se elaboraron cinco probetas para cada familia en el grupo experimental y cuatro probetas por cada familia en el grupo de control.

2.2 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental se ha desglosado en cuatro etapas: (i) Caracterización de especímenes de concreto existentes, (ii) pruebas de carbonatación acelerada, (iii) análisis de morfología interna de las muestras y (iv) modelación del tiempo de servicio del concreto modificado.

Previo a la primera fase, se deberá acondicionar y calibrar la cámara, prepararla para su uso. Dicha cámara se presenta en la figura 1.

2.2.1 Caracterización de especímenes de concreto existentes

La primera parte del desarrollo experimental consiste en la caracterización de los especímenes de prueba en resguardo en el laboratorio durante la contingencia por SARS-CoV-2, seguido se procede con la determinación del frente de carbonatación en estado natural con la prueba de indicador colorimétrico con fenolftaleína al 1 % de acuerdo con las recomendaciones de la RILEM (1988).

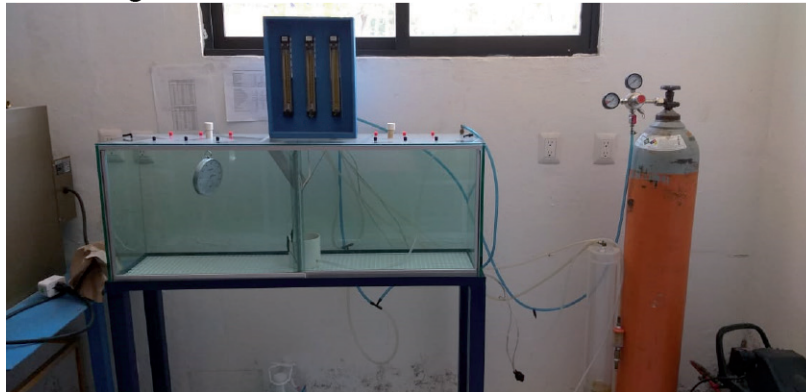


Figura 1. Cámara de carbonatación acelerada del TecNM Campus Chetumal. Elaboración propia.

Para dicha prueba se obtendrán muestras por cada familia de los concretos de estudio, cortadas con cincel y martillo. Además, por cada variable que entre a la cámara, un cilindro se tomará como representativo de la exposición a carbonatación en condiciones naturales.

Simultáneamente al ensaye de carbonatación acelerada en la cámara los especímenes expuestos a carbonatación natural se le realizarán pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y análisis elemental (EDS), así como de difracción de rayos X (DRX), para obtener información gráfica con respecto a la morfología interna y la bioprecipitación de cristales de calcita. De esta manera los resultados se pueden contrastar con los que fueron obtenidos al final de la prueba de carbonatación acelerada.

2.2.2 Pruebas de carbonatación acelerada

La segunda parte consiste en la carbonatación acelerada dentro de la cámara. La concentración de CO_2 de 4% debe determinarse a través de un balance de masa, con una humedad relativa de 60 % a 65 % de acuerdo con la literatura (Papadakis *et al.*, 1992; Moreno, 2010).

El proceso se realizará con tres probetas por cada familia. Debido a que en total se trata de doce familias, se procede a someter a la prueba primero cuatro concretos de estudio y posteriormente otras dos rondas con los ocho concretos de estudio restantes.

Transcurridos 14 días dentro de la cámara, se retirarán los especímenes para calcular el proceso gradual de velocidad (coeficiente de carbonatación K_c) y determinar el tiempo que le tomará carbonatarse totalmente, de acuerdo a la literatura esta velocidad es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo (CYTED, 1998; IM-CYC, 2012), tal como lo expresa la ecuación (1) y (2):

$$d = K_c \sqrt{t} \quad (1)$$

donde:

d Profundidad de carbonatación, para un tiempo t .

K_c Coeficiente de carbonatación.

Ordenado para obtener un modelo de tiempo en el que se produzca la carbonatación a una distancia , d es:

$$t = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2 \quad (2)$$

Obtenida esta medida, se procede a determinar los consecuentes días programados para el retiro de cilindros y a partir de ellos obtener las siguientes muestras. Esto queda expresado en las ecuaciones (3)-(5):

$$K_{c\%} = \sqrt{\frac{(d^2 - d_0^2)}{t}} \quad (3)$$

donde:

t Tiempo de exposición acelerado.

d Profundidad de carbonatación, para un tiempo t .

d_0 Profundidad inicial de carbonatación.

K_i Coeficiente de carbonatación a una concentración (%) dada.

A partir de entonces se trabaja un coeficiente de carbonatación acelerada promedio K_a (mm/año^{0.5}), obtenido a partir de:

$$K_a = \frac{\sum k_i(d_i - d_0)}{\sum d_i - i \cdot d_0} \quad (4)$$

donde:

K_a Coeficiente de carbonatación acelerada promedio (mm/año^{0.5}).

K_i Coeficiente de carbonatación a cierta profundidad .

d_i Profundidad de carbonatación (mm).

d_0 Profundidad inicial de carbonatación (mm).

i Número de ensayos llevados a cabo durante el tiempo de exposición.

Para obtener la relación entre ambas concentraciones de CO₂, dentro y fuera de la cámara, se aplica el modelo simplificado ideado por Moreno, 2013 y más tarde utilizado por Jiménez y Moreno (2015):

$$K_c = K_a \sqrt{\frac{C_a}{C_{c\%}}} \quad (5)$$

donde:

K_c Coeficiente de carbonatación en valores atmosféricos (mm/año^{0.5}).

K_a Coeficiente de carbonatación acelerada promedio (mm/año^{0.5}).

C_a Concentración de CO₂ en el exterior de la cámara.

$C_{c\%}$ Concentración de CO₂ en el interior de la cámara (4%).

2.2.3 Análisis microestructural

En la tercera parte del diseño experimental se encuentra el análisis microestructural concerniente a las pruebas MEB-EDS y DRX. Esta parte se llevará a cabo en los especímenes fuera de la cámara (a exposición natural de carbonatación), y en cada etapa de retiro para aquellos concretos de estudio dentro de la cámara de carbonatación acelerada y hasta el fin de dicha prueba. El fin es identificar la actividad de la bacteria dentro del concreto y los cristales que hayan precipitado llenando los vacíos en comparación con los datos obtenidos de especímenes afuera de la cámara.

Se realizará una selección de las muestras de los concretos de estudio que más relevancia presenten para la investigación. Obtenidas las micrografías se procede al análisis para determinar si la calcita presente es producto de la carbonatación o de la bioprecipitación bacteriana. La diferencia radica, principalmente, en la apariencia de cristales de calcita, ya que aquellos producidos por bacteria poseen como sello distintivo la presencia de la bacteria dentro del cristal funcionando como sitio de nucleación (Stocks-Fischer *et al.*, 1999). La prueba de DRX permite conocer la estructura cristalina de la calcita, así como el tamaño de dicho cristal.

2.2.4 Modelación del tiempo de servicio

Realizadas todas las pruebas, se procede con la modelación del tiempo de servicio a través del coeficiente de carbonatación del concreto (K_c) (CYTED, 1998; IMCYC, 2012) se determina el tiempo de servicio en años (en términos de durabilidad) para los concretos de estudio. Es decir, el componente tiempo del coeficiente de carbonatación permite calcular un horizonte de tiempo que el elemento de concreto resistiría la carbonatación, en años.

3. Resultados esperados

Finalizada la fase de pruebas se encuentra la etapa de análisis de resultados, en la presente etapa juega un papel muy importante lo mostrado en las micrografías. En ellas debe ser visible el efecto de la bacteria, a partir de la cual se pueden atribuir o no los efectos que tuvo la bioprecipitación en la durabilidad del concreto.

De acuerdo con la literatura (Cuzman *et al.*, 2015; Nosouhian *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019; Bisht *et al.*, 2020), la adición de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* durante la etapa de mezclado ha demostrado incrementar la alcalinidad dentro del concreto, lo que indirectamente previene la corrosión, disminuye la porosidad, promueve la remediación de micro-fisuras, aumenta la densidad y promueve la consolidación de la ITZ, lo anterior, a su vez, aumenta la resistencia de los concretos ante la penetración de cloruros y la corrosión por efectos de carbonatación.

4. Conclusiones

La literatura deja claro el interés de la comunidad científica por explorar mecanismos alternativos, sostenibles y novedosos de mejoramiento del concreto. Precisamente lo que sucede con el concreto bacteriano y la sustitución del agregado natural por agregado reciclado.

Los agregados reciclados permiten un régimen de consumo circular y una disminución de la explotación del recurso natural, sin embargo, presentan un importante número de dificultades para justificar su uso en concretos estructurales, tales como una mayor porosidad, una dureza menor y una resistencia disminuida. En materia de durabilidad de concretos es un tema de suma importancia. Por ende, la adición de bacteria para mejorar las propiedades de los concretos con agregado reciclado resulta ser un tema de alto interés.

En la actualidad, existe una alarmante escasez de estudios que relacionen los efectos por bioprecipitación de las bacterias con la durabilidad en concretos (sean pruebas de penetración de cloruros o de carbonatación), si a lo anterior se añade la sustitución del agregado natural por agregado reciclado entonces la cantidad disminuye un tanto más. Es notable que resta aún mucho territorio por conquistar en la ciencia para lograr conciliar la microbiología con la industria de la construcción, con miras a una construcción sostenible.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al CONACYT por las facilidades para el desarrollo de este proyecto de investigación.

6. Referencias

- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, S. M. (2011). Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 730-734.
- ACI Committee 555. (2001). *Removal and Reuse of Hardened Concrete*. American Concrete Institute (ACI).
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*.
- Bisht, V., Chaurasia, L., & Singh, L. P. (2020). Studies on Corrosion and Carbonation Resistance by Bacteria-Mediated Mineralization in Concrete. *ACI Materials Journal*(117-M70), 13-26.
- Campos-Silva, A. R., Fajardo, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 14-34.
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 351-356.
- Chidara, R., Nagulagama, R., & Yadav, S. (2014). Achievement of Early Compressive Strength in Concrete Using *Sporosarcina pasteurii* Bacteria as an Admixture. *Advances in Civil Engineering (Hindawi)*, 2014, 1-7.
- Cuzman, O. A., Rescic, S., Richter, K., Wittig, L., & Tiano, P. (2015). *Sporosarcina pasteurii* use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes. *Journal of Biotechnology*, 49-56.
- CYTED. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. (Subprograma XV ed.). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología.
- Farah, M., Grondin, F., Guo, M., Loukili, A., & Rozière, E. (2019). Carbonation of Concrete in a Climate Change Context. *Risk Evaluation and Climate Change Adaptation of Civil Engineering*, 85-104.
- IMCYC. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado (primera parte). *Construcción y Tecnología en Concreto*, 20-22.
- IMCYC. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado (segunda parte). *Construcción y Tecnología en Concreto*, 20-23.
- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers, In: Global warming of 1.5°C*. Génova, Suiza: IPCC.
- Jiménez, L. F., & Moreno, E. I. (2015). *Carbonatación acelerada en concretos con agregados reciclados de alta absorción*. Lisboa: CONPAT.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, P. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2016). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*.
- Lee, J. C., Lee, C. J., Chun, W. Y., Kim, W. J., & Chung, C.-W. (2015). Effect of Microorganism *Sporosarcina pasteurii* on the Hydration of Cement Paste. *Journal of Microbiol. Biotechnol.*, 1328-1338.
- Li, K., Zhao, F., & Zhang, Y. (2019). Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design. *Cement and Concrete Research*.
- Ministerio de Fomento y del Gobierno de España. (2011). *EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural* (Tercera ed.). Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento.
- Mondal, S., & Ghosh, A. (2018). Microbial Concrete as a Sustainable Option for Infrastructural Development in Emerging Economies. *Urbanization Challenges in Emerging Economies (ASCE)*, 413-423.

- Mondal, S., & Ghosh, A. (2019). Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. *Construction and Building Materials*, 67-75.
- Moreno, E. I. (2010). Discussion of “Sources of Variations When Comparing Concrete Carbonation Results”. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Moreno, E. I. (2013). Carbonation Coefficients from Concrete Made with High-Absorption Limestone Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1-4.
- Naidu, K. S., Seshagiri-Rao, M. V., & Srinivasa-Reddy, V. (2019). Performance Enhancement of Light Weight Concrete Using Microbial Induced Calcite Precipitation by *Sporosarcina pasteurii*. *UKIERI Concrete Congress*, 1-13.
- Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H., & Cousture, A. (2019). Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*.
- Nosouhian, F., Mostofinejad, D., & Hasheminejad, H. (2015). Concrete Durability Improvement in a Sulfate Environment Using Bacteria. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2-12.
- Papadakis, G., Fardis, M. N., & Vayenas, C. G. (1992). Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, 293-304.
- RILEM. (1988). *CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth*. RILEM.
- Sanjuán, M. A., Andrade, C., & Cheyrezy, M. (2003). Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*, 171-180.
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil, Biology and Biochemistry*, 1563-1571.
- Suleiman, A. R., Nelson, A. J., & Nehdi, M. L. (2019). Visualization and quantification of crack self-healing in cement-based materials incorporating different materials. *Cement and Concrete Composites*, 49-58.
- Xu, J., & Wang, X. (2018). Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. *Construction and Building Materials*, 1-14.



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de Cemento Portland con agregado vegetal lignocelulósico de Agave

F. Rosas-Díaz¹, C. Juárez¹, D. García²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

² Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León

Autor de Contacto: felipe.rosasdz@uanl.edu.mx

Resumen

El propósito de la investigación es desarrollar un biomaterial compuesto por una matriz a base Cemento Portland, con agregados vegetales lignocelulósicos de Agave residual. Para el desarrollo del proyecto, se recolectaron pencas de Agave Salmiana. Se realizaron pruebas de caracterización sobre las materias primas y se procesó el agregado vegetal con un tratamiento químico. Para concluir, se evaluó un mortero con 50% de contenido de agregado vegetal determinando su capacidad aislante, densidad y resistencia mecánica a 28 días. Como resultado, la incorporación de Agave permitió obtener valores de conductividad térmica de 0.4136W/mK. A su vez, el tratamiento sobre la fibra permite disminuir en un 53.29 % la capacidad de absorción de agua, permitiendo un mejor desempeño en el tiempo.

Palabras clave: Concreto Vegetal; Biocompuestos; Agave Salmiana; Aislación térmica.

Abstract

The purpose of the research is to develop a biomaterial composed of a matrix based on Portland cement, with lignocellulosic vegetable aggregates of residual Agave. For the development of the project, Agave Salmiana stalks were collected. Characterization tests were carried out on the raw materials and the vegetable aggregate was processed with a chemical treatment. To conclude, it was evaluated a mortar with 50% of vegetable aggregate content determining its insulating capacity, density and mechanical resistance to 28 days. As a result, the incorporation of Agave allowed obtaining thermal conductivity values of 0.4136W/mK. At the same time, the treatment on the fiber allows to diminish in a 53.29% the capacity of water absorption, allowing a better performance in the time.

Keywords: Vegetal Concrete; Biocomposites; Agave Salmiana; Thermal insulation.

Resumo

O objectivo da investigação é desenvolver um biomaterial composto por uma matriz baseada em cimento Portland, com agregados vegetais lignocelulósicos de Agave residual. Para o desenvolvimento do projecto, foram recolhidos caules de Agave Salmiana. Foram efectuados testes de caracterização das matérias-primas e o agregado vegetal foi processado com um tratamento químico. Para concluir, foi avaliada uma argamassa com 50% de agregado vegetal determinando a sua capacidade isolante, densidade e resistência mecânica aos 28 dias. Como resultado, a incorporação do Agave permitiu obter valores de condutividade térmica de 0,4136W/mK. Ao mesmo tempo, o tratamento sobre a fibra permite diminuir em 53,29% a capacidade de absorção de água, permitindo um melhor desempenho no tempo.

Palavras-chave: Betão Vegetal; Biocompósitos; Agave Salmiana; Isolamento térmico.

1. Introducción

Hoy en día, temáticas medioambientales como el cambio climático a raíz del calentamiento global han dado lugar a nuevas investigaciones para el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente, que presenten una combinación de propiedades asociadas a un menor impacto ambiental y menores costos de producción (Ardanuy *et al.*, 2015; Sabathier *et al.*, 2017). En los últimos años ha existido un sector importante de investigadores empeñados en realizar estudios con el objetivo de desarrollar el uso de fibras vegetales en materiales compuestos (Magniont *et al.*, 2012), previniendo la tala de recursos forestales, produciendo buenos rendimientos económicos para el cultivo y otorgando propiedades mejoradas del material (Krishna *et al.*, 2018; Amziane y Sonebi, 2016). energéticos disponibles (Belakroum *et al.*, 2018).

Desde la segunda mitad del siglo XX se ha producido un crecimiento económico global generando importantes avances sociales en las principales economías mundiales, sin embargo asociado a este fenómeno, están los indicadores ambientales negativos que resaltan en paralelo (Mohanty *et al.*, 2005) (Acevedo *et al.*, 2012). Por consiguiente, el sector de la construcción se enfrenta importantes retos mediante el uso de materiales alternativos (Amziane y Sonebi, 2016). Se estima que, a nivel mundial, el sector edificación es responsable del 30-40 % del uso de la energía consumida directamente durante la construcción, el uso y la demolición del edificio, e indirectamente a través de la producción de materiales (energía contenida) utilizados en el edificio (Abd Rashid y Yusoff, 2015), y del 40-50 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Peris Mora, 2007; Acevedo Agudelo *et al.*, 2012; Abd Rashid & Yusoff, 2015; Belakroum *et al.*, 2018). Además, la construcción de edificios consume el 40 % de la piedra, arena y grava, el 25 % de la madera virgen, y el 16 % del agua utilizada cada año en todo el mundo. Asimismo, es responsable de la generación del 30 % de los residuos sólidos mundiales, asociados a la extracción de materias primas, la fabricación de componentes, la construcción, la restauración y la demolición (Acevedo Agudelo *et al.*, 2012) (Arena y De Rosa, 2003). Considerar y aplicar prácticas de sustentabilidad en la construcción puede generar una reducción del 35 % en las emisiones de CO₂, un ahorro en el consumo de agua y energía del 30 % al 50 % y la reducción de los costos por disposición de residuos sólidos en hasta un 90 % (Acevedo Agudelo *et al.*, 2012) (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático, 2009).

Las fibras celulósicas presentan un conjunto de importantes ventajas, tales como una amplia disponibilidad a un costo relativamente bajo, corresponden a un recurso renovable, poseen buenas propiedades de aislación y son biodegradables. Además, se pueden encontrar en una amplia variedad de morfologías. Su superficie puede modificarse fácilmente para tener un carácter más hidrófilo o hidrófobo o para unir grupos funcionales. El costo y la disponibilidad de las fibras naturales vegetales dependen en gran medida del lugar,

la región, los mercados de importación y las aplicaciones de la competencia (Clemons, 2010; Sanjay *et al.*, 2018). Los materiales fabricados con materias primas vegetales son los más prometedores para la construcción, creando un gran interés en todo el mundo sobre las posibles aplicaciones como materiales compuestos con propiedades mejoradas en esta directriz (Chikhi *et al.*, 2013).

Un hormigón en el sentido convencional de la palabra consiste en una mezcla heterogénea entre un aglutinante mineral y granulados (también de origen mineral) de dimensiones graduadas. Del mismo modo, lo que definimos como concreto vegetal, consiste en una mezcla entre granulados de materia vegetal lignocelulósica que constituyen la mayor parte del volumen, y un aglutinante mineral. Estudios científicos de los últimos 30 años han demostrado que la incorporación de material lignocelulósico en matrices cementantes tiene efectos mejorados sobre las propiedades higrotérmicas e impactos ambientales menores a los concretos convencionales (Agopyan *et al.*, 2005; Chikhi *et al.*, 2013; Ardanuy *et al.*, 2015; Krishna *et al.*, 2018). Su uso, como material de construcción, para mejorar las propiedades de los materiales compuestos cuesta muy poco en comparación con el coste total de los materiales compuestos y son muy diferentes a los agregados minerales típicamente usados en concretos (Silva, Mobasher, y Filho, 2009) (Aliet *et al.*, 2012; Mansor & Sapuan, 2018).

Las propiedades higrotérmicas mejoradas de este material se atribuyen principalmente al aumento de la porosidad del compuesto debido a la formación de huecos entre el agregado vegetal y el ligante y a la baja densidad intrínseca de estos (Chikhi *et al.*, 2013; Amziane y Sonebi, 2016; Belakroum *et al.*, 2018). El comportamiento mecánico de los concretos vegetales está guiado por la matriz de aglutinante. Para grandes dosis de ligante, el material es comparable a una matriz de ligante continua en la que las partículas de la planta están enterradas (Amziane y Sonebi, 2016). Si bien las propiedades mecánicas no tienen comparación con las del hormigón estructural con áridos minerales, es necesario considerar que su aplicación es totalmente diferente. Es importante tener en cuenta que los profesionales en la construcción recomiendan garantizar un valor mínimo de 0,2 MPa para la resistencia a la compresión (Chabannes *et al.*, 2015).

Muchos estudios han relacionado la presencia de este hidróxido de calcio con la degradación del agregado vegetal y, por lo tanto, con la pérdida de durabilidad de los compuestos (Poursae y Hansson, 2007; Nozahic *et al.*, 2012). En el concreto vegetal, se observa una zona interfacial de unas decenas de micrómetros de espesor alrededor de los agregados vegetales. En esta zona, el fraguado del ligante se ve inhibido o retrasado por agregado o por los correspondientes productos degradados en un ambiente alcalino. Esta zona de transición interfacial se caracteriza por un aumento de la porosidad entre el agregado y el ligante. Estas áreas de despegado también pueden estar relacionadas con los cambios dimensionales de las fibras vegetales dependiendo del contenido de humedad del material y también pueden observarse cuando se utiliza un aglutinante con un pH alcalino (Amziane y Sonebi, 2016).

El tratamiento de las fibras naturales por NaOH es el más común el cual permite eliminar el contenido amorfo, la hemicelulosa y la lignina, lo que provoca que la superficie de la fibra se vuelva áspera promoviendo un fuerte vínculo de unión interfacial (Ardanuy *et al.*, 2011). Los tratamientos químicos tienen como objetivo reducir la naturaleza hidrófila de las fibras

2. Procedimiento

El procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo de la investigación, está basado en las normativas vigentes para la elaboración de morteros a modo de poder realizar una comparación entre los resultados obtenidos por el concreto vegetal desarrollado y un mortero convencional.

2.1 Materias primas

Para el desarrollo de la investigación, se utilizó como aglutinante mineral CPO40R obtenido de la planta de cemento CEMEX en Monterrey. El agregado vegetal es obtenido de pencas de *Agave Salmiana* que fueron donadas por Mezcales Tamaulipas, extraídas de el “Rancho el tinieblo” ubicado en la carretera Victoria – Matamoros.

2.1.1 Caracterización del Cemento Portland en polvo

- Distribución del tamaño de partícula: La distribución del tamaño de partícula se llevó a cabo mediante un ensayo de difracción laser. Se utilizó alcohol isopropílico con un grado de pureza de 99.5%. La muestra en solución se sometió a ultrasonido durante 1 minuto para dispersar posibles aglomeraciones del material (Amziane *et al.*, 2017; American Society of Testing and Materials, 2018).
- Fluorescencia de rayos X (FRX): Se obtuvo la composición química del material cementante mediante un ensayo de Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva con un equipo marca Panalytical modelo Epsilon3-XL (Albitar *et al.*, 2017).
- Análisis termo gravimétrico (TGA): El análisis termo gravimétrico se llevó a cabo a partir de la temperatura ambiente hasta los 900 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min en una atmosfera de nitrógeno (Flores Ledesma *et al.*, 2016).
- Densidad real: La densidad real del material cementante se obtuvo mediante la utilización de un equipo multiplicnómetro para lo cual se realizaron 3 mediciones para cada muestra.

2.1.2 Caracterización de la pasta de Cemento Portland

- Densidad: La densidad se determinó de manera indirecta utilizando las probetas empleadas para el ensayo de compresión dividiendo la masa sobre el volumen. (American Society of Testing and Materials, 2009).
- Conductividad térmica del concreto: Las mediciones de conductividad térmica se realizaron mediante un equipo Tempos, marca Meter Group basado en la técnica del hilo caliente que cumple con las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08. Para la toma de datos se configuró el ensayo de 10 minutos y se utilizó pasta térmica para mejorar la zona de contacto entre la sonda y la muestra (Rojas *et al.*, 2018).
- Resistencia a la compresión del concreto: Para evaluar las propiedades mecánicas del material cementante, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con lo expuesto en la normativa ASTM C39/C39M-16b, sobre muestras de 5x5x5 cm a las edades de 7 y 28 días. Las pruebas se realizaron con una velocidad de carga de 90kg/s. El curado de las muestras se hará de manera comparativa de dos formas: en agua saturada en cal como estipula la normativa y en condiciones ambientales de 25°C y 50% de humedad relativa como muestra la literatura que debe realizarse para los concretos vegetales. (American Society of Testing and Materials, 2010; Nozahic *et al.*, 2012; Chikhi *et al.*, 2013; Belakroum *et al.*, 2018).

2.1.3 Caracterización del agregado vegetal

- Caracterización química del agregado vegetal: El análisis químico de la fibra se realizó de acuerdo a procedimientos TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2007; Ardanuy *et al.*, 2011) y métodos experimentales descritos por Wise y Rowell (1946; Rowell, 2004).

- Contenido inicial de agua: El contenido inicial de agua se obtuvo secando 3 muestras diferentes de agave (una muestra de sólo médula, otra de médula con cáscara y otra de solo cáscara) en horno a 60°C hasta que el cambio de la masa de la muestra fuera inferior al 0.1 % en 24 horas (Amziane *et al.*, 2017).
- Absorción de agua: Se pesaron 25 g de tres tipos diferentes de muestras de agave en agua destilada a 1, 15, 240, 1440 y 2880 minutos, donde después fueron extraídas y centrifugadas a una velocidad de 100 revoluciones en 50 segundos. (Magniont *et al.*, 2012) (Amziane *et al.*, 2017) (Amziane *et al.*, 2017).
- Densidad: La densidad aparente de la fibra se determinó para tres muestras diferentes de agave colocando una muestra en un recipiente cilíndrico de dimensiones conocidas, le cual fue agitado 10 veces para posteriormente determinar el volumen que ocupó la fibra y su masa determinando de esta manera la densidad del agregado vegetal. (Nozahic *et al.*, 2012; Kestur *et al.*, 2013; Amziane *et al.*, 2017).
- Análisis termo gravimétrico (TGA): El análisis termo gravimétrico se llevó a cabo para tres muestras diferentes de agave a partir de la temperatura ambiente hasta los 600 °C a una tasa de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera de nitrógeno (Kestur G. *et al.*, 2013; Alawar y Hamed, 2015; Kök, Varfolomeev, y Nurgaliev, 2017; Sanjay *et al.*, 2018).
- Espectroscopia infrarroja (FTIR): Se llevó a cabo una prueba de FTIR en donde se analizaron muestras tres tipos de muestras de agave en el espectro entre 400 y 4000 cm⁻¹ (Ríos-Reina, *et al.*, 2017; Carmoña, Mussatto *et al.*, 2018; Sanjay *et al.*, 2018; Rojas *et al.*, 2018).
- Conductividad térmica de la fibra: Las mediciones de conductividad térmica se realizaron mediante un equipo Tempos, marca Meter Group basado en la técnica del hilo caliente que cumple con las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08. En toma de datos se configuró el ensayo de 10 minutos en donde se introdujo la sonda respectiva en un frasco de vidrio que contenía una muestra de agave y se fijó mediante un adaptador que se adosa al recipiente permitiendo mantener inmóvil la aguja introducida (Amziane *et al.*, 2017).

2.2 Tratamiento químico con NaOH

- NaOH: En este caso, las fibras fueron lavadas y secadas para posteriormente ser empapadas en una solución de NaOH a 100°C durante una hora a una concentración de 1 % (Juárez *et al.*, 2004; Ardanuy *et al.*, 2011; Sanjay *et al.*, 2018).
- Solución de poros: Para determinar la respuesta de la fibra con y sin tratamiento, se sumergió en una solución de hidróxido de calcio y agua con un pH de 12.5 aproximadamente, emulando el ambiente alcalino al que será expuesta cuando sea introducida en la matriz cementante (Poursae y Hansson, 2007).

2.3 Caracterización del concreto vegetal

- Densidad: La densidad se determinará de manera indirecta utilizando las probetas empleadas para el ensayo de compresión dividiendo la masa sobre el volumen. (American Society of Testing and Materials, 2009).
- Conductividad térmica del concreto: Las mediciones de conductividad térmica se realizarán mediante un equipo Tempos, marca Meter Group, de acuerdo con las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08. La toma de datos se configurará en un ensayo de 10 minutos y se utilizará pasta térmica para mejorar la zona de contacto entre la sonda y la muestra (Rojas *et al.*, 2018).
- Resistencia a la compresión del concreto: Para evaluar las propiedades mecánicas del material cementante, se realizarán ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con lo expuesto en la normativa

ASTM C39/C39M-16b, sobre muestras de 5x5x5 cm a la edad de 28 días con una relación de agua/cemento de 0.45 y con un 0.5 % de adición de aditivo fluidificante. Las pruebas se realizarán con una velocidad de carga de 90 kg/s (American Society of Testing and Materials, 2010; Nozahic *et al.*, 2012; Chikhi *et al.*, 2013; Belakroum *et al.*, 2018).

3. Resultados y discusión de resultados

3.1 Caracterización del material cementante

El material cementante empleado en la investigación corresponde a un CPO40R cuya densidad es de 3.0354g/cm³ con un tamaño medio de partícula de 24.58µm y cuya curva granulométrica queda expuesta en la figura 1.

El ensayo de Fluorescencia de Rayos X muestra los resultados expuestos en la tabla 1, en donde destaca la presencia de CaO en un 66.78 %, SiO₂ en un 20.133 % y Al₂O₃ con un 1.42 %.

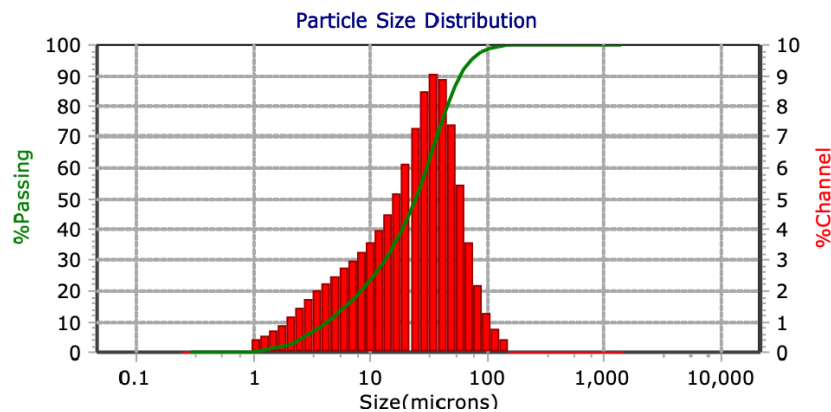


Figura 1. Curva granulométrica del polvo de CPO40R.

Tabla 1. Resultados del ensayo de FRX para el polvo de cemento.

Compuesto	Concentración Promedio [%]
MgO	0.1755
Al ₂ O ₃	1.4260
SiO ₂	20.7133
SO ₃	6.0898
K ₂ O	1.3575
CaO	66.7828
TiO ₂	0.2883
MnO	593.0333
Fe ₂ O ₃	2.7788
ZnO	286.2000
SrO	715.3365

El ensayo de Análisis Termogravimétrico queda expuesto en la figura 2. El ensayo de TGA muestra que existe un punto de pérdida de masa alrededor de los 100 °C que, de acuerdo con la literatura, es atribuible a la evaporación de agua del sulfato de calcio di hidratado (yeso).

Los resultados de resistencia mecánica, densidad y conductividad térmica de la pasta de cemento para el curado en agua saturada en con cal y el curado en condiciones ambientales se muestran en la tabla 2.

Como se observa en la tabla 2, los resultados muestran que la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta la relación agua/cemento, esto debido a que la incorporación de un mayor volumen de agua genera una matriz mineral con un mayor nivel de porosidad lo cual interrumpe la continuidad de la matriz disminuyendo los valores de resistencia mecánica a la compresión, pero a su vez la porosidad permite la existencia de cavidades de aire que responden a la menor densidad. La conductividad térmica del aire estanco es de 0.028W/mK siendo uno de los mejores aislantes térmicos que existen y es esta la razón que determina los valores de conductividad térmica en la matriz cementante.

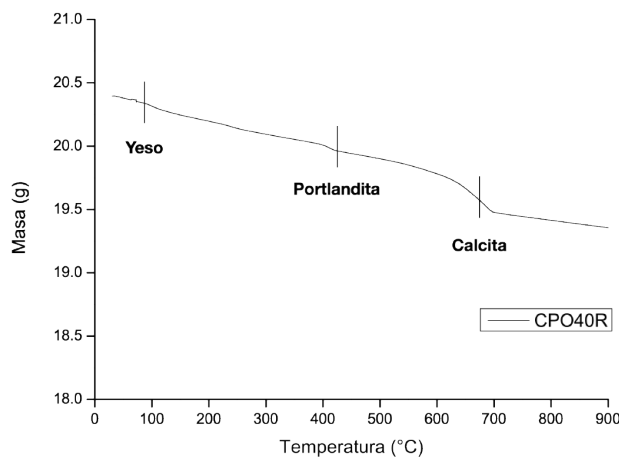


Figura 2. Resultado de TGA para el polvo de CPO40R.

Tabla 2. Resultados de caracterización física de la pasta de cemento CPO40R.

Muestra	a/c	Aditivo	7 días H			28 días H			7 días N			28 días N		
			f'c [MPa]	ρ [g/cm³]	λ [W/mK]	f'c [MPa]	ρ [g/cm³]	λ [W/mK]	f'c [MPa]	ρ [g/cm³]	λ [W/mK]	f'c [MPa]	ρ [g/cm³]	λ [W/mK]
1	0.35	0 %	72.1743	1.9878	0.7667	76.1571	1.9317	0.7460	68.8052	2.0192	0.7136	85.3919	2.0566	0.8853
2	0.35	0.5 %	82.5507	1.9571	0.7919	79.5556	1.5059	0.7175	78.8366	2.0332	0.8081	76.3964	2.0719	1.0397
3	0.35	1%	73.2772	1.9351	0.6868	86.2289	1.9668	0.6627	76.0052	2.0321	1.0322	91.8736	2.0485	0.9889
4	0.45	0 %	51.2896	1.7923	0.7646	---	---	0.5759	53.2157	1.9187	1.0597	53.0049	1.9525	1.0441
5	0.45	0.5 %	56.2347	1.8022	0.7674	51.1912	1.8528	0.7506	53.3670	1.9458	0.8495	48.0891	1.7735	0.9372
6	0.45	1 %	53.0296	1.7946	0.8941	59.0895	1.7703	0.6756	53.1920	1.9221	0.9541	66.9683	1.9558	1.0461
7	0.55	0 %	29.1681	1.6969	0.6701	36.1530	1.6116	0.6028	35.6273	1.8353	0.9094	52.6110	1.8272	0.8926
8	0.55	0.5 %	30.7944	1.7615	0.7883	40.1667	1.6671	0.6529	39.5532	1.8450	0.7234	53.2010	1.8560	0.8933
9	0.55	1 %	40.2009	1.7363	0.6953	31.1755	1.5894	---	33.1234	1.8560	0.9439	43.4339	1.8539	

A su vez es importante mencionar el comportamiento que existe para cada una de las relaciones agua/cemento con la incorporación de aditivo, en donde se observa con la incorporación de un 0.5%, se produce una mejora en las propiedades mecánicas del material. Este comportamiento se produce debido a una mayor dispersión de las partículas de cemento que permite un mayor grado de reactividad favoreciendo las reacciones de hidratación y la formación de gel C-S-H.

3.2 Caracterización del agregado vegetal

El análisis químico mostró que la fibra está constituida principalmente por α -celulosa cuyo valor promedio llega a $17.72 \pm 0.17 \%$, hemicelulosa ($17.15 \pm 0.31 \%$) y lignina ($7.13 \pm 1.23 \%$). Los altos niveles de estos componentes se pueden relacionar con la rigidez del agregado y que influirá sobre las propiedades mecánicas del compuesto. La tabla 3 detalla el porcentaje de composición de todos los constituyentes de la fibra.

Los principales componentes de la fibra se identifican en los espectros y en las bandas definidas del grupo químico característico. La figura 3 resume los resultados donde se muestra una banda de absorción alrededor de 3250cm^{-1} corresponde al enlace O-H que representa un estiramiento por vibraciones de celulosa y de enlaces de hidrógeno de los grupos hidroxilo. En el pico de 2850cm^{-1} se aprecia una banda característica de alquilo C-H, en donde se tiene simétricas y asimétricas vibraciones de tensión de celulosa. Se observan

Tabla 3. Resultados de caracterización química sobre el agregado vegetal.

Muestra	Porcentaje de humedad	Porcentaje de ceniza	Extraíbles E-T	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Agave	5.99%	85.93%	17.31%	7.13%	17.15%	17.72%

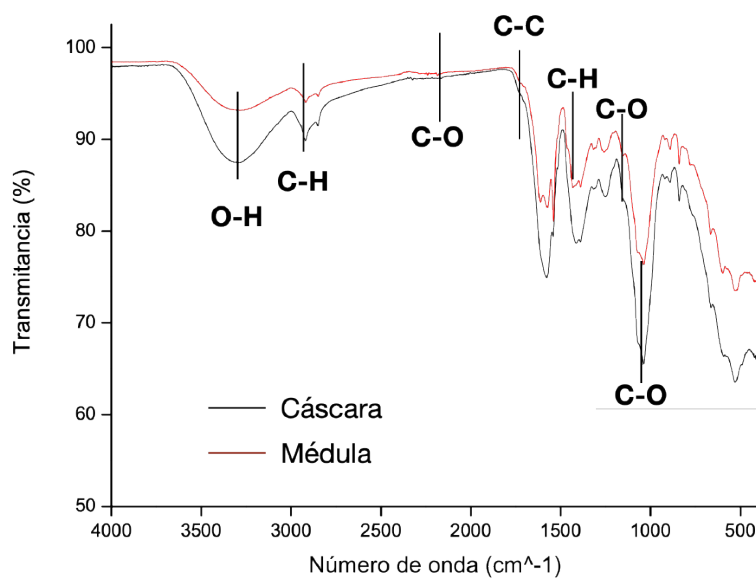


Figura 3. Resultado de FTIR para el agregado vegetal considerado médula y cáscara.

cambios en los picos un poco más consecutivo entre la banda 1200cm^{-1} al 2200cm^{-1} , en donde se asocia la banda 2200cm^{-1} a estiramientos C=O de grupos carbonilo en hemicelulosa. Para las bandas y grupos detectados en 1800cm^{-1} y 1250cm^{-1} que se puede atribuir a C-C y C-H respectivamente, por las vibraciones derivadas de la lignina.

El contenido inicial de humedad del agave varía en función de la composición de la muestra (si es médula, médula con cáscara o solo cáscara) como se observa en la tabla 4, siendo la médula la que mayor contenido inicial de agua posee con un 1246 % y la cáscara la que menor contenido de agua posee con un 469% de humedad. Estos resultados son también congruentes con la capacidad de absorción de agua de la fibra que se muestra en la tabla 5, en donde la médula es capaz de absorber hasta un 438 % de su peso después de 48 horas de estar sumergida mientras que la cáscara es capaz de absorber un 332 % de agua. Estos resultados son importantes debido a que permiten establecer un primer criterio de aceptación de la fibra ya que habitualmente la literatura reporta la utilización de la médula de las fibras, sin embargo, en este caso, el hecho de que la cáscara sea más hidrofóbica que la médula la hace eventualmente menos propensa a ser degradada por la alcalinidad de la solución de poros de la pasta en estado fresco.

Los resultados de conductividad térmica y densidad quedan expuestos en la tabla 6 en donde se observa la relación directa que existe entre estos dos parámetros y al ser comparados con otras fibras empleadas en el desarrollo de materiales de construcción, se puede estipular que la penca del agave posee propiedades físicas aptas para su utilización en el desarrollo de compuestos.

Posterior al tratamiento de la fibra, El agregado tratado con NaOH muestra los siguientes resultados de absorción de agua

Tabla 4. Contenido inicial de agua para el agregado vegetal.

Muestra	Contenido humedad [%]
Médula	1246.0428 %
Médula + cáscara	569.7512 %
Cáscara	469.4891 %

Tabla 5. Resultados de absorción de agua sobre la fibra sin tratamiento.

Muestra	1'	15'	240'	1440'	2880'
Médula	173.3778 %	301.0292 %	361.1864 %	382.1241 %	438.4397 %
Médula + cáscara	135.7220 %	202.7601 %	290.4322 %	333.4698 %	330.5507 %
Cáscara	131.1272 %	168.3396 %	285.1089 %	331.8199 %	332.6563 %

Tabla 6. Resultados de conductividad térmica y densidad para el agregado vegetal.

Muestra	Conductividad térmica [W/m.K]	Densidad [g/cm ³]
Médula	0.0684	0.2994
Médula + cáscara	0.0735	0.3347
Cáscara	0.0803	0.3764

Tabla 5. Resultado de absorción de agua para la fibra posterior al tratamiento con NaOH.

Muestra	1'	15'	240'	1440'	2880'
Médula	87.9833 %	147.5532 %	196.9937 %	248.4378 %	256.4593 %
Médula + cáscara	65.8785 %	98.6119 %	152.5391 %	156.3689%	164.3260 %
Cáscara	62.3693 %	76.8331 %	147.3568 %	152.2875 %	159.9818 %

Como puede observarse, la absorción de agua de la médula se redujo a un 58.49 % del valor original y en el caso de la cáscara, el valor de absorción se redujo a un 48.09 %. Esto muestra la efectividad del tratamiento sobre la zona superficial de la fibra que permite obtener un agregado con mayor hidrofobicidad y por ende menos susceptible a ser degradado al entrar en contacto con la matriz alcalina.

La densidad del compuesto resultante es de 1.1352 g/cm³ y posee una conductividad térmica de 0.4136 W/mK. Los resultados de resistencia a la compresión del concreto vegetal resultante son de 6.9805 MPa a 28 días de curado en condiciones ambientales de 25 °C y 50 % de humedad relativa.

4. Conclusiones

La disponibilidad de pencas de agave residual de la industria de los destilados hace factible su utilización en la fabricación de materiales de construcción con propiedades aislantes mejoradas debido a la conductividad térmica y densidad medidos.

Los valores de conductividad térmica y absorción de agua para el agregado vegetal muestran que la cáscara si bien tiene una conductividad más elevada, posee una menor capacidad de absorción de agua por lo que la mejor opción para su utilización en el desarrollo de compuestos es la no exclusión de ninguno de estos componentes de la penca. De esta manera puede aprovecharse de mejor manera la materia prima al incorporarla de manera completa en la matriz mineral.

El tratamiento a base de NaOH modifico superficialmente el agregado vegetal generando una reducción de la absorción de agua de un 53.29 % lo cual la hace menos susceptible a degradarse al ser incorporada en una matriz mineral con un valor alto de alcalinidad.

La incorporación de un 50 % en volumen de agregado vegetal de agave en una matriz mineral a base de Cemento Portland, permite una reducción en los valores de densidad y conductividad térmica del material lo que mejora sus prestaciones térmicas generando un nivel mayor de aislación para ser utilizado en viviendas.

Los valores de resistencia mecánica del compuesto desarrollado son de 6.9805 MPa, lo cual está muy por debajo de la resistencia que debe tener un elemento que cumpla con funciones estructurales, por lo tanto, debe considerarse una aplicación para el compuesto como material de cerramiento.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al LIMC de la Facultad de Ing. Civil y al Laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL por los servicios brindados, así como también a CONACYT por la beca otorgada con CVU: 995549.

6. Referencias

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Acevedo Agudelo, H., Vásquez Hernandez, A., & Ramírez Cardona, D. A. (2012). Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, *15*(1), 14. <https://doi.org/10.1042/BJ20071598>
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V. M., & Cincotto, M. A. (2005). Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composites*, *27*(5), 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>
- Alawar, A., & Ahmad M. Hamed, K. A.-K. (2015). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, *40*(7), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>
- Albitar, M., Ali, M. S. M., Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *136*, 374–385.
- Ali, M., Liu, A., Sou, H., & Chouw, N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *30*, 814–825. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>
- American Society of Testing and Materials. ASTM C 138-92 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield , and Air Content (Gravimetric), 04 ASTM International § (2009). <https://doi.org/10.1520/C0138>
- American Society of Testing and Materials. ASTM C 39 Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 03 ASTM International § (2010). <https://doi.org/10.1201/9781420091175-c18>
- American Society of Testing and Materials. ASTM C33 Historical Standard : Especificación Normalizada para Agregados para Concreto, ASTM International § (2018).
- Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., & Sonebi, M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *50*(3), 1–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>
- Amziane, S., Collet, F., Report, S., & Committee, R. T. (2017). *Bio-aggregates Based Building Materials* (Vol. 23). <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>
- Amziane, S., & Sonebi, M. (2016). Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, *1*, 31. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>
- Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J. A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Cellulose*, *18*(2), 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>
- Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, *79*, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- Arena, A. P., & De Rosa, C. (2003). Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza - Argentina. *Building and Environment*, *38*(2), 359–368. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00056-2)
- Belakroum, R., Lachi, M., Maalouf, C., Mai, T. H., Kadja, M., El Wakil, N., & Gherfi, A. (2018). Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime. *Construction and Building Materials*, *184*, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196>

- Carmona, J. E., Mussatto, S. I., Castillo-Quiroz, D., Morales-Martínez, T. K., & Ríos-González, L. J. (2018). Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (Agave lechuguilla Torr.). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 100–122. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.21>
- Chabannes, M., Nozahic, V., & Amziane, S. (2015). Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(6), 1815–1829. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9>
- Chikhi, M., Agoudjil, B., Boudenne, A., & Gherabli, A. (2013). Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*, 66, 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.019>
- Clemons, C. M. (2010). Natural Fibers. In *Functional Fillers for plastics* (pp. 213–223).
- Flores Ledesma, A., Barcelo Santana, F., Bucio Gaindo, L., Arenas Alatorre, J. A., & Ruvalcaba Sil, J. L. (2016). Analisis químico elemental y de fases por medio PIXE, DSC, TGA y DRX en MTA Angelus y un cemento Portland blanco. *Revista Odontologica Mexicana*, 20(3), 187–192.
- Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio Climático. (2009). *Cambio Climático* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Juárez, César; Rodríguez, Patricia; Rivera, Raymundo;Rechy de Von Roth, M. A. (2004). Uso de fibras naturales de lechuguilla Como Refuerzo En Concreto. *Ingenierías*, VII(22), 7–19.
- Kestur G., S., Flores-Sahagun, T. H. S., Dos Santos, L. P., Dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>
- Kök, M. V. K., Varfolomeev, M. A., & Nurgaliev, D. K. (2017). Crude oil characterization using TGA-DTA, TGA-FTIR and TGA-MS techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 154(July 2016), 537–542. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.12.018>
- Krishna, N. K., Prasanth, M., Gowtham, R., Karthic, S., & Mini, K. M. (2018). Enhancement of properties of concrete using natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 23816–23823. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.173>
- Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M., & Oms-Multon, C. (2012). Use of plant aggregates in building eco-materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(SUPPL. 1), 37–41. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>
- Mansor, M. R., & Sapuan, S. M. (2018). *Concurrent Conceptual Design and Materials Selection of Natural Fiber Composite Products*.
- Mohanty, A., Misra, M., Drzal, L., Selke, S., Harte, B., & Hinrichsen, G. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction*. <https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch1>
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., & De Baynast, H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- Peris Mora, E. (2007). Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*, 42(3), 1329–1334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.004>
- Poursaee, A., & Hansson, C. M. (2007). Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1127–1133. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.005>
- Ríos-Reina, R., Callejón, R. M., Oliver-Pozo, C., Amigo, J. M., & García-González, D. L. (2017). ATR-FTIR as a potential tool for controlling high quality vinegar categories. *Food Control*, 78, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.065>

- Rojas, C., Cea, M., Rosas-Díaz, F., & Cárdenas-R, J. . (2018). Physical , chemical and mechanical characterization of a prototype insulating material based on eucalyptus bark fiber. *IEEE Latin America Transaction*, *16*(9), 2441–2446.
- Rowell, R. (2004). The chemistry of solid wood. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (Vol. 19, pp. 17–18). <https://doi.org/10.1007/bf00354749>
- Sabathier, V., Magniont, C., Escadeillas, G., & Juarez, C. A. (2017). Flax and hemp fibre reinforced pozzolanic matrix: evaluation of impact of time and natural weathering. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *21*(11), 1403–1417. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1175973>
- Sanjay, M. ., Parameswaranpillai, J., Jawaid, M., Khan, A., Pruncu, C. I., & Siengchin, S. (2018). A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. *Carbohydrate Polymers*, *207*(November 2018), 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.083>
- Silva, F. de A., Mobasher, B., & Filho, R. D. T. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *31*(10), 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>
- Wise, L., Murphy, M., & D' Addieco, A. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Paper Trade*, *122*(2), 35–43.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD

Control de la corrosión del concreto con inhibidores de extractos de plantas

J. R. Torres Hernandez¹, F. E. Corvo Perez², E. Del Angel Meraz¹

¹ Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

² Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: hdez_torres_s@hotmail.com

Resumen

Este trabajo es una revisión de las investigaciones que se han realizado sobre la preparación y caracterización de los inhibidores naturales para proteger el acero de refuerzo del concreto. Se realizó un análisis de la información existente sobre los extractos de plantas que se han reportado como inhibidores de corrosión amigables con el ambiente. Las investigaciones reportan que los extractos de Bambusa, Neem, olivo, ajo sasha y solanum trilobatum, evaluados en medios utilizando el MgCl₂, NaCl y NaOH, se obtienen eficiencias en el rango de 82% y 94% para proteger el acero de refuerzo de la corrosión, El mejor inhibidor fue el solanum trilobatum con una eficiencia del 94%, y con aditivos para el efecto sinérgico se ha registrado hasta el 96 % de eficiencia.

Abstract

This work is a review of the research that has been conducted on the preparation and characterization of natural inhibitors to protect reinforcing steel in concrete. An analysis of the existing information on plant extracts that have been reported as environmentally friendly corrosion inhibitors was carried out. Research reports that Bambusa, Neem, olive, sasha garlic and solanum trilobatum extracts, evaluated in media using MgCl₂, NaCl and NaOH, yield efficiencies in the range of 82% and 94% to protect the reinforcing steel from the corrosion. The best inhibitor was solanum trilobatum with an efficiency of 94%, and with additives for the synergistic effect, up to 96% efficiency was registered.

Keywords: Concrete corrosion inhibitors, green corrosion inhibitors, plant extracts.

1. Introducción

Es casi imposible evitar la corrosión, sin embargo, es posible controlarla (Mandujano *et al.*, 2016). Una de las causas principal que produce daño al concreto más aun cuando estas estructuras se encuentran en zonas costeras por la exposición de iones cloruros que son ambientes agresivos que causantes de daños severos. Los inhibidores de corrosión son sustancias que añadidas en un medio corrosivo, previenen o retardan la reacción entre el metal y el medio, utilizadas en pequeñas concentraciones (Salazar, 2015). Estos inhibidores, permiten el incremento de la resistencia eléctrica de la superficie del metal debido al comportamiento de la polarización catódica y/o anódica, reduciendo la difusión de los iones hacia la superficie metálica, (Calderón *et al.*, 2006). Actualmente existe interés por los inhibidores orgánicos naturales que son amigables con el medio ambiente y no generan daños a la salud. La eficiencia de estos inhibidores de corrosión orgánicos se atribuye a la interacción física y química de la superficie del metal que bloquean los sitios activos de corrosión haciendo que las reacciones anódicas y catódicas sean retardadas (Ahmed *et al.*, 2018), otro factor que se atribuye son los compuestos químicos que contienen los extractos de plantas como son: fenoles, lactonas, alcaloides, taninos, y actividad antioxidante (Vergara *et al.*, 2018).

El mecanismo de protección de los inhibidores puede ser por adsorción química o física en la superficie del metal, conocido como quimisorción o fisorción respectivamente, la formación de películas protectoras sobre el metal o la reacción del inhibidor con un componente corrosivo en presencia del medio acuoso (Alonso *et al.*, 2016).

Los metales son los que se oxidan ya que sus átomos están menos cohesionados que permite a los átomos de oxígeno romper las uniones que hay entre ellos. Existen formas de controlar la corrosión como aplicaciones de inhibidores inorgánicos y orgánicos ya que este último es amigable con el medio ambiente (Marwa *et al.*, 2020). De acuerdo a los extractos utilizados para inhibidores de corrosión, la eficiencia varía, esta depende principalmente de interacciones químicas o físicas en la superficie del metal, que bloquean los sitios activos y así retardan las reacciones catódicas y/o anódicas (Calderón, 2006; Mandujano 2016).

2. Procedimiento

Se realizó un análisis de la información en base a las características de los inhibidores naturales orgánicos de plantas o frutos que han sido investigados para proteger el acero de refuerzo en medio alcalino. Se reportan los datos obtenidos, particularmente la eficiencia determinada con pruebas electroquímicas.

3. Resultados

En el caso de los inhibidores para medio alcalino en presencia de cloruros se utiliza frecuentemente la determinación de los cambios en el potencial de picadura. Habitualmente se preparan soluciones simuladas en una primera evaluación y posteriormente se embeben barras de acero en mezclas de hormigón para exposición a medios ambientes corrosivos. La pérdida de peso de la barra se determina de acuerdo con la norma ASTM G1-90. En la tabla 1 se muestra una relación de los inhibidores preparados con diferentes plantas o frutos y que han sido investigados para el control de la corrosión, en diferentes medios utilizando $MgCl_2$, NaCl y NaOH de en el que fue evaluado y la eficiencia. Se observa los extractos de Bambusa (Salawu *et al.*, 2014), Neem (Castellar *et al.*, 2016), ortiga, Lawsania, olivo (Marwa *et al.*, 2019), ajo sasha (fabienne, 2014), solanum trilobatum (Geetha *et al.*, 2013), se muestran los medios en que fueron evaluados como $MgCl_2$, NaCl, NaOH, mostraron eficiencias en el rango de 82 % y 94 %.

Tabla 1. Medio y eficiencia de Inhibidor de plantas o frutos.

Planta o fruto	Condiciones	
	Medio	Eficiencia
Bambusa A	MgCl ₂	92 %
Neem	NaCl	90 %
Ortiga	NaCl	92 %

La mayor eficiencia fue reportada para el extracto de *solanum trilobatum* (berenjena) con un 94 %. En este estudio se confirma la de una película protectora, que fue observada mediante inspección visual. Para alcanzar la máxima eficiencia, se incorporan pequeñas cantidades de compuestos inorgánicos con el Zn⁺² (Mohammad *et al.*, 2019), que promueve un efecto sinérgico con los extractos de la planta de *solanum trilobatum*.

La variación de las eficiencias de los extractos es a partir de las propiedades químicas de cada planta o fruto, el solvente de extracción como metanol, acetato de etilo, diclorometano, agua o en su mayoría se usó etanol. También influyen las variables de temperatura que oscilaron de 21 °C hasta 65°C y la concentración de extracto para las pruebas electroquímicas. El tipo de inhibidor puede ser catódico y en su mayoría mixtos.

La eficiencia de un compuesto natural como inhibidor de corrosión depende de la habilidad de anclarse sobre la superficie del metal así formando monocapas o multicapas de moléculas orgánicas adsorbidas que bloquean los sitios activos de corrosión retardando las reacciones anódicas y/o catódicas() debido a las interacciones químicas o físicas La estabilidad de dicha capa adsorbida sobre la superficie depende de las propiedades fisicoquímica de las moléculas relacionadas con los grupos funcionales del inhibidor: anillos aromáticos, posible efecto de histéresis, densidad electrónica de átomos donadores, además de otros factores como el ambiente corrosivo y la naturaleza de la interacción entre el orbital del metal y del inhibidor. Se reporta que las aminas y las alcanos/aminas tienen solo una efectividad moderada como inhibidores, mientras que los extractos conteniendo carboxilatos tienen el mejor comportamiento a niveles bajos y medios de cloruro en el concreto (Han-Seung Lee *et al.*, 2018).

4. Conclusiones

El interés por mitigar los procesos de corrosión del acero de refuerzo, puede mitigarse con inhibidores elaborados a partir de extractos de plantas, que además son amigables con el medio ambiente, de acuerdo a las investigaciones analizadas la eficiencia de estos es del 82 al 94 %, siendo más eficiente el *solanum trilobatum* (Geetha *et al.*, 2013) con un 94 % de eficiencia. De acuerdo a las propiedades químicas de los extractos y el medio corrosivo varían los resultados en la eficiencia del inhibidor, también se está estudiando el efecto sinérgico para lograr la máxima eficiencia, se incorporan pequeñas cantidades de compuestos inorgánicos con el Zn⁺², algunos resultados reportan eficiencias, del 96 % en medio alcalino, característico del concreto armado. El uso de inhibidores hace posible, entre otras, la prevención de accidentes para evitar pérdidas humanas.

5. Referencias

- Ahmed, A. F., Ibrahim, A. D. Kyle, R. Fo and Michael, T. (2018), Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions. *Construction and Building Materials*. 165(1). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077663-674>
- Alonso, and Javier C. (2016) “Estudio de la eficiencia inhibidora de corrosión con un impacto favorable al medio ambiente a partir del residuo de café para su aprovechamiento en el sector industrial”, Thesis, Universidad tecnológica de Bolivar, p. 30.
- Calderon, J.A., Mattos, O.R., and Esteves, O.V., (2006) Análisis de la evolución del potencial de circuito abierto del cobalto en medio levemente alcalino. *Revista Facultad de Ingeniería*. 38: 20-30.
- Castellar, P.M., Tejada, C.T., Loaiza, S.F., Vidales, A.M. (2016), Evaluación del extracto del árbol de neem (*Azadirachta indica*) como inhibidor de corrosión en medio salino. *Universidad de medellin*. 16(31):15-31.
- Fabienne, S., Florent R., Christophe, R., and Mounim, L. (2014), Corrosion inhibition of zinc by *Mansoa alliacea* plant extract in sodium chloride media: Extraction, Characterization and Electrochemical Studies, *Electrochimica acta* 133(1):631-638. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.070>
- Geetha, S., Lakshmi, S. and Bharathi, K. (2013), *Solanum trilobatum* as a green inhibitor for aluminium corrosion in alkaline médium. *Journal of Chemical and Pharmaceutical*. 5(5): 195-204
- Han, S. L., Velu S., Seung, J.K. and Subbiah K. (2018) *Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review*, cap.5.
- Bakker, R. M. F. (1988), Initiation period. In: Schiess P. “Corrosion of steel in concrete”, London, Chapman and Hall, cap. 3, pp. 22-55
- Marwa, B. H., Samar, A., Naceur, E., Maiha, K., and Adnene, D. (2020), inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(3): 4846-4856. <https://doi.org/10.1016/j.arab-jc.2020.01.016>
- Mandujano, A.R., Hernandez, J.M., Herrera, H.H., Juarez, J.M. and Corona, L.E. (2016), Evaluación del comportamiento electroquímico del extracto de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) como posible inhibidor de corrosión. *Revista de metalurgia*, 53(4): 1-10. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.108>
- Salawu, A.A., Ismail, M., Zaimi, A.M., Zaiton, A.M., Chesobry, A., and Mirza, J. (2014), Green *Bambusa Arundinacea* leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete. *Journal of Cleaner Production*, 67(15): 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.033>
- Salazar Jimenez, J.A, (2015), Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material’s Protection. *Tecnología en Marcha*, 8(3):127-136.
- Vergara, S.A., Paucar, K.C., Morales, C.C., Castro, O.M., Solis, P.P., and Diaz, J.R. (2018), Obtención de extractos de hojas de *annona muricata* l. (guanábana) inducidos por su efecto inhibidor de la corrosión. *Revista de la sociedad química de Peru*, 8(1):119-132.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



- **IX Congreso Nacional ALCONPAT** •
San Francisco de Campeche, Campeche

Preservación del Patrimonio Edificado





Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO

Zonificación de patologías basado en la identificación de zonas de riesgo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

F.A. Alonso Farrera¹, R. Rodríguez F.², E. Rodríguez O.²,
J.A. Ramírez V.³, J.J. Cruz Solís¹

¹ Cuerpo Académico de Construcción Sustentable, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Chiapas

² Ingenieros Civiles, Egresados de la Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Chiapas

³ Docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental,
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

Autor de Contacto: alfa@unach.mx

Resumen

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con un atlas de riesgo donde se pueden identificar las zonas de más riesgo para la construcción de viviendas. Con base a ese atlas, se tomó como objetivo desarrollar una zonificación de las patologías que se presentan en las viviendas ubicadas en esas zonas, usando la información obtenida de diversas campañas de inspección para conocer el estado de condición físico de las mismas. Con esta información se georreferenciaron las viviendas y se proporcionó información de daños de acuerdo a la zona de riesgo de la Ciudad.

Palabras clave: Zonificación; Patologías; Daño; Estado de Condición.

Abstract

The city of Tuxtla Gutiérrez has a risk atlas where the most risky areas for the construction of buildings can be identified. Based on this atlas, the main objective of this research was to develop a zoning of the pathologies that occur in the homes located in those areas. The database used was obtained from the information obtained from various physical home inspection campaigns to know the condition assessment of homes. With this information, homes were georeferenced and damage information was provided according to the risk zone of the City.

Keywords: Zoning; Pathologies; Damage; Condition Assessment

Resumo

A cidade de Tuxtla Gutiérrez possui um atlas de risco onde podem ser identificadas as áreas de maior risco para a construção de moradias. Com base nesse atlas, o objetivo foi fazer um zoneamento das pato-

logias que ocorrem nas residências localizadas nessas áreas, a partir das informações obtidas em diversas campanhas de fiscalização para averiguar suas condições físicas. Com essas informações as residências foram georreferenciadas e os danos foram disponibilizados de acordo com a zona de risco do Município.

Palavras-chave: Zoneamento; Patologias; Danificaco; Status da condição.

1. Introducción

La identificación de daños en viviendas ubicadas en las zonas de riesgo de un municipio es una actividad primordial para el desarrollo de un plan urbano, ya que, sin éste, la población no contaría con la información adecuada para la construcción de su vivienda; no por situarse en una zona de riesgo significa que no puedan establecerse poblaciones en dicho lugar, sino que se debe llevar a cabo una mejor planeación a la hora de construir, respetando las normas, estudios y procesos constructivos.

De campañas de inspección realizadas, se identificó que los procesos constructivos en las viviendas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez no se llevan a cabo de manera adecuada, no se cuentan con manuales específicos de construcción para cada zona de riesgo identificada, y, por ende, se presentan posibles causas que generan daños en las viviendas.

El proceso constructivo, que va desde el diseño hasta la ejecución, conlleva con ello una gran responsabilidad, realmente una gran parte de las viviendas que se construyen o están construidas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez no cumplen con el Reglamento de construcción del municipio de Tuxtla Gutiérrez (RCTG, 2017), por ende, la vida útil de las viviendas se ve disminuida drásticamente, tal vez no se presenten grandes daños a simple vista, pero se presentan patologías que en caso que las edificaciones se realizaran conforme al reglamento podrían evitarse.

Por lo anterior, en este proyecto se propone conocer la ubicación en la cual se encuentran las viviendas dañadas, que fueron inspeccionadas y evaluadas en su estado de condición, partiendo de la idea de que según la zona de riesgo donde está la vivienda ubicada, tienden a presentar diferentes patologías. Con lo anterior, se pueden dar guías de diseño y de reparación específicas de acuerdo a la zona de riesgo donde se ubican o ubicarán las viviendas.

2. Procedimiento

Usando las fichas de los reportes de inspección de 157 viviendas obtenidas en diversas campañas de inspección (Gómez, 2008; Alonso *et al.*, 2019), se revisaron las evaluaciones a su estado de condición (EC), evaluadas de acuerdo al modelo propuesto por Alonso (2010) para conocer los tipos y causas de daños en las viviendas y proponer posibles técnicas de mantenimiento tanto preventivo como correctivo. Así también, durante este proyecto se realizaron inspecciones específicas a 28 viviendas, con lo que se llegó a tener un total de 185 viviendas inspeccionadas. Usando el modelo propuesto en Alonso (2010), se evaluaron las 28 viviendas y se ubicaron en el Google Earth Pro© (figura 1).

Posteriormente se analizaron las patologías encontradas en cada vivienda con la finalidad de identificar de manera general las posibles causas, características de las fallas y el elemento estructural donde se encontraban. En la figura 2 se muestran las fallas identificadas de acuerdo a los criterios de daños obtenidos de Gómez (2008) y el número de coincidencias de cada una de ellas, en la figura 3 las características de las fallas y en la Figura 4 en que elemento estructural tuvieron mayor incidencia.



Figura 1. Ubicación de las 28 viviendas evaluadas en esta investigación (Elaboración propia).

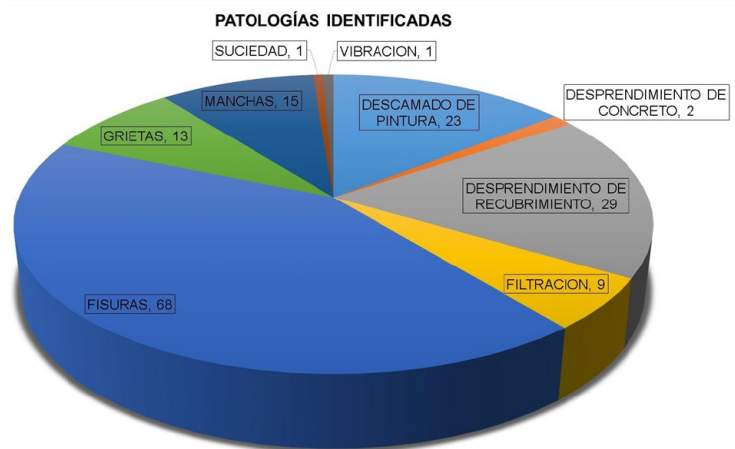


Figura 2. Identificación de daños (Elaboración propia).

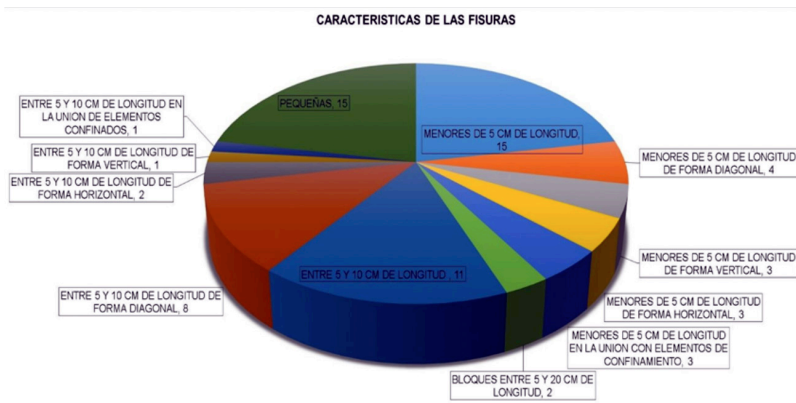


Figura 3. Características de las fisuras observadas (Elaboración propia).

Por último, se georreferenciaron las viviendas para ubicarlas en el Google Earth Pro©, identificando en el mismo las zonas de riesgo de acuerdo al atlas de la ciudad (ATG, 2015), describiendo en cada vivienda las causas de las patologías observadas y su estado de condición físico (figura 5).

En la tabla 1 se muestra un ejemplo de los datos que se cargan de cada vivienda, donde se identifica la clave de la vivienda y su estado de condición físico (EC) en el que se encuentra, el tipo de daño, la ubicación y la posible causa que la produjo. Hasta la fecha, se cuentan referenciadas 185 viviendas y se continúa con las campañas de inspección para aumentar el número de viviendas georreferenciadas.

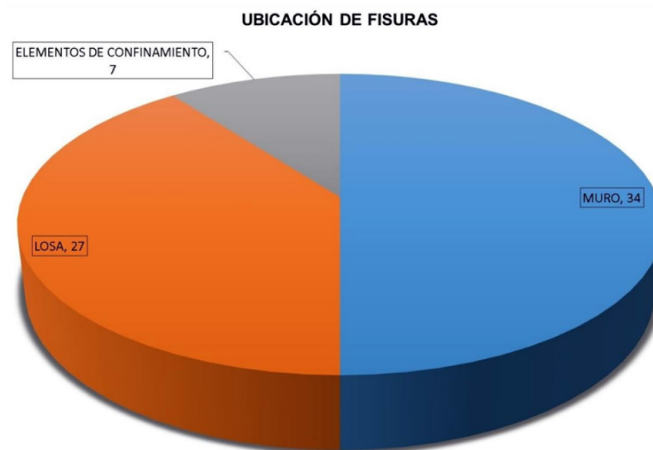


Figura 4. Ubicación de los daños en los elementos estructurales de las viviendas (Elaboración propia).



Figura 5. Zonificación de viviendas y ubicación de zonas de riesgo. (Elaboración propia usando Google Earth Pro©).

Tabla 1. Datos referenciados de la vivienda 12 (Elaboración propia).

Clave/ EC	Tipo de daño	Ubicación	Causa
12 4 (Regular)	Fisuras con orientación diagonal con longitud no mayor a 60 cms	Muro	Sismo
	Fisuras en esquina con longitud no mayor a 40 cms con desprendimiento de losetas.	Losa (piso firme)	Asentamiento
	Desprendimiento de recubrimiento e inicios de eflorescencia.	Muro	Humedad

3. Análisis de resultados

Con la ayuda del programa informático Google Earth se superpusieron los atlas de riesgo de Tuxtla Gutiérrez y se relacionaron con los datos de las patologías presentadas en las viviendas previamente evaluadas, determinando cual fue la posible causa de la falla de acuerdo al tipo de daño que se presenta y a su ubicación en las distintas zonas de riesgo donde se localiza la vivienda.

De lo anterior, se observó que la mayoría de las viviendas tienden a presentar los mismos daños y que en algunos casos, la zona en la cual está ubicada la vivienda contribuye a que los daños sean mayores, lo anterior es debido a que los riesgos que se presentan en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Deslizamientos, Peligro Sísmico y Hundimientos) abarcan grandes zonas de la ciudad. Todas las zonas que se muestran en las figuras 6, 7 y 8, fueron obtenidas del Atlas de Riesgos de Tuxtla Gutiérrez (ATG, 2015).

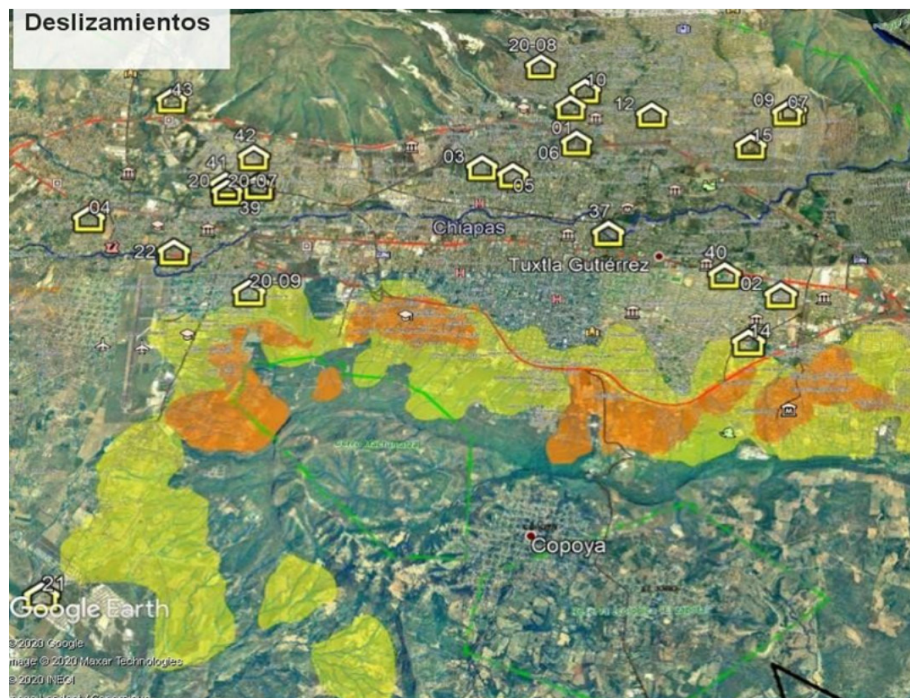


Figura 6. Ubicación de viviendas en la zona de riesgo por Deslizamiento (Amarillo deslizamiento medio, naranja deslizamiento alto) (Elaboración propia).

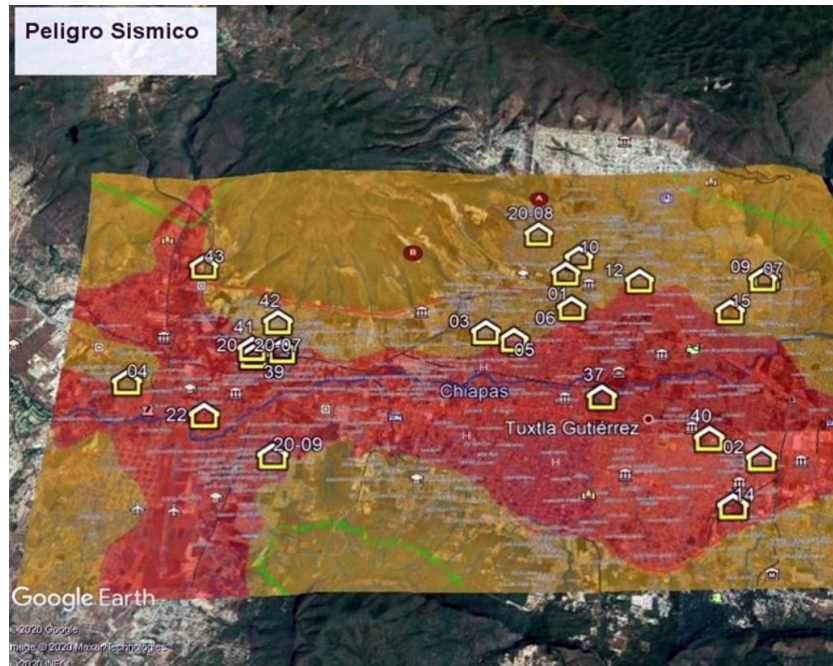


Figura 7. Ubicación de viviendas en la zona de riesgo por Peligro Sísmico (Amarillo Zona C Caliza y Lutitas, Rojo Zona C Arcillas) (Elaboración propia).

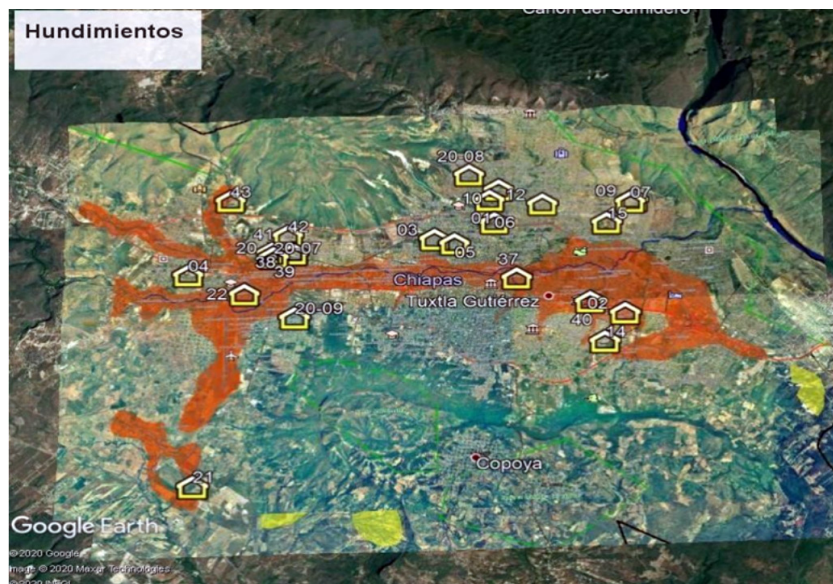


Figura 8. Ubicación de viviendas en la zona de riesgo por hundimientos (Amarillo Limos, Rojo Arcillas) (Elaboración propia).

Como se aprecia en la figura 6, se podría hacer una posible correlación de datos que permitan identificar fallas de acuerdo a la superposición de las capas de riesgo, que permitan evaluar de mejor manera las patologías según las zonas de riesgo donde está ubicada la vivienda y predecir su posible vulnerabilidad estructural.

4. Conclusiones

El proponer una zonificación de patologías, aportará información a la Dirección de Desarrollo Urbano del Municipio, que le permitirá gestionar acciones de preservación para disminuir la vulnerabilidad de las viviendas con daños en zonas de riesgo. Así también, es importante el contar con una guía para la identificación de daños y técnicas posibles de mantenimiento preventivo y correctivo.

5. Referencias

- Alonso (2010). Modelo de evaluación del estado de condición para viviendas de interés social en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Proyecto Postdoctoral. Universidad de Porto, Portugal.
- Alonso, F. Nazar. M., Gordillo, C. & Pimentel, D. (2019). Evaluación del estado de condición físico de viviendas en zonas de riesgo de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Congreso CONPAT 2019.
- ATG (2015). Actualización del Atlas de peligros y/o riesgos, 2015. H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez.
- Gómez, A. (2008). “Estudio Técnico de las Características y Causas de las Patologías Estructurales en Edificaciones en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez”. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas.
- RCTG (2017). Reglamento de construcción del Municipio de Tuxtla Gutiérrez. H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO

Análisis de resistividad eléctrica y la cristalización de sales en muros interiores de la iglesia de San Roque, Campeche

A. Montes Sariñana¹, J. Reyes Trujeque^{1,2},
N. Rosado Cruz^{1,2}, I. Silva Leon¹

¹Laboratorio Nacional de Ciencias para la investigación y Conservación para el Patrimonio Cultural, Centro de Investigación en Corrosión (LANCIC-CICORR). Universidad Autónoma de Campeche

²Maestría en Ciencias de la Preservación de Materiales, Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: javreyes@uacam.mx

Resumen

En este estudio se aplicaron técnicas analíticas como Difracción de Rayos X (XRD), mapeos de resistividad eléctrica y sensores de humedad relativa y temperatura ambiental para estudiar los procesos de cristalización de sales en muros interiores de la iglesia de San Roque en la ciudad de San Francisco de Campeche, México. Los resultados muestran que la técnica de resistividad eléctrica presenta utilidad para determinar patrones superficiales de humedad y establecer una relación entre los ciclos de hidratación/secado de los materiales construcción y la cristalización y disolución de sales. La aplicación de la técnica de difracción de rayos X permitió caracterizar las fases minerales de los productos de deterioro y aproximar su desarrollo.

Palabras clave: Edificios históricos, cristalización de sales, humedad, XRD, resistividad eléctrica.

Abstract

In this study, analytical techniques such as X-Ray Diffraction (XRD), electrical resistivity mapping and relative humidity and environmental temperature sensors were applied to study salt crystallization processes in interior walls of San Roque Church in San Francisco de Campeche city, Mexico. The results show that the electrical resistivity technique is useful to determine surface moisture patterns and to establish a relationship between the hydration/drying cycles of building materials and the crystallization and dissolution of salts. The application of the X-ray diffraction technique allowed characterizing the mineral phases of the deterioration products and approximating their development.

Keywords: Historical buildings, salt crystallization, humidity, XRD, electrical resistivity.

1. Introducción

La ciudad histórica de San Francisco de Campeche está ubicada en la parte occidental de la península de Yucatán, sobre la costa oriental del Golfo de México. Cuenta con un recinto histórico que incluye un sistema defensivo colonial construido en base a materiales calizos que incluye fortificaciones, iglesias y un recinto amurallado, construido durante el periodo barroco mexicano.

Históricamente, la degradación del patrimonio construido en la zona tropical es susceptible a deterioro causada por afectaciones directas debido a condiciones ambientales agresivas, caracterizadas por una humedad relativa alta, temperatura y precipitación pluvial abundante. Las iglesias son parte de este patrimonio, y algunas han soportado cambios ambientales como crecimiento urbano y climático a lo largo del tiempo.

Usualmente los estudios relacionados a esta temática se enfocan al deterioro externo del edificio y no al interior, por lo que es importante comprender los fenómenos que ocurren dentro de un edificio y al ser históricos, evaluarlos mediante técnicas no invasivas y no destructivas.

La piedra caliza es un material de tipo sedimentario, altamente poroso, muy susceptible a la acción de la humedad del entorno tanto en espacios interiores como exteriores. El estudio y entendimiento de los mecanismos que afectan a la durabilidad de los materiales de construcción y, en particular, a las rocas porosas como la caliza es muy importante tanto desde el punto de vista de la conservación del Patrimonio Arquitectónico y Cultural, como del económico debido a su uso difundido como material de construcción y al impacto turístico de las edificaciones.

A pesar de que por mucho tiempo se ha hecho énfasis en la restauración y rehabilitación de edificios de Patrimonio Cultural, en México no existen suficientes investigaciones enfocadas al fenómeno de deterioro en espacios interiores de edificios históricos y del comportamiento de estos materiales en su microclima.

En este contexto este trabajo se centra en análisis de deterioro interior de la Iglesia de San Roque de la ciudad de San Francisco de Campeche relacionado, con los ciclos de humectación de sus muros y los procesos de cristalización de sales. Así mismo se propone el uso de la técnica no destructiva de resistividad eléctrica como método de evaluación.

2 Procedimiento experimental

2.1 Ubicación del estudio

La ciudad de San Francisco de Campeche se ubica en la parte suroccidental de la Península de Yucatán (19° 50' N, 90° 30' W) en México. La iglesia de San Roque por su parte, está localizada en la esquina de las calles 59 x 12 (figura 1), en el centro histórico de la ciudad. Su construcción inicio a finales del siglo XVII, y concluyó en 1724; forma parte del complejo histórico arquitectónico de la Ciudad. Esta Iglesia de planta rectangular y pequeñas dimensiones, cuenta con una nave rasa compuesta de rollizos (Silva 2016).

Se accede al templo por medio de un vano de medio punto y sobre él, se encuentra la ventana del coro tipo balcón. Cuenta con cinco retablos barrocos de gran valor artístico entre los que cabe destacar el del altar mayor. En su construcción, se usaron materiales de la región, incluyendo bloques de piedra caliza, arena y arcilla de carbonato para los cimientos, muros y columnas (Huitz, 2005). En la actualidad, algunas partes de este edificio muestran restos de morteros hidráulicos, hechos con cemento moderno producto de recientes reparaciones (Reyes *et al.*, 2009).

2.2 Registro de codiciones microclimaticas

Se realizaron mediciones de humedad relativa y temperatura empleando 2 equipos data loggers (HOBO), que fueron localizados en dos puntos en el interior de la Iglesia, a una altura aproximada de 3.5 metros (figura 2). Las mediciones se realizaron en intervalos de 5 minutos, durante todo el periodo de estudio que fue de agosto a diciembre de 2018, periodo que incluyó la estación lluviosa y el inicio de la temporada de estiaje.

3. Mapeo de resistividad electrica

La resistividad eléctrica, se midió con un resistómetro tipo Nilsson (Miller 400D), empleando el método de los cuatro puntos, el cual considera el uso de cuatro electrodos separados una distancia constante de 2.5 cm entre sí en contacto con la superficie del material y conectados con las terminales de corriente y potencial del resistómetro tal y como se muestra en la figura 3.

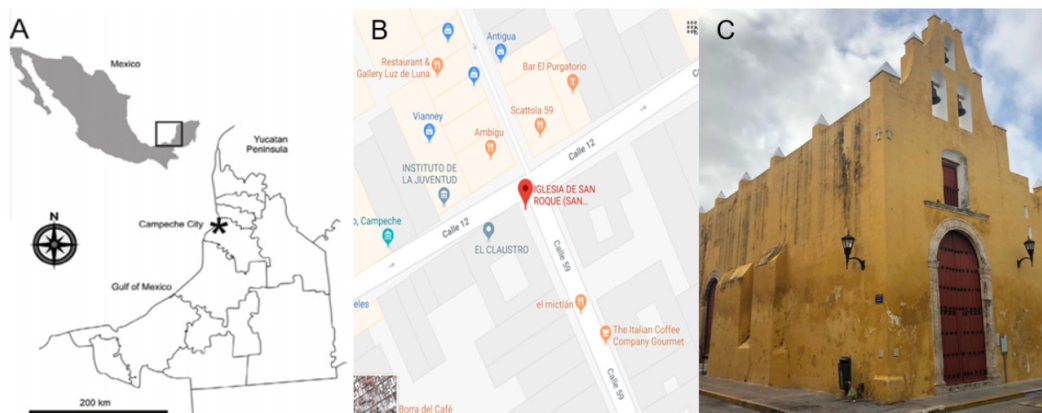


Figura 1. A) Mapa de Campeche México; B) Ubicación de la iglesia de San Roque; C) Fachada principal de la iglesia de San Roque en 2018.

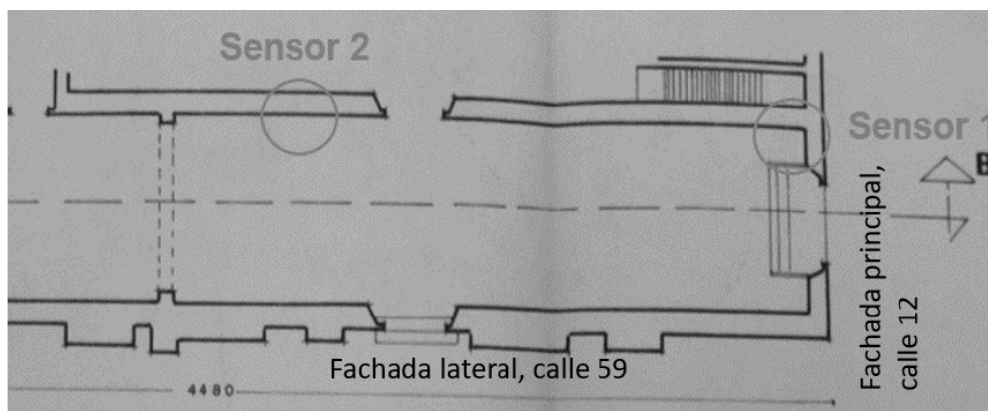


Figura 2. Diagrama de planta de la Iglesia de San Roque donde se señala la ubicación de los sensores de humedad relativa y temperaturas colocados en el interior de la Iglesia para éste estudio (Imagen modificada de archivos de la Diócesis de Campeche).

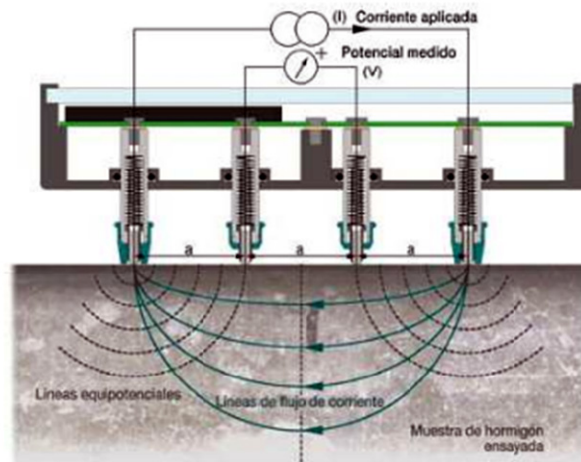


Figura 3. Diagrama del método de los cuatro puntos de Wenner.

A través de los electrodos externos se envía una corriente, lo que permite medir la tensión entre los electrodos interiores, y por tanto calcular la resistividad de acuerdo a la ley de Ohm (1):

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I} \quad (1)$$

Dónde: ρ es la resistividad aparente, a es el espacio entre electrodos en este caso 2.5 cm, V el potencial medido entre los electrodos interiores, I es la corriente aplicada a los electrodos extremos.

Se seleccionaron tres zonas en el interior del edificio (figura 4), las cuales fueron divididas en cuadrantes de 0.50 x 0.50 y de 0.25 x 0.50 m dependiendo del espacio disponible, formando un total de 3 zonas desde la entrada frontal hasta el coro de los dos muros este y oeste de la Iglesia. Sobre cada cuadrante se realizaron mediciones por triplicado de manera horizontal, sobre la superficie humedecida del área de contacto de los electrodos. Los datos fueron procesados con el software Origin ProV8. Con él se generaron mapas de resistividad eléctrica que permitieron establecer patrones relacionados con la humedad y la presencia de sales. Las mediciones se realizaron en los meses de agosto, octubre y diciembre de 2018.

4. Caracterización de sales cristalizadas

En cada periodo de medición de resistividad, se recolectaron muestras de sales de las zonas A (cuadrante 19 y 20, a la altura de 6 metros sobre el suelo), B (cuadrante 19, a la altura de 2.5 metros sobre el suelo) y C (cuadrantes 19 y 20, a la altura de 1.5 metros sobre el suelo). Los criterios recolección se basaron principalmente en aquellas zonas con presencia de estructuras de flujo y de crecimiento generalizado de eflorescencias (figura 5). El retiro de muestras se realizó superficialmente, ya que el inmueble pertenece al conjunto histórico arquitectónico de la ciudad de San Francisco de Campeche, incluido en la lista de Patrimonio Mundial de la Unesco, por lo que no fue autorizada la recolección de muestras en profundidad, con el fin de evitar daños al edificio.

Las muestras de sales, fueron analizadas mediante Difracción de Rayos X, empleando un equipo D8 Advance (Bruker) con diseño DAVINCI de geometría theta–theta, radiación monocromática de Cu y detector de silicio LINXEYE.

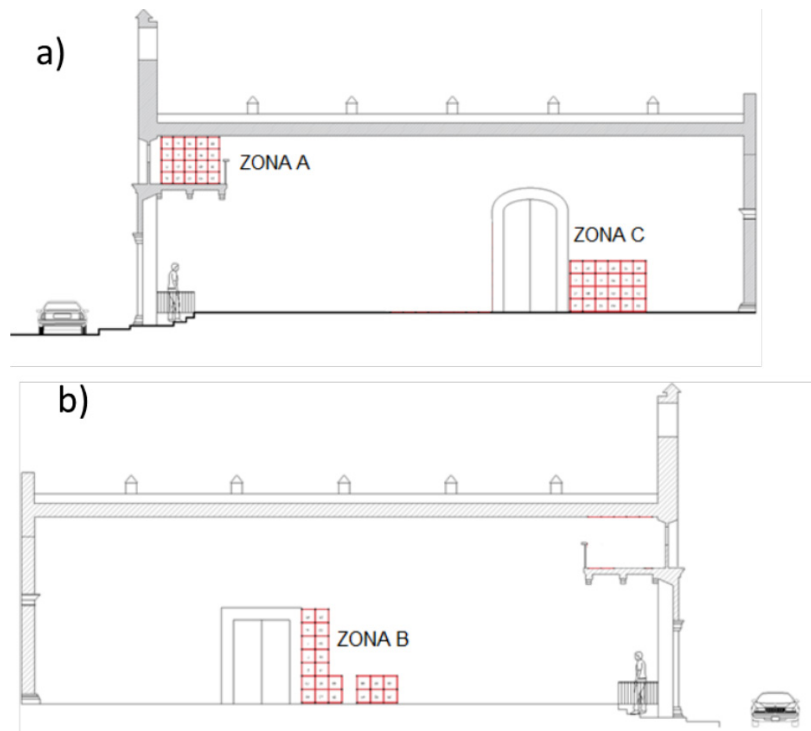


Figura 4. Cuadrantes del mapeo de resistividad de la Iglesia de San Roque a) muro este en los que se encuentran las zonas A y C, b) muro oeste en el que se encuentra la zona B (Imagen modificada de archivos de la Diócesis de Campeche).



Figura 5. Cuadrantes de muestreo de las zonas A, B y C. La marca azul indica la posición de retiro de muestras.

5. Resultados y discusion

5.1 Mapeo de resistividad eléctrica

La iglesia de San Roque, al igual que la mayoría de los edificios de San Francisco de Campeche está construida con bloques de piedra caliza y materiales calcáreos de la región (Reyes *et al.*, 2012). Debido a esto, los daños que presenta el edificio están condicionados principalmente por la presencia de agentes ambientales típicos de un entorno marino-urbano y condiciones meteorológicas de clima tropical.

El análisis de resultados muestra que la de resistividad eléctrica depende de los niveles de humedad en los muros del edificio, los cuales una distribución preferencial que depende de la zona donde se encuentran los muros. Esto induce ciclos de disolución y cristalización que causa deterioro y responden a patrones estacionales (Amoroso; Fassina, 1983).

La zona A se encuentra localizada en el coro de la iglesia, en el muro oriental del edificio, en una zona alta, por lo que la capilaridad proveniente del suelo, no se considera como factor crítico para los niveles de humedad en el muro. Sin embargo, si presenta filtraciones de agua por escorrentía desde la parte superior del techo hasta sus áreas centrales.

Lo anterior causa una mayor retención de humedad en épocas de lluvia, lo que causa que el proceso de secado del muro se prolongue durante más tiempo, y por consiguientes la disolución de sustancias iónicas también sea más prolongado, como reflejan los valores de resistividad, que en los meses de agosto y octubre alcanzan una mayor extensión en esta sección del muro. Esto puede apreciarse claramente en los patrones de resistividad mostrados en la figura 4.

La tabla 1 muestra los estadísticos descriptivos de los valores de resistividad obtenidos en las zonas de estudio. En la Zona A, el análisis ANOVA de los datos mostró diferencias significativas entre agosto y los meses octubre y diciembre, con un nivel de significancia del 5 % (figura 6).

Durante el mes de diciembre, los valores generales de resistividad se incrementan en todos los cuadrantes, y dejan de ser localizados como ocurrió en el mes de agosto, cuando la precipitación pluvial moja paredes y techos del edificio y se presentan escorrentías en áreas centrales de ésta zona. En octubre y diciembre, las escorrentías de agua de lluvia ya desaparecieron, y el muro se encuentra menos húmedo, disminuyendo la presencia de sustancias conductoras en disolución, por lo que se observó mayor resistividad eléctrica en toda la extensión del muro (figura 7).

La zona B, se encuentra en el muro oeste de la iglesia junto a una puerta que permanece cerrada, y es la zona que visiblemente muestra mayor cantidad de eflorescencias en comparación con las zonas A y C, lo que en apariencia puede indicar presencia de menor humedad.

En la zona B, el análisis de varianza para los valores de resistividad en los meses de muestreo mostraron diferencias significativas entre agosto y los meses octubre y diciembre, con un nivel de significancia del 5%. En el mes de agosto, se encontraron los valores más bajos de resistividad en áreas medias de esta sección del muro, con visibles alteraciones como desmoronamientos, ampollamientos y veladuras (ICOMOS-ISCS, 2008 (figura 8). En los meses de octubre y diciembre, se tiende a observar incremento en los valores de resistividad en la zona inferior izquierda (figura 9), esto parece deberse a que las precipitaciones disminuyeron, por lo tanto, es posible un proceso de secado superficial y disminución de disolución de sales lo que incrementa la resistividad eléctrica e induce la cristalización.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los valores de resistividad (Ohms.cm) obtenidos en las zonas de estudio de los muros interiores de la Iglesia de San Roque.

Zona	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar
A	947716	413	38646	108332
B	335104	356	15083	39052
C	119904	145	9487	19193

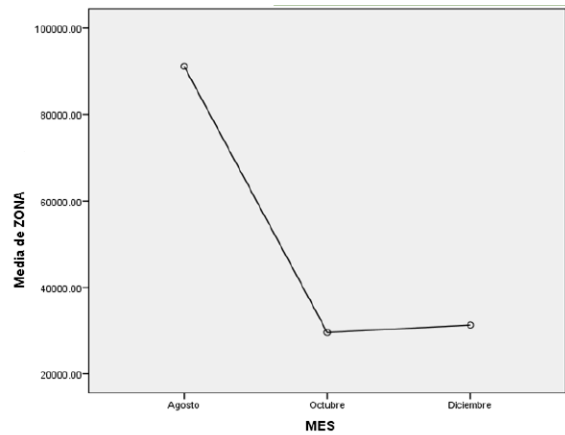


Figura 6. Grafica de medias de ANOVA de la zona A ($\alpha= 0.05$).

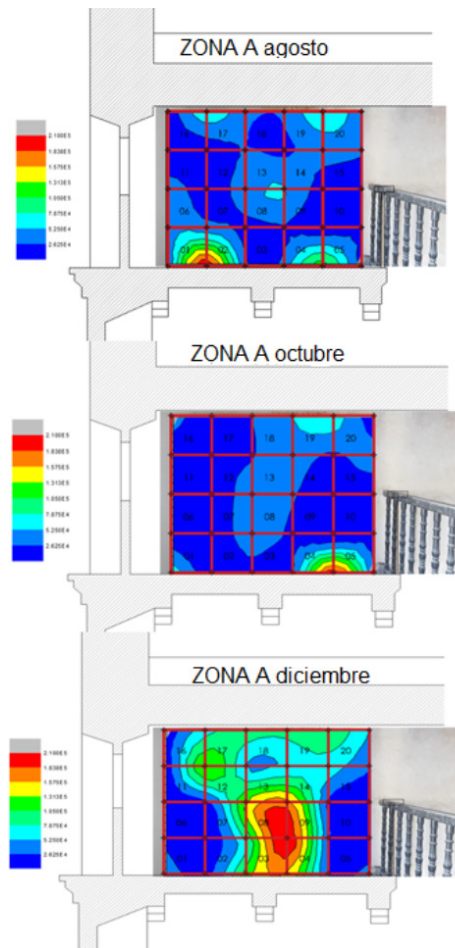


Figura 7. Patrones de resistividad del muro interior de la zona A en los meses de agosto, octubre y diciembre de la iglesia de San Roque.

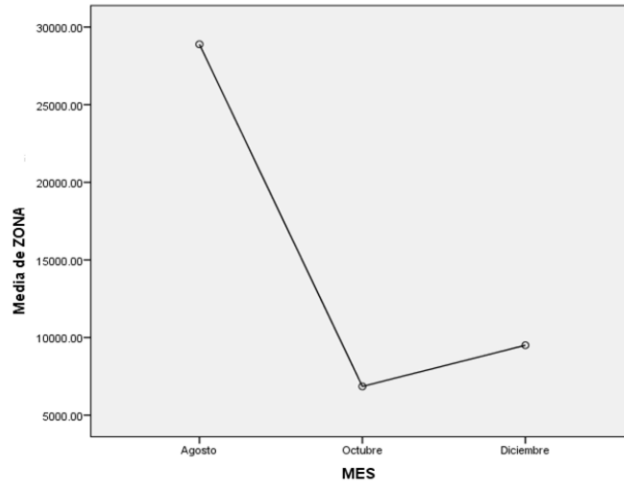


Figura 8. Grafica de medias de ANOVA de la zona B ($\alpha = 0.05$).

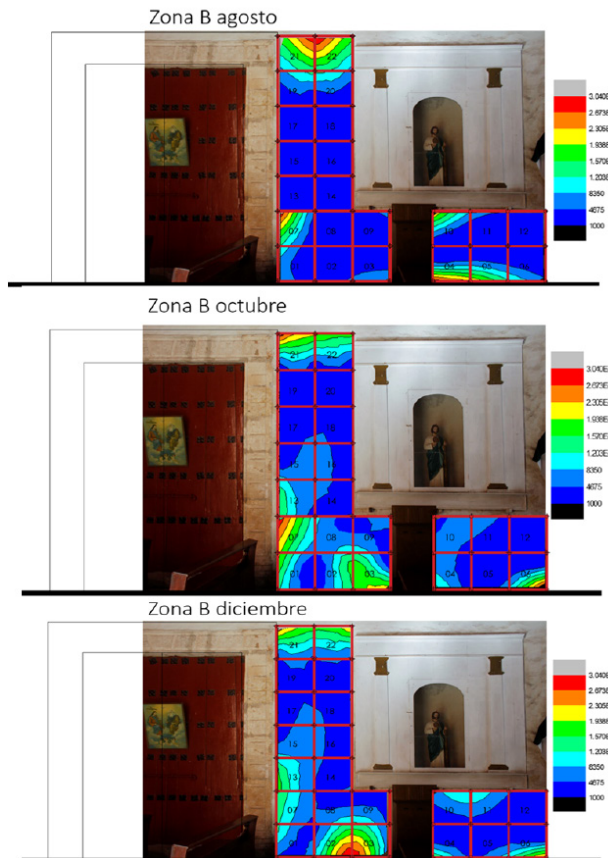


Figura 9. Patrones de resistividad del muro interior de la zona B en los meses de agosto, octubre y diciembre de la iglesia de San Roque.

La prueba de varianza en la zona C, también mostró diferencias significativas en los valores de resistividad, siguiendo el mismo patrón mensual observado en las zonas anteriores (figura 10). Esto reafirma el papel de la absorción de agua de precipitación en los meses lluviosos por parte de los muros del edificio y la pérdida de humedad en el periodo de estiaje.

La zona C se encuentra ubicada en el muro este de la iglesia a un costado de la entrada lateral, esta zona se encuentra protegida por la acción directa del sol y debajo del pulpito. No obstante, sobre ella se observa una estructura de flujo de agua de escorrentía proveniente del techo, que se distribuye desde la parte superior hasta la parte inferior del muro por lo que se pudieron observar que en agosto se observaban residuos de agua en esta zona; en el mapeo se observan bajas resistividades en casi todos los cuadrantes de muestreo (figura 11).

Para octubre y diciembre, las manchas de humedad dejan de observarse, disminuyendo la presencia de sustancias iónicas conductoras lo que se refleja en un aumento de la resistividad. Esta baja disponibilidad de humedad parece ser el catalizador para la aparición de procesos de recristalización de sales que observan como eflorescencias (Silva, 2013).

5.2 Análisis de los productos de deterioro mediante la Difracción de Rayos X

El mapeo de resistividad eléctrica, la visualización de las zonas con mayor deterioro y la presencia de sales, generó los criterios extracción de muestras para los análisis de productos de deterioro que fueron analizados mediante DRX (tabla 2). Las muestras se retiraron siempre de misma posición en las zonas de los muros estudiados en los meses de agosto, octubre y diciembre de 2018.

La cristalización de sales es una de las principales causas de deterioro en los materiales pétreos. Por su naturaleza, puede ocurrir en diferentes puntos de un muro, dependiendo de su estructura porosa, tasa de evaporación del agua, que a su vez también se relaciona con otros factores como fuentes de humedad y temperatura interior del edificio, así como de la velocidad de ventilación de la superficie y solubilidad de sales (Amoroso y Fassina, 1983, Espinosa, 2013).

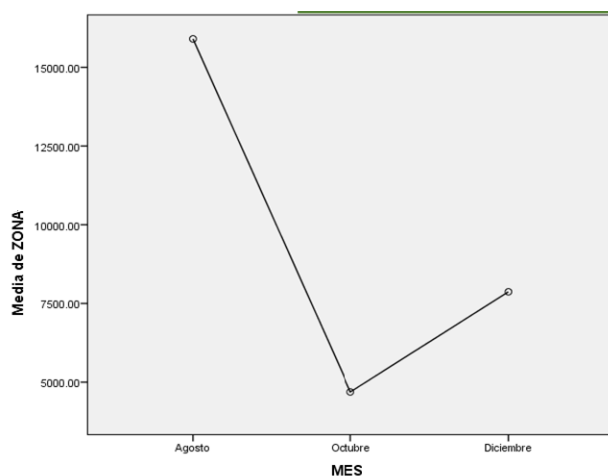


Figura 10. Grafica de medias de ANOVA de la zona C ($\alpha= 0.05$).

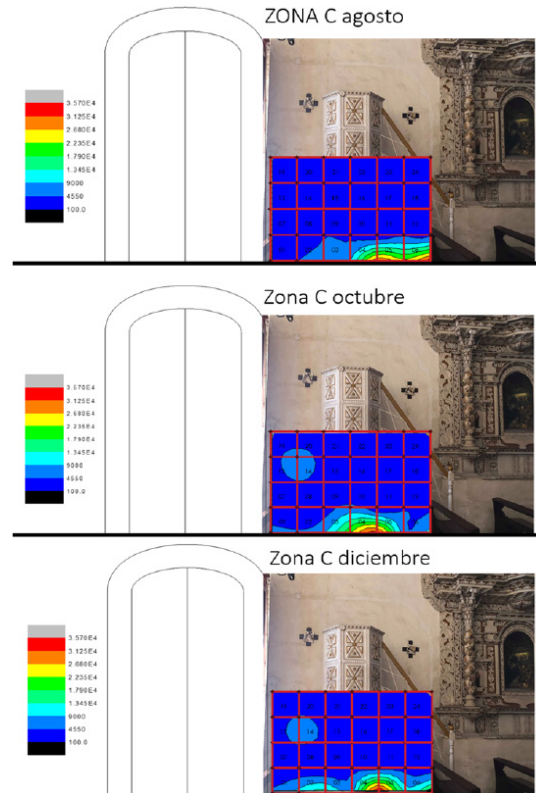


Figura 11. Patrones de resistividad del muro interior de la zona C en los meses de agosto, octubre y diciembre de la iglesia de San Roque.

Tabla 2. Fases minerales identificadas mediante DRX en muestras salinas provenientes de los muros interiores de Iglesia de San Roque. *observado, - no observado..

Muestra		Fases minerales										
Zona	Mes de muestreo	Calcita	Cuarzo	Magnesita	Trona	Halita	Cristobalita	Hematita	Siderita	Yeso	Rutilo	Birnessita
A	Agosto	*	*	-	-	-	*	-	-	-	*	*
	Octubre	*	*	-	-	-	*	-	-	*	*	-
	Diciembre	*	*	-	-	-	*	-	-	-	-	-
B	Agosto	*	*	*	*	-	-	-	-	-	-	-
	Octubre	*	-	-	*	*	-	-	-	-	-	-
	Diciembre	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-	-
C	Agosto	*	*	*	-	-	*	-	*	-	-	-
	Octubre	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Diciembre	*	-	-	-	-	-	*	*	-	-	-

Un factor a considerar, en el proceso de cristalización, es que la formación de una sal puede variar a lo largo del tiempo como consecuencia de las variaciones de humedad (Figura 11), pues las sales forman un sistema dinámico, en el cual ocurren continuas transformaciones debido al envejecimiento y a los ciclos de disolución-recristalización (Sperling *et al.*, 1985)

La tabla 2, muestra las fases minerales identificadas en las muestras de sales superficiales retiradas de los muros de la Iglesia de San Roque. Cabe mencionar que las muestras se retiraron siempre de misma posición en las zonas de los muros estudiados durante los meses de agosto, octubre y diciembre de 2018. Entre los minerales identificados en las muestras de sales se tienen calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y cristobalita (SiO_2), los cuales están relacionados con los materiales calizos empleados para la construcción de los muros de edificios coloniales en la península de Yucatán (Silva, 2013), es por esta razón que se presenta como fase mayoritaria en todas las muestras de la Iglesia a lo largo del periodo de muestreo.

Por su parte, la presencia de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), solo se encontró en la zona del coro, por lo que se cree es consecuencia del uso de morteros de restauración durante actividades de conservación de los muros de la iglesia.

Además, el yeso es un mineral muy higroscópico por lo que se disuelve con facilidad, originando pérdida de adherencia en el sustrato. Su elevada higroscopicidad, también es responsable de que en estos morteros no se desarrollen eflorescencias de forma masiva, pues sus sales se presentan como fases solubles, por lo que da aspecto húmedo a los sustratos que los contienen (Cardell, 2003).

La zona A, es una zona que parece presentar alta humedad en épocas de lluvia, por lo que el yeso puede encontrarse en solución y migrar a diferentes puntos del área que ocupa, donde cristaliza y crea condiciones de esfuerzo mecánico debido a su incremento de volumen dentro del material pétreo, lo que origina fragmentaciones y separaciones (Castro y Barbosa, 2013). Esta zona también fue la que presentó mayor riqueza de sales durante los meses en los cuales se retiraron y analizaron muestras, lo que indica procesos activos de disolución y cristalización

La trona ($\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fue la segunda fase mineral presente en mayor proporción en los muros de la zona B. La presencia de esta sal se puede atribuir a reacciones de disolución de componentes minerales propios de los materiales de construcción y su posterior cristalización

La humedad relativa de equilibrio de los carbonatos de sodio, se encuentran entre 83% y 89% en un rango de temperatura de entre 25 °C y 30 °C. Durante la realización de este estudio se registraron, oscilaciones de estos parámetros que de acuerdo a Arnold y Zehnder (1991), son condiciones que pueden favorecer los procesos de cristalización en los muros de la iglesia (figura 13). Trona, fué encontrada a una altura de 2.5 m. que de acuerdo al modelo de evolución del sistema salino en humedad capilar propuesto por Zehnder y Arnold en 1989 (figura 12), corresponden a los niveles B y C. Según el mismo modelo, en estas dos zonas la presencia de sales origina desagregación granular, desmoronamiento y descamación, tal y como fue observado en los muros de la iglesia de San Roque durante este estudio. Su presencia fue continua durante los tres muestreos.

Por su parte, la halita (NaCl), es una sal contenida en aerosoles marinos que son característicos de la atmósfera de la ciudad, desde donde pueden penetrar al interior de la iglesia a través de puertas y depositarse en la superficie de los muros. Una fuente más probable de esta especie es la contaminación salina de los materiales utilizados para la construcción del edificio, ya que en algunas muestras de morteros de aplanado y unión se observaron residuos de caracoles y conchas marinas, esta sal se identificó en las muestras provenientes de la zona B, en zonas de baja resistividad.

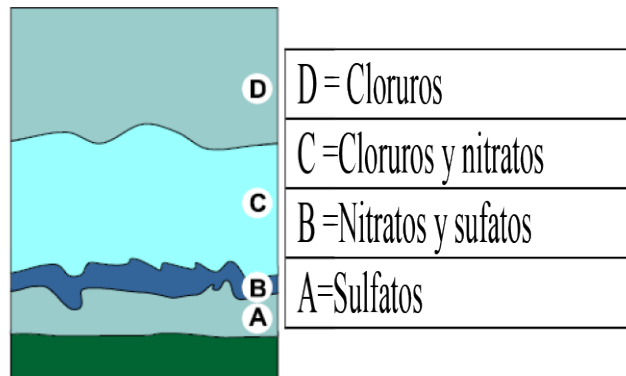


Figura 12. Modelo de la evolución espacial de un sistema salino y tipo de sales presentes en un muro en función de su solubilidad (modificado de Zehnder, 1989).

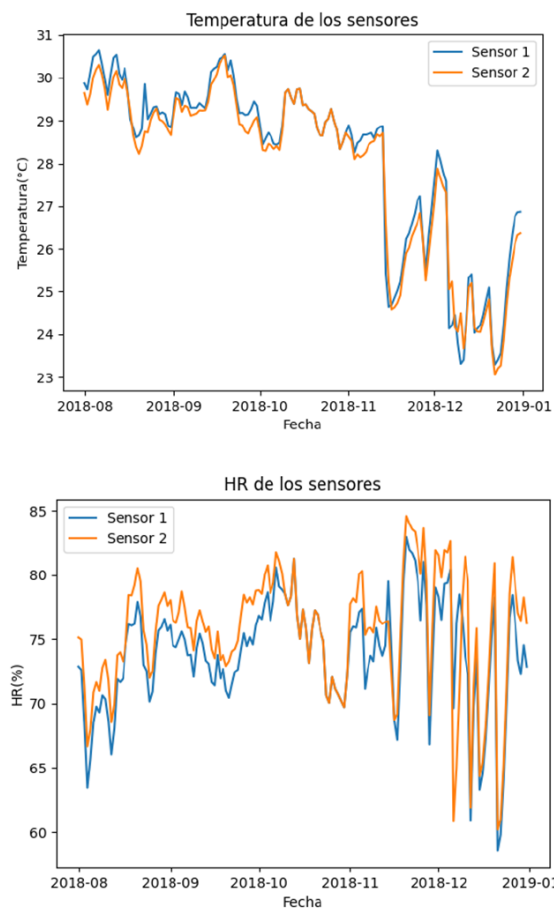


Figura 13. Valores de humedad relativa (%) y temperatura (°C) en el interior de la Iglesia de San Roque durante el periodo de muestreo.

Su higroscopicidad les permite absorber humedad del aire y retenerla en los muros, o disolverse en el agua capilar de los poros desde donde difunde a través del muro expandiéndose. Cuando cristaliza, origina depósitos porosos que por acción capilar absorben más agua, disolviéndose, difundiendo y volviendo a cristalizar, por lo que se considera una de las sales más agresivas que se pueden encontrar en los muros de edificios históricos (Cardell, 2003).

La magnesita ($MgCO_3$), está relacionada con la calcita, y suele aparecer en rocas sedimentarias evaporíticas a altas humedades relativas (Zehnder, 1991). Este tipo de roca es común en la Península de Yucatán (Silva, 2013). Por su parte la birnessita $((Na,Ca)_{0.5}(Mn^{4+},Mn^{3+})_2O_4 \cdot 1.5H_2O)$ es un neomineral que está asociado a la solubilización de silicatos contenidos en los materiales de construcción (Taylor et al., 1964). La magnesita fue encontrada en zonas de baja resistividad de las zonas B y C, mientras que birnessita aparece en los meses de agosto y diciembre, en áreas que durante la temporada de lluvias presenta bajos valores de resistividad, los cuales tienden a incrementarse hacia octubre y diciembre en zona A.

También se observó hematita (Fe_2O_3), aunque en este caso solamente en una de las muestras provenientes de la zona C retiradas en el mes de diciembre. Los minerales de hierro son muy abundantes en la naturaleza, donde forman parte de los minerales de suelo. Su abundancia le ha permitido ser empleado como pigmento, por lo que su presencia puede estar asociada a residuos de pintura que pueden observarse en el muro. Otra fase mineral asociada a pigmentos es el rutilo (TiO_2), que es un compuesto empleado en pinturas modernas para blancos (Silva, 2013). Esta fase fue observada en la zona A, en áreas de resistividad variables. En la zona C, también se encontró siderita ($FeCO_3$), que es un carbonato ferroso incorporado a la roca. Esta fase fue observada tanto en periodos de alta como baja humedad, en zonas de baja resistividad.

6. Conclusiones

La técnica de resistividad eléctrica demostró su utilidad para determinar patrones de distribución de sales en la superficie de los muros interiores de la Iglesia de San Roque, las cuales se relacionan con ciclos de hidratación/secado que varían estacionalmente. Durante el estudio se pudieron apreciar diferencias significativas en los valores de resistividad eléctrica del periodo lluviosos (mes de agosto), con respecto al inicio del periodo de estiaje (octubre y diciembre), lo que refleja una disminución de la disponibilidad de agua, lo que tiende a transformar a los muros del edificio en un medio más resistivo, el cual conlleva a una mayor presencia de sales.

El empleo de esta técnica también permitió inferir patrones de distribución de humedad en los muros del edificio, los cuales muestran expansión durante los periodos lluviosos, y tienden a contraerse al inicio de las temporadas de estiaje, cuando la menor disponibilidad de agua favorece los procesos de precipitación y cristalización de sales. Esto induce diversos procesos de deterioro, que afectan los muros del edificio.

En este sentido, el análisis mineralógico mediante DRX, permitió la caracterización de las fases minerales presentes en las sales, y al mismo tiempo, aproximar los procesos que las originan. Estos son consecuencia de la acción conjunta de agentes físicos y químicos del microambiente interior de la iglesia la iglesia de San Roque, la cual fue construida con materiales calizos que se componen principalmente de calcita, cuarzo y cristobalita. Estas y otras sales solubles identificadas en las zonas de medición, reflejan la existencia de un sistema salino que obedece a patrones de humectación y secado que dependen de la absorción de humedad por parte de los muros. La presencia de muchas de estas sales están asociadas a zonas de baja resistividad.

Finalmente, es importante resaltar que si bien la medición de resistividad eléctrica es una herramienta utilizada en estudios sobre el deterioro del patrimonio construido, su empleo en la región sureste del México

no está documentado, por lo que los resultados de esta contribución son inéditos, y demuestran su utilidad como una herramienta de evaluación, cuyo empleo sistemático puedes proporcionar valiosa información que facilite la toma de decisiones para el desarrollo de acciones de conservación del patrimonio construido en esta región del país.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto CONACYT LANCIC LN314846 y contó con el apoyo de la Red de Estudios Interdisciplinarios Sobre Medio Ambiente y Conservación del Patrimonio Mexicano. Se agradece también el apoyo del M. C. Carlos Huitz Baqueiro, del Centro INAH Campeche, y a la Diócesis de Campeche, por el apoyo prestado para la realización del estudio en la Iglesia de San Roque.

8. Referencias

- Arnold A., Zehnder K. (1991). Monitoring wall paintings affected by soluble salts, pp 104-116.
- Arnold, A., Zehnder, K. (1989). Salt weathering on monuments. *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari*, pp 31-58.
- Amoroso G., Fassina V. (1983). Stone Decay and Conservation Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection Materials Science Monographs. p. 1-216.
- Arnold, A. y Zehnder, K. (1989). Salt weathering on monuments. *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari*, pp 31-58.
- Cardell, C. (2003). Crystallization de sales en calcarenitas: aplicación al monasterio de San Jeronimo, Granada. (Tesis doctoral). Facultad de ciencias de la Universidad de Granada. 151-170.
- Castro, T., y Barbosa, A. (2013). Enfoque químico del deterioro y biodeterioro de rocas calcáreas conformantes de monumentos patrimoniales de importancia histórica y cultural. *Revista Luna Azul*; 36: 247-284. <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=321728584013>.
- Erhardt, D., Mecklenburg, M. (1994). Relative Humidity re-examined, en Preventive conservation. Practice, theory and research. *Preprints of the contributions to the Ottawa IIC Congress. Edicion de A. Roy y P. Smith*. Londres: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, pp. 32-38.
- Espinoza Yolanda (2013). Análisis del deterioro por cristalización de sales de materiales constituyentes de los mascarones de estuco policromado de la zona arqueológica de Edzná, Campeche, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche México pp.44-51.
- Franco, B., Gisbert, J., Navarro, P., Mateos, I. (2014). Deterioro de los materiales pétreos por sales: cinética del proceso, cartografía y métodos de extracción. *Conservación del patrimonio: evolución y nuevas perspectivas. Actas del primer congreso de GEIIC, Valencia*, pp. 287-293.
- Huitz, B.M. (2005). Fortificación de San Francisco de Campeche. Arquitectura, usos, arqueología y restauración. Diario de campo. Boletín interno de los investigadores del área de antropología pp.22-25.
- Silva-León I. (2013). *Efecto del entorno urbano en la degradación del baluarte de San Pedro*, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Campeche. Campeche, México.
- Sperling, C. H, Cooker, R. (1985). Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth surphace processes and landforms*. 10, 541-555.
- Taylor, R. M., McKenzie, R. M., & Norrish, K. (1964). The mineralogy and chemistry of manganese in some Australian soils: *Aust. J. Soil*, 2, pp. 235-248



PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO

Conservación del Patrimonio Inmueble de La Habana: Edificaciones del Malecón Habanero

C. Valdés¹, J. Contreras², R. Machado², A. Portero², A. Castañeda¹

¹Laboratorio de Protección de Materiales. Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación. Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC. La Habana, Cuba.

²Grupo de para Protección y Conservación del Patrimonio Cultural de la CUJAE. Dirección de Extensión Universitaria. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), La Habana, Cuba.

Autor de Contacto: ecilia.valdes@cnic.cu

Resumen

El diagnóstico organoléptico y analítico experimental desempeña un papel fundamental en la conservación y restauración del patrimonio edificado. El objetivo del presente trabajo es caracterizar los muros de las fachadas de algunas de las edificaciones del Malecón Tradicional habanero en cuanto a los agentes que intervienen en el deterioro de los mismos. Se realizó una caracterización ambiental y para el análisis de las distintas muestras extraídas de las edificaciones se emplearon técnicas analíticas. Se pudo clasificar la zona como costera-industrial-urbana. Se definen el material más resistente, así como algunas de las causas de los estados técnicos de los muros de las fachadas asociados a la influencia de los factores climáticos y contaminantes presentes en la zona.

Palabras clave: patrimonio; conservación; contaminantes; vulnerabilidad.

Abstract

Organoleptic diagnosis and experimental analytical play a fundamental role in the conservation and restoration of built heritage. The objective of this study is to characterize the walls of the facades of some buildings Traditional Havana Waterfront as for the agents involved in their deterioration. An environmental characterization was carried out and analytical techniques were used for the analysis of the different samples taken from the buildings. The area was classified as coastal-industrial-urban. The most resistant material is defined, as well as some of the causes of the technical states of the façade walls associated with the influence of climatic factors and pollutants present in the area.

Keywords: heritage; conservation; pollutants; vulnerability.

Resumo

O diagnóstico organoléptico e analítico experimental desempenha um papel fundamental na conservação e restauro do patrimônio edificado. O objetivo deste trabalho é caracterizar as paredes das fachadas de alguns edifícios do Tradicional Havana Malecón em termos dos agentes que intervêm na sua deterioração. Foi realizada uma caracterização ambiental e utilizadas técnicas analíticas para a análise das diferentes amostras retiradas dos edifícios. A área pode ser classificada como costeira-industrial-urbana. É definido o material mais resistente, bem como algumas das causas do estado técnico das paredes da fachada associadas à influência de fatores climáticos e poluentes presentes na área.

Palavras-chave: patrimônio; conservação; poluentes; vulnerabilidade.

1. Introducción

El rescate del patrimonio inmueble de La Habana, debe lidiar con los problemas ambientales de esta importante urbe. Se adiciona la vulnerabilidad por riesgos naturales en donde su accionar es más intenso debido al Cambio Climático (figura 1). En zonas clasificadas de elevada agresividad (Valdés *et al.*, 2019) como la del Malecón Tradicional habanero, existe un conjunto de edificaciones de distintos estilos arquitectónico en donde los factores antes mencionados ha influido en el deterioro, en ocasiones acelerado, de los mismos.

Vale señalar que las intervenciones constructivas para la rehabilitación o conservación de edificios realizadas, no siempre alcanzan los resultados esperados. Esta situación se agrava en las zonas consideradas de ambiente agresivo. Las edificaciones que se encuentran en ellas resultan las más deterioradas a pesar de las acciones constructivas realizadas, bien con materiales tradicionales o importados de última generación.

El trabajo que se presenta a continuación parte de anteriores investigaciones realizadas debido a la importancia de las características de agresividad ambiental que impactan a las edificaciones del Malecón Tradicional, y la poca durabilidad de las intervenciones constructivas efectuadas. Por lo tanto, el diagnóstico organoléptico y analítico experimental desempeña un papel fundamental en la rehabilitación y conservación del patrimonio inmueble.

El objetivo principal del estudio es caracterizar los muros de las fachadas de las edificaciones del Malecón Tradicional habanero en cuanto a los agentes que intervienen en el deterioro de los mismos. Los resultados de este trabajo permitirán que los procesos de inversión, restauración y conservación de edificaciones en zonas de elevada agresividad, se ejecuten con criterios de durabilidad y vida útil, optimizando así el uso de

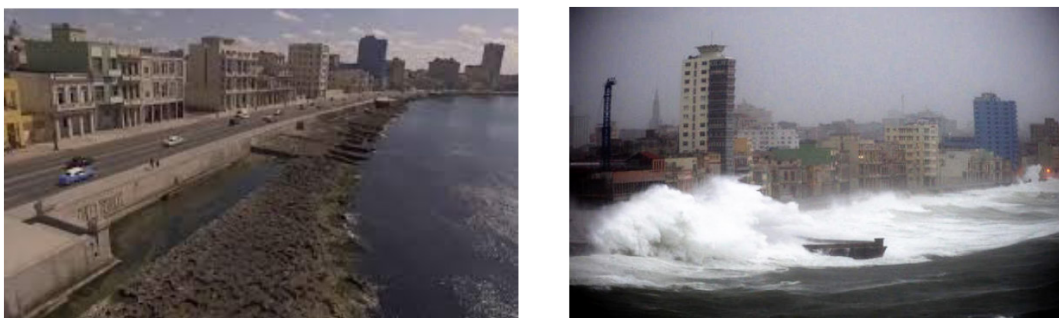


Figura 1. Malecón Tradicional: a) sin afectaciones por el embate de un fenómeno meteorológico b) azotado por los embates del huracán Irma (2017).

recursos para las funciones antes mencionadas. De esta manera, se satisfacen las necesidades y expectativas, en cuanto a calidad y durabilidad de los materiales que se utilicen.

1.1 Efectos directos de la contaminación sobre las edificaciones.

Influencia de las sales

El origen de las sales solubles en los edificios, en general, están determinadas por las presentes originalmente en los materiales de construcción, por las generadas en el metabolismo de organismos vivos, por depósito de producto atmosféricos, y por las procedentes del suelo. Las dos últimas, penetran en los poros del material a través de soluciones acuosas, como el agua de lluvia, el rocío, el vapor de agua condensado o aguas freáticas del subsuelo. Posteriormente, el agua se evapora, las sales cristalizan en el interior de los poros y capilares, generando presiones internas que pueden producir desprendimiento, delaminación, desmoronamiento y otros tipos de degradación en los materiales pétreos (Valdés, 2015).

Las sales solubles como los cloruros y los sulfatos, están presentes con mayor frecuencia sobre la superficie de las edificaciones que los carbonatos y nitratos, los nitritos aparecen en raras ocasiones. La fuente más frecuente de las sales de iones cloruro es el mar, pero también se generarán sales de sulfatos. El viento transporta y deposita estas sobre las superficies de los edificios. Sus concentraciones dependerán de la distancia del mar, de las variables meteorológicas y del efecto del apantallamiento natural o artificial (Valdés, 2015).

La cristalización de sales solubles en los materiales, se considera como uno de los mecanismos de deterioro más generalizado y destructivo. Sea cual fuere la procedencia de las sales, se ponen en movimiento por el agua y se acumulan en las zonas de evaporación.

2. Procedimiento experimental

2.1 Zona de estudio y toma de muestras

El estudio se efectuó en 7 edificaciones reales con diferentes usos, años de servicio y grados de deterioro, pero todas ubicadas a lo largo del frente costero conocido como “Malecón Tradicional” (comprendida entre Paseo del Prado y la calle Belascoaín). Esta franja pertenece a la Zona Priorizada para la Conservación del Centro Histórico de La Habana.

Los criterios de selección de las edificaciones fueron las siguientes:

- Todas las edificaciones tienen los muros exteriores considerados como las fachadas construidas con obras de fábrica de ladrillos, bloques de hormigón o piedra.
- Todas las edificaciones han sido intervenidas por el estado desde 1994.
- Todas las edificaciones tienen más de 10 años de servicio y han sido intervenidas al menos, en dos ocasiones con diversos materiales.
- Todas las edificaciones seleccionadas tienen diferente ubicación respecto a la situación en la manzana. Tres son medianeras y una está ubicada en esquina.

La toma de muestras fue realizada en las columnas y muros de las edificaciones seleccionadas.

2.2 Caracterización atmosférica

2.2.1 Variables climáticas

Los datos de temperatura, humedad relativa y flujo de viento (T, HR, V) utilizados proceden de la Estación Meteorológica del Instituto de Meteorología (INSMET), a 1 km al este del sector.

2.2.2 Deposición de contaminantes

La evaluación de la deposición de los contaminantes atmosféricos se realizó durante los 12 meses de estudio (marzo/2016 – febrero/2017) en cuatro edificios de la zona (sitios de exposición [S]).

- *Deposición de iones cloruro (DCl [mg/m^2d]).* Se realizó de acuerdo con la metodología establecida en la normativa ISO 9225:2012. Los dos captadores de paño seco se posicionaron en el soporte hacia la dirección noreste del viento con un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal. El cambio de captadores se realizó de manera mensual.
- *Deposición de compuestos de azufre o sales de iones sulfato ($DSOx$ - [mg/m^2d]).* Se ejecutó de acuerdo con las especificaciones establecidas en la normativa ISO 9225:2012. Los dos captadores de placa filtrante de celulosa fueron colocados con el mismo ángulo de inclinación.
- *Concentración de dióxido de nitrógeno ($c[NO_2]$ $\mu g/m^3$).* Captadores de difusión pasivos fueron empleados para coleccionar las muestras de NO_2 (Standard UNE 13528). Los tubos de difusión fueron colocados en forma vertical y protegidos de las precipitaciones.

2.3 Contaminantes en el material

- *Ensayo de Profundidad de Carbonatación (*In situ*).* Se realizó siguiendo la norma cubana (NC 355, 2004) en tres de las siete edificaciones. Este es un método basado en la reacción del indicador de pH, fenoltaleína (incoloro) cuando entra en contacto con sustancias con pH menor entre 8,2 y 9,8 se torna color magenta o rosado. Esta característica permite conocer el perfil de carbonatación del hormigón ya que indica el pH menor que 10.
- *Ensayo de concentración de Cloruros (Cl).* Recolección de las muestras se realizó empleando la norma (NC 344, 2005) en las siete edificaciones seleccionadas. La recolección se realiza *in situ* a una altura entre de 80 cm - 1 200 cm y a las profundidades normadas de 3 y 6 cm.

2.4 Técnicas y métodos de caracterización

- *Microscopía óptica con Luz polariza (*Petrografía*).* Permite caracterizar los agregados minerales y la morfología. El análisis mineralógico revela que tipos de substratos poseen las muestras que se analizan.
- Se realiza la caracterización de los materiales de las 7 edificaciones, a partir de 12 muestras con propiedades morfológicas diferentes. El análisis de este material fue realizado en un microscopio de luz polarizada tipo AXIO Lab. A1 de la ZEISS.
- *Microscopía electrónica de Barrido (*SEM*) con análisis de composición elemental del tipo EDS.* Se analizaron 8 muestras. Mediante este método se obtiene datos como: el tamaño de grano, la porosidad interna y las micro-fracturas. El equipo utilizado es un Microscopio de Barrido SEM HITACHI S-530 equipado con un detector de energía dispersiva (EDS). Microscopio de presión variable y bajo vacío (presión variable de 1-270 Pa). Este microscopio permite el estudio de las muestras sin ser recubiertas por un material conductor. Las condiciones de trabajo fueron: Distancia de trabajo de 7 mm, el voltaje de aceleración de 10 a 15 kV y la resolución de 50 μm 100 μm , 200 μm y 1 mm, en alto vacío.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización atmosférica.

3.1.1 Variables climáticas

Vale señalar que la zona de estudio en cuestión se encuentra muy próxima al mar, sin la presencia de apantallamiento artificial, por lo que recibe la influencia directa del aerosol marino.

Los valores promedios mensuales de HR, estuvieron por encima del 70 %, a tal punto que el valor promedio anual de la misma fue 75 %, lo que permite considerar la zona como de elevada HR. De esta forma, se garantiza que la deposición de las partículas de sales sea en forma de solución salina (acuosa) y no seca como cristales de sales (Norma ISO 9223:2012; Castañeda, 2018). Esta disolución penetra por los poros capilares del material acelerando de manera considerable el deterioro del mismo.

Con respecto a la temperatura de la atmósfera, se puede decir que es un factor principal, que influye en el incremento de la cinética del deterioro de los materiales. Los valores mensuales mayores se obtuvieron durante la temporada lluviosa (mayo-octubre). Lo más importante es el valor promedio anual el cual fue de 26.6 °C. Con este valor y los mensuales, se garantiza que las películas de agua líquida permanezcan un gran tiempo en la superficie de los materiales. Su incremento en el día, en presencia de una humedad relativa elevada (como es el caso), origina una rápida difusividad de los agentes agresivos presentes en la película de agua líquida depositada hacia la superficie del material.

Por último, la velocidad del flujo del viento. Cabe destacar que estos valores promedios mensuales fueron obtenidos de los valores mensuales en las direcciones desde el este-noreste hasta el norte, es decir, la fuerza y dirección del flujo de viento procedente desde el mar, la que arrastra los principales agentes agresivos: las sales de iones cloruro y sulfato procedentes del mar y transportadas en el aerosol marino, además de los compuestos de azufre procedentes de otras fuentes antropogénicas.

Los valores mayores fueron obtenidos en los meses de la temporada invernal (noviembre- abril), aunque el valor mayor fue obtenido en el mes de septiembre durante el verano. Lo más importante es el valor promedio anual obtenido (3.82 m/s²). Un valor promedio anual superior a 3 m/s es suficiente para garantizar no solo el origen y formación del aerosol marino en el litoral norte de La Habana sin condiciones de apantallamiento, sino también suficiente para garantizar la deposición de las sales de iones cloruro y valores elevados de humedad relativa (Castañeda, 2018a)

3.1.2 Deposición de contaminantes

Se destaca una diferencia marcada en cuanto al comportamiento de la deposición mensual de las sales de iones cloruro y compuestos de azufre durante el año de estudio. Esta diferencia se debe a que la fuente de procedencia de las sales de iones cloruro es el mar transportadas en el aerosol marino y depositadas posteriormente en el captador. Los valores medios mensuales mayores fueron obtenidos durante la época invernal, sobre todo, en el mes de marzo donde la deposición alcanzó un valor medio superior a los 900 mg/m²d. El valor promedio (mg/m²d) para cada sitio fue: S₁ = 42,6; S₂ = 173,3; S₃ = 56,5; S₄ = 82,8.

La mayor variabilidad de la deposición mensual de iones sulfato o compuestos de azufre se debe a que el mar no es la única fuente de procedencia de este peligroso agente agresivo. Otras fuentes en la zona de estudio están asociadas como son el tráfico intenso de automóviles, así como el potencial industrial ubicado al noreste de la zona de estudio. Otro aspecto importante a destacar es que las partículas de compuestos de

azufre, en este caso depositadas en forma de solución salina, al presentar un menor peso y tamaño, las mismas pueden recorrer y penetrar hasta grandes distancias. El valor promedio ($\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$) para cada sitio fue: $S_1 = 38,6$; $S_2 = 40,2$; $S_3 = 31,2$; $S_4 = 38,5$.

Con respecto a la concentración de NO_2 , este contaminante atmosférico es un indicador fundamental de la calidad de aire. Valores superiores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la calidad del aire es clasificada como deficiente (NC 111:2004). En los cuatro sitios de exposición existen valores mensuales que cumplen dicha condición. Este resultado se obtuvo en siete ocasiones durante la etapa de monitoreo.

El valor promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de este contaminante fue: $S_1 = 35,4$; $S_2 = 34,4$; $S_3 = 34,2$; $S_4 = 34,4$. Estos junto a los valores obtenidos de deposición de iones cloruro y sulfatos, permiten clasificar la atmósfera como costera-industrial-urbana (Norma ISO 9223:2012). Esta es una clasificación muy agresiva y favorable para que ocurra, de manera considerable, el deterioro de los materiales de las edificaciones emplazadas en la zona del Malecón Tradicional.

3.2 Contaminantes en el material

3.2.1 Ensayo de Profundidad de Carbonatación (*In situ*).

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12-14) del Hormigón por efecto del CO_2 . En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los álcalis (usualmente hidróxidos de calcio, sodio y potasio), neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10 (Durar, 1997).

El ensayo demuestra la presencia de CO_2 ambiental en el interior de los hormigones. Este ha producido la acidificación del material lo que condiciona la pérdida de la pasividad que protege al acero de refuerzo de la corrosión. Los frentes de carbonatación para la mayoría de las obras evaluadas se encuentran a una profundidad de 2 cm o 5 cm, posiblemente por las constantes del recubrimiento. En algunos casos la carbonatación cubre todo el material.

El frente de carbonatación es bastante avanzado independiente de la ubicación del inmueble y es una condición que presentan todas las edificaciones del área de estudio. De lo anterior, se estima que, si se mantienen las mismas condiciones ambientales, es muy probable que las obras nuevas de hormigón armado también sean afectadas por este fenómeno.

3.2.2 Ensayo de concentración de Cloruros (*Ct*).

A partir de los resultados obtenidos (figura 2) se demuestra la presencia de concentraciones excesivas de cloruro en la masa del hormigón. Según las normas Iberoamericana (Durar, 1997) la misma recomienda tomar como valor límite permisible 0,4% de cloruros totales con relación a la masa de cemento para las estructuras de hormigón armado.

Según los resultados todas las muestras superan el límite admisible para hormigones armados. Por tanto, según lo expuesto anteriormente, se estima que el acero de refuerzo es afectado producto de la corrosión de este contaminante. De acuerdo con el tipo de gráfica obtenido, en todos los casos los resultados demuestran que los cloruro provienen mayormente del exterior, ya sea producto del aerosol marino, o por las inundaciones costeras.

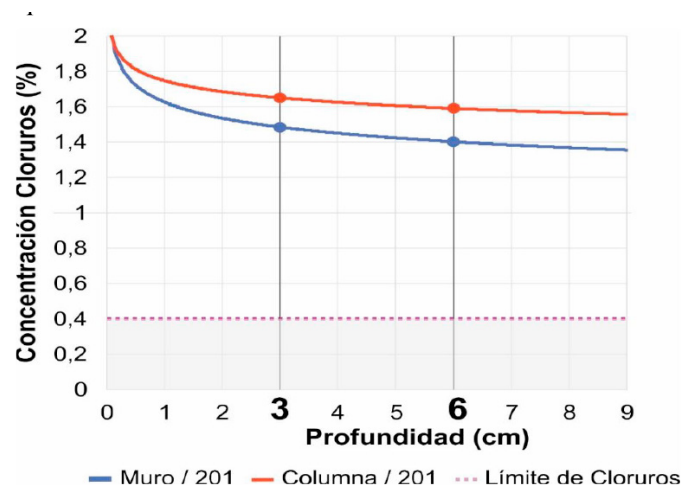


Figura 2. Grafica de la difusión de Cl- en las muestras obtenidas del sitio de exposición 2 (S2).

3.3 Técnicas y métodos de caracterización

3.3.1 Microscopía óptica con Luz polariza (Petrografía)

Las muestras de piedra se caracterizan por: una textura brechada. Fragmentos carbonatados de diversos tipos, esparíticos con abundante fauna y algunos granos de cuarzo con diferente grado de cristalización; fragmentos de roca volcánica 3% material con predominio de fragmentos carbonatados de bioclastos, esparíticos y micríticos.

- Hormigón del Recubrimiento y el Soporte: textura brechada; Compuesto por fragmentos calcáreos y de microfósiles. En esta muestra se observan las dos fases del material.
- Mortero del Soporte hormigón: textura brechada; Predominio de fragmentos carbonatados y material terrígeno de roca volcánica cuarzo biotita.

Soporte (ladrillo): textura arcillosa; Material fragmentario carbonatado de tamaño arenoso distribuido en toda la muestra con poco material cementante posiblemente por disolución de la arcilla.

Recubrimiento y el Soporte (ladrillo): textura brechada; Fragmentos de composición carbonatada con abundantes microorganismos en gran parte de ellos se encuentran bordeados por óxidos de hierro y es bastante poroso aproximadamente 10-15%.

Se destaca que el 85% de los materiales analizados, presentan una textura brechada, característica de conglomerados compuestos por más de un 50% de fragmentos angulares y la porción restante de material cementante arcilloso. Además, el material cementante tiene una granulometría muy fina. Por consiguiente, este es vulnerable a ser trasladado por flujos capilares dentro del material, provocando la disgregación en los fragmentos más compactos (Figura 3).

Otra particularidad es la presencia de fragmentos carbonatados, igualmente sensibles, al ser erosionados por aguas agresivas, que disolviendo partes del fragmento estimulan también la disgregación. Estos espacios interpartícula generan la red de poros, que una vez establecidos, son la vía de entrada de todos los contaminantes exteriores.

3.3.2 Microscopía electrónica de Barrido (SEM) con análisis de composición elemental del tipo EDS

Las muestras observadas a esta escala afirman algunas ideas que se han expuesto anteriormente, como es el caso de los cristales de cuarzo que se encuentran en las muestras de piedra.

En cuanto los materiales cerámicos, se distinguen perfectamente el exfoliado laminar, debido posiblemente a la diferencia que existe entre la hidratación producida por el agua dulce y el agua salada. Si el agua es dulce, la arcilla se expandirá aumentando su volumen, cuando esta se deseca de forma acelerada, la evaporación del agua producirá pequeñas fisuras. Pero en caso de que el agua de infiltración sea salada, en vez de hidratar la arcilla le sustrae por osmosis una parte del contenido de su agua constitutiva para reestablecer el equilibrio de salinidad. La consecuencia será una contracción todavía más acentuada, separando partes del material.

En los morteros, nuevamente se encuentran fósiles de origen marino, fragmentos orgánicos y e indicios de contaminación del mortero por partículas sintéticas. También se distingue por espacios de separación en la interface del recubrimiento con soporte, acompañados de abundantes poros en los dos materiales. En estos espacios se sospecha que es donde se produce la cristalización de las sales que disueltas penetran en el interior, induciendo al desprendimiento del recubrimiento.

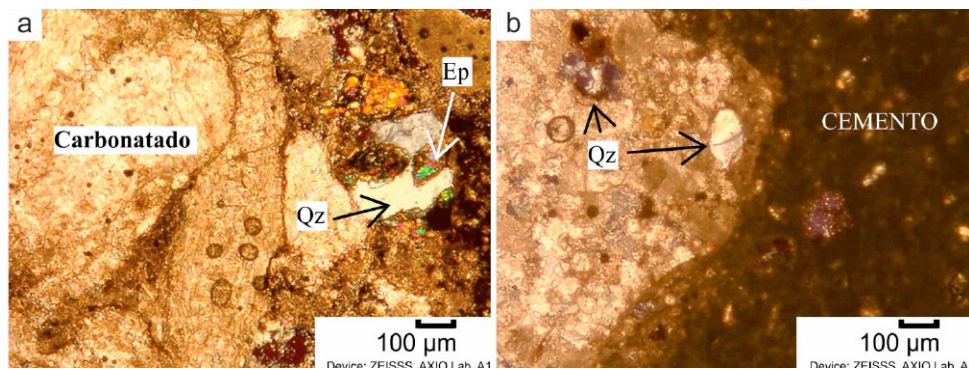


Figura 3. a) S1 material del soporte; b) S1 piedra.

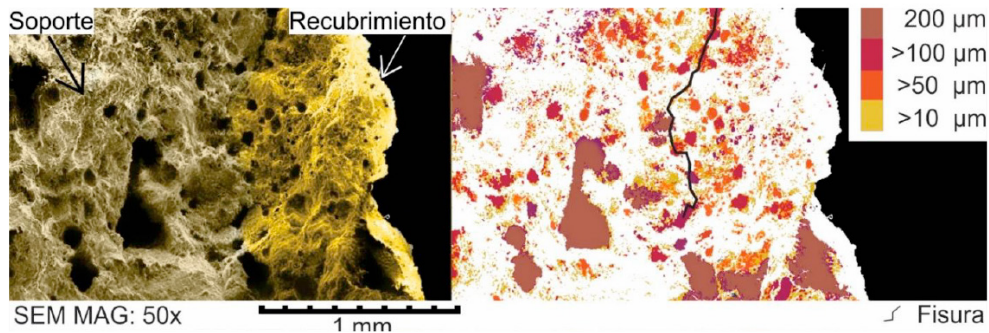


Figura 4. Soporte de piedra y mortero de recubrimiento.

El microanálisis con detector EDS arrojó como resultado que predominan, de manera general, los elementos químicos, Ca, Si, Mg. Mientras que los análisis puntuales y por zonas delimitadas durante el análisis, se identificaron además de los elementos ya mencionados, Na, Cl, S y Fe (muestras de ladrillo principalmente)

En el caso de los morteros se detectaron tanto en la superficie como a distintas profundidades, elementos químicos contaminantes como el Cl y S. Este resultado indica la formación de sales de cloruro y sulfato. Teniendo en cuenta las cantidades encontradas de estos elementos, se estima que es posible que no toda se haya formado en el lugar. Es decir que, es probable que el material se haya construido con materia prima ya contaminada.

4. Conclusiones

Se demostró que, al combinar el diagnóstico organoléptico con métodos experimentales y trabajo de campo, se obtienen las causas principales de los estados técnicos asociados a los muros de las fachadas de las edificaciones estudiadas en el Malecón Tradicional.

Se demuestra que las lesiones de las edificaciones están asociadas con los contaminantes atmosféricos presentes en el ambiente agresivo de la zona del Malecón Tradicional.

El ensayo de penetración de Cl⁻ demuestra que la difusión en los muros de fachada ocurre, mayormente, desde el exterior y no por ascensión capilar. Las causas más probables de ello son el aerosol marino y las inundaciones costeras.

De acuerdo con el tipo de atmósfera presente en la zona del Malecón Tradicional “costera-industrial-urbana” y los resultados obtenidos a través del examen organoléptico y analítico experimental, la piedra ofrece mayor resistencia al deterioro, mientras que los bloques de ladrillos cerámicos son más vulnerables a ser degradados.

Las indisciplinas en la ejecución de las acciones constructivas condicionan la poca durabilidad de los materiales. Pues se observa que no se tienen en cuenta la condición de zona de agresividad ambiental, ya que los materiales empleados no son los más adecuados, además de ser expuestos durante largos ciclos a la contaminación de los aerosoles.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los Organismos de Administración Central del Estado Cubano, Empresas, Institutos y Centros por brindarnos todo el apoyo logístico para la ejecución de este trabajo.

6. Referencias

- Broto, C. (2006). Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción. Barcelona, España: Stylish Ideas.
- Castañeda, A., Corvo, F., Howland, J. J., Marrero, R. (2018). Penetration of marine aerosol in a tropical coastal city: Havana. *Revista Atmósfera*, vol. 31, pp.87-104.
- Castañeda, A., Corvo, F., Valdés, C. (2018). Atmospheric corrosion study in a Harbor located in a tropical island. *Revista Material and Corrosion*. Vol. 69, No. 10, pp. 1472-1744.
- Durar. Red Temática XV. B: Durabilidad de las Armaduras. (1997). Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en armaduras de hormigón armado. (O. T. Rincón, A. R. Carruyo, C. Andrade, & P. H. Días, Edits.) Argentina, Brazil, Colombia, Cuba, España, México, Perú, Portugal, Uruguay, Venezuela.
- Fort, R. (2014). La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: medidas de prevención. Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM), Facultad de CC. Geológicas. Madrid: Research Gate.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

Norma Cubana 111:2004. Calidad del aire - Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos

Norma ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmosphere – Classification, determination and estimation.

Norma ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres.

Reyes, J., et.al. (2011). Influence of Air Pollution on Degradation of Historic Buildings at the Urban Tropical Atmosphere of San Francisco de Campeche City, México. Capítulo del Libro: Monitoring, Control and Effects of Air Pollution. Edited by Andrzej G. Chmielewski ISBN 978-953-307-526-6, pp. 202-226.

Standard UNE 13528. Part 3. Captadores difusivos para determinar concentración de gases y vapores.

Valdés, C., Castañeda, A., Corvo, F., Marrero, R., Montero, R. (2019). Atmospheric Corrosion Study of Carbon Steel in Havana Waterfront Zone. Springer Nature Switzerland AG 2020 F. Martirena et al. (eds.), Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete, RILEM Book series 22, pp. 329-337.

Valdés, C., Corvo, F., Mondeja, D., Marrero, R. (2015). Conservación del patrimonio en el Centro Histórico de la Habana Vieja: caso de estudio. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 46, Número Especial, pp. 72-80.



UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO

Cal de construcción para uso en restauración de monumentos históricos

E.G. Navarro-Mendoza¹, E.M. Alonso-Guzmán², A. Sánchez-Calvillo¹,
M.A. Navarrete-Seras², W. Martínez-Molina², H.L. Chávez-García²,
N. Díaz-González²

¹ Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

² Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: 0319470d@unimch.mx

Resumen

El objetivo de esta investigación es establecer una comparación de las propiedades de la cal apagada artesanalmente y la cal de construcción en polvo. Fueron realizados ensayos de resistividad eléctrica y resistencia mecánica, permitiendo valorar el desempeño de cada tipo de cal y su idoneidad en distintas aplicaciones constructivas. Los resultados demostraron que la cal de construcción tiene características muy similares a los morteros de cal apagada, por lo que su uso en trabajos de restauración sería perfectamente viable. Existe una idea entre algunos restauradores que la cal en polvo no es apta para dichos trabajos, sin embargo, las más recientes investigaciones han demostrado que no representa ningún riesgo en cuanto a la compatibilidad con materiales patrimoniales, además de ser económica y fácil de adquirir y utilizar.

Palabras clave: Cal apagada artesanalmente, cal de construcción, resistividad eléctrica, propiedades mecánicas, morteros de construcción.

Abstract

The objective of this research is to compare the properties between artisan slaked lime and construction lime. There were fulfilled electrical resistivity and mechanical strength tests, allowing to evaluate the performance of each lime and their suitability for different construction applications. The results showed that construction lime has very similar properties as slaked lime, being a perfect choice for restoration works. There is a common perception that powdered lime is not suitable for such jobs; nevertheless, the most recent researches indicate that this technique does not represent any risk regarding compatibility with heritage materials, besides being economic, easy to purchase and user-friendly.

Keywords: Artisanal slaked lime, construction lime, electrical resistivity, mechanical properties, construction mortars.

Resumo

O objetivo desta pesquisa é por meio de ensaios para verificar se a cal de construção possui características semelhantes à cal apagada artesanal e pode ser utilizada na restauração de edificações, por meio de ensaios de resistência elétrica para conhecer a porosidade da argamassa e a resistência mecânica. Os resultados mostraram que a cal de construção possui características semelhantes às argamassas de cal apagada. A ideia principal é retirar o mito de que a cal em pó não é adequada para tais trabalhos e podemos concluir que a cal de construção, sendo o hidróxido de cálcio, como a cal apagada, não representa nenhum risco em termos de incompatibilidade, além de ser fácil de usar, adquirir, econômico e fácil de usar.

Palavras-chave: Cal apagada artesanal, cal de construção, resistência à compressão, resistividade elétrica, argamassas de cal.

1. Introducción

La cal o hidróxido de calcio es uno de los principales cementantes que a lo largo de la historia contribuyeron en la edificación de estructuras, al ser un material con propiedades aglutinantes. En definición, “es el material resultante del proceso de calcinación de la piedra caliza tornando en óxido de calcio (conocido como cal viva), para posteriormente someterse a una hidratación transformándose en hidróxido de calcio (llamada cal apagada o cal hidratada)” (Navarro Mendoza *et al.*, 2019).

En México el rol cultural de la cal trasciende a la arquitectura e ingeniería, al encontrarse incluso en la misma alimentación elemental de la población mediante el proceso de la nixtamalización. Las sociedades prehispánicas la emplearon tanto en edificaciones como en infraestructuras logrando un desarrollo cultural destacable y un manejo de esta tecnología muy superior a otras civilizaciones contemporáneas. Tras la llegada de los españoles al continente americano, la cal continuó ejerciendo como uno de los materiales básicos de la edificación colonial (Guerrero, 2013), a pesar de las marcadas diferencias entre los sistemas constructivos europeos y locales.

Actualmente la cal ha perdido terreno en la construcción contra el cemento de albañilería, que se ha utilizado en los sistemas constructivos a partir del siglo XX, además de la aparición de productos nuevos, teniendo una gran gama de materiales a usar.

En el caso de la restauración la cal es el producto idóneo para su utilización, ya que es compatible con los materiales y sistemas constructivos con los que esta edificados, para ello se ha usado la cal apagada artesanalmente que consta de colocar cal viva (óxido de calcio) a artesas con agua hasta que se convierta en pasta y se deja reposar, la recomendación es que envejezca seis meses, este proceso es tardado y peligroso por su reacción exotérmica de la cal viva la contacto con el agua, pero algunos investigadores consideran que este proceso mejora sus características como “porosity, permeability, workability, plasticity, setting time and strength.” (Sickels-Taves y Alisopp, 2005).

Cabe destacar que, como cualquier proceso tecnológico, la producción de la cal ha evolucionado a lo largo de los siglos, destacando la invención de hornos mucho más sofisticados pudiendo lograr una eficiencia, pureza y capacidad de manufactura mucho mayor. Además, la producción de este material y otros derivados ha permitido mejorar muchas otras industrias además de la construcción (Fernández Aller, 2014), con el resultado de muchos tipos de cales incluidas las de alta pureza (Navarro-Mendoza *et al.*, 2020).

Uno de los tipos de cal más empleados es la cal en polvo para construcción, que es producto de la industrialización. Los fabricantes hidratan el óxido de calcio hasta su pulverización para después envasarse en

sacos de papel; este proceso de hidratación era por el que los restauradores dudaban que funcionara para la restauración, al considerarla con características inferiores.

En la actualidad la producción de cal tiene un mayor control ya que se utiliza la tecnología como parte del proceso, fabricando cal en polvo de distintos grados de pureza que pueda ser usada en distintas industrias. Hay que considerar que la cal de construcción de acuerdo a la NORMA –C-ONNCCCE-2010 debe tener un contenido mínimo de 75 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mientras que el óxido de calcio apagado artesanalmente que se utiliza en la restauración, no se garantiza un porcentaje mínimo requerido, al no existir normas actualizadas para los materiales a emplearse en la restauración, al emplear cal con control de calidad puede garantizarse su porcentaje de pureza, y las propiedades que de ella se derive. No es que exista una controversia irreconciliable entre los dos materiales de construcción, sólo que cada uno tiene sus propias bondades, ventajas y por supuesto desventajas. Especialmente cuando los trabajos de restauración a realizar cuentan con un mínimo de recursos económicos, técnicos, de manufactura, de espacio en la obra, y son de menor envergadura, podría emplearse cal de grado construcción, los resultados lo indican.

En los últimos años se han realizado importantes estudios acerca la cal apagada como material de restauración patrimonial, debido a la importante tradición del material en los sistemas constructivos y los aspectos ecológicos que presenta ante el uso del cemento y el concreto armado (Silva, *et al.*, 2015). En algunos casos, desde los mismos organismos a cargo del patrimonio mexicano, se recomienda una pequeña adición de cemento en la mezcla (alrededor del 2 al 10 %) como agregado a los morteros de cal; siendo un procedimiento muy común en las obras de restauración (Sámano Chong, 2019), aportando una mejora en los tiempos de fraguado y a los valores de resistencia mecánica.

2. Procedimiento

Para esta investigación se tomaron dos objetos de estudio: en primer lugar, cal apagada artesanalmente en proceso de hidratación (maceración) de dos años y medio; y por otro lado, cal de construcción en polvo industrializada, estas cales se produjeron en la calera de Jungapeo, Michoacán. Se realizaron morteros con una mezcla del aglutinante y arena volcánica de la región de Morelia, Michoacán, realizando especímenes cúbicos de $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$. Se utilizaron dos procedimientos para estos especímenes: en ensayo de resistividad eléctrica y el ensayo de compresión simple.

2.1 Resistividad eléctrica

Esta prueba es comúnmente usada para verificar el estado del concreto y los morteros de base cemento, por lo que utilizar proceso en morteros de cal nos puede aportar a conocer la porosidad por lo que sólo se toma la prueba de referencia. La resistividad eléctrica es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de energías eléctricas. (Andrade y Andrea, 2011), esta prueba se debe realizar con los especímenes saturados de agua para que esta ayude a conducir la electricidad, pues los geomateriales presentan comportamientos como los cerámicos aislantes.

La cal como material cementante, requiere del aire para comenzar con la carbonatación. Los especímenes no se sumergieron en agua en la pila de curado pues al no estar carbonatadas (estables termodinámicamente hablando) la cal es soluble en agua y las muestras se disuelven en el agua, se dejaron fraguar por 8 meses a la intemperie pero al interior del laboratorio para realizar la prueba y en virtud de que el material debe estar saturado, los especímenes cúbicos, posteriormente se colocaron en un recipiente plástico con tapa, con un tirante de 5 mm de agua asilados con una rejilla y se mantuvieron húmedos hasta que alcanzaran su peso

máximo saturado constante, este proceso llevó siete semanas, en las cuales cada tercer día se controlaba su peso y se mantenía constante la cantidad de agua dentro del recipiente.

Las pruebas se realizaron con el Resistómetro marca NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC. Modelo 400, número de serie N-4 -9932 (figura 1).

2.2. Compresión simple

El ensayo de compresión simple permite obtener una medida máxima de resistencia a una carga axial en especímenes endurecidos de matrices de materiales cerámicos como cal, cemento, yeso, rocas, etc. Para la restauración no se tienen normas específicas sobre el mínimo de resistencia ya que “la lentitud que caracteriza el fraguado de los morteros de cal permite que los edificios se vayan asentando conforme el terreno y la estructura lo requieren”.(Guerrero, 2013). Ya que los sistemas constructivos en su mayoría son de mampostería.

Para la prueba se utilizó la Máquina Universal de Pruebas TINIUS OLSEN (figura 2), con capacidad de 50 toneladas y aproximaciones a 1 Kg.



Figura 1. Prueba de resistividad eléctrica.



Figura 2. Máquina usada para la prueba.

3. Resultados

Los resultados de ambas pruebas en los especímenes preparados previamente permitieron establecer la comparación directa entre los dos tipos de cales. Cabe destacar que la prueba de resistividad eléctrica es un ensayo no destructivo, mientras que la compresión simple es una prueba destructiva; por lo que es muy importante realizarlas en el orden presentado, sobre todo si se trata de material patrimonial.

3.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica aporta datos sobre la composición interna del espécimen y su porosidad, “cuando mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen”(Andrade y Andrea, 2011), lo anterior aplica para materiales cerámicos naturales y artificiales como los que nos ocupan. Los datos adquiridos se muestran en la tabla 1.

3.2 Compresión simple

La prueba de compresión simple se realizó con especímenes de 100 días, los resultados de la prueba quedan reflejados en la tabla 2.

Al realizar las pruebas se pudo observar que la cal de construcción presentó la falla (figura 3), mientras que el espécimen de mortero de cal apagada artesanalmente colapsó mostrando un comportamiento frágil (figura 4).

Tabla 1. Resultados de la resistividad eléctrica en ohm por cm 100 días.

Tipo de cal	Ohm/cm
Cal de construcción	1533.07
Cal apagada artesanalmente	1061.06

Tabla 2. Resultados resistencia mecánica a especímenes de mortero en kg/cm².

Tipo de cal	kg/cm ²
Cal de construcción	18.44
Cal apagada artesanalmente	11.42



Figura 3. Mortero de cal de construcción.



Figura 4. Mortero de cal apagada artesanalmente.

4. Conclusiones

La cal apagada artesanalmente tiene excelentes características como trabajabilidad y adherencia pero presenta ciertos inconvenientes que otros productos podrían solucionar. Uno de los principales problemas es su obtención, ya que se debe invertir más en recursos, tiempo y mano de obra. En esta investigación se observó que la cal de construcción tiene menor porosidad y por lo tanto su resistencia a la compresión es mayor en comparación que la cal apagada en obra, también que puede ayudar a evitar humedad por capilaridad en los aplanados en los edificios patrimoniales.

Además, tomamos en cuenta que las dos al fin de cuentas son hidróxido de calcio solo cambia su proceso de hidratación, por lo que la cal de construcción puede ser utilizada para los trabajos de restauración con una dosificación correcta.

Los valores de cal de construcción fueron considerablemente más altos, del orden de un 50-60 %, lo cual supone una ventaja para muchos de los posibles usos del material, obviamente hablando de edades tempranas.

La resistencia mecánica es una de las propiedades esenciales para el diseño de cualquier elemento constructivo, sin embargo, en el caso de morteros históricos son otras las cualidades que más se buscan, como se comentó en la introducción. Estos morteros son materiales dinámicos, que interactúan con el ambiente del entorno tras el proceso de carbonatación (Elsen, 2006), por lo que es necesario continuar con la investigación de cara a comprender el proceso de envejecimiento de la cal de construcción como solución en acabados para obras de restauración.

En el avance presentado pudo comprobarse que todos los productos derivados de la cal cuentan con excelentes propiedades para los trabajos de construcción, motivo por el cual no puede descartarse el uso de una u otra tipología sin hacer un estudio previo del monumento a restaurar.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de los programas de becas nacionales para realizar esta investigación.

Agradecen también al equipo del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH por su apoyo en la realización de esta investigación.

6. Referencias

- Andrade, C., & Andrea, R. D. (Mayo-Agosto de 2011). La resistividad eléctrica como parametro del control del hormigón y de su durabilidad, *ALCONPAT*, 1(2), 90-98.
- Bedolla Arroyo, J. A. (Noviembre 2010). *Caracterización físico mecánica de los morteros de cal apagada. Propuesta de morteros según su uso y función ante los agentes de deterioro (Tesis de Doctorado en Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura)*. Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars - a review. *Cement and concrete research*, 36(8), 1416-1424. doi:-doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.006
- Fernández Aller, R. (2014). Preámbulo. Estructura de la producción de cal en España. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, *La cal. Investigación, patrimonio y restauración*. Sevilla, Spain: Universidad de Sevilla.

- Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. En L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La Cal. Historia, Propiedades y Usos* (págs. 49-72). Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A.C.
- Navarro, E. G., Sánchez, A., Bedolla, J. A., & Alonso, E. M. (2019). La cal de alta pureza, alternativa ecológica en los acabados de las construcciones. En F. A. Alonso Farrera, & F. J. Olgún Coca (Ed.), *XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT 2019, Vol. 2, PATOLOGÍA*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. doi:<https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V2PAT130>
- Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzmán, E. M., Ruvalcaba-Sil, J. L., Sánchez-Calvillo, A., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., . . . Borrego-Pérez, J. A. (2020). Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Mortars and Pastes, Elaborated with Slaked Lime and High Purity Hydrated Lime, for Restoration Works in México. *Key Engineering Materials*, 862, 51-55. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.51>
- Navarro-Mendoza, E. G., Bedolla-Arroyo, J. A., Sánchez-Calvillo, A., Alonso-Guzmán, E. M., Blancas-Herrera, V. H., Martínez-Molina, W., & Chávez-García, H. L. (2020). High Purity Lime as an Ecologic Alternative for Construction Mortars and Pastes. *Key Engineering Materials*, 841, 88-192. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.841.188>
- NORMA-C-003-ONNCE-2010. Industria de la construcción-Cal hidratada-Especificaciones y métodos de ensayo.
- Sámano Chong, M. (2019). Formulated lime mortars as a sustainable practice for Built Heritage conservation in Mexico. En J. I. Álvarez, J. M. Fernández, Í. Navarro, A. Durán, & R. Sirera (Ed.), *5th Historic Mortars Conference (19-21 June)* (págs. 1142-1155). Pamplona, Spain: RILEM Publications S.A.R.L.
- Sickels-Taves, L. B., & Alisopp, P. D. (2005). Lime and its place in the 21st century: Combining tradition, innovation, and science in building preservation. *Internacional Building Lime Symposium*, 9-11.
- Silva, B. A., Ferreira Pinto, A. P., & Gomes, A. (2015). Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Construction and Building Materials*, 94, 346-360. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.058>

• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Ensayos Semi y No Desturctivos





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



ENSAYOS SEMI Y NO DESTRUCTIVOS

Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y atenuación espacial con la resistencia a la compresión de concretos

V. A. Franco^{1*}, M. A. Maldonado¹, J. M. Mendoza², P. Montes³

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca

² Universidad Autónoma de Nuevo León, FIC

³ Grupo de Materiales y Construcción, CIIDIR-Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional

Autor de Contacto: francolujan_89@hotmail.com

Resumen

El objetivo de esta investigación fue correlacionar los parámetros de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos a partir de la onda P (VPU) y la atenuación espacial obtenida a partir de la onda S (*ass*) con la resistencia a la compresión del concreto. Se elaboraron especímenes cilíndricos, los cuales se curaron en una solución de Ca(OH)₂ durante 2500 días. Posteriormente, los cilindros fueron sometidos a la propagación de pulsos ultrasónicos para estimar la VPU y la *ass*, así como la RC. Los resultados mostraron una relación directamente proporcional entre la VPU y RC, mientras que la *ass* y RC presentaron una relación inversamente proporcional. Los resultados indican que la *ass* es un mejor predictor de la RC en concreto que la VPU.

Palabras clave: Pruebas no destructivas; parámetros ultrasónicos; resistencia a la compresión a largo plazo; concretos.

Abstract

The aim of this research was evaluating the relationship between both the ultrasonic pulse velocity obtained from the P-wave (UPV) and the spatial attenuation obtained from the S-wave (*ass*) versus the compressive strength of concrete (CS). Cylindrical specimens were manufactured and cured in a Ca(OH)₂ solution for 2500 days. After curing, the cylinders were tested by ultrasonic pulse propagation to estimate the UPVs and *ass*. Next, the CS of the specimens were estimated. The results showed a direct proportional relationship between the UPV and the CS, while the *as* and CS showed an inverse proportional relationship. It was found that the *ass* is a better predictor of the CS than the UPV.

Keywords: Non-destructive techniques; ultrasonic parameters; long-term compressive strength; concretes.

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a relação entre a velocidade de pulso ultrassônico obtida na onda P (UPV) e a atenuação espacial obtida na onda S (α_s) versus a resistência à compressão do concreto (CS). Amostras cilíndricas foram fabricadas e curadas em solução de Ca (OH) 2 por 2500 dias. Após a cura, os cilindros foram testados por propagação de pulso ultrassônico para estimar as UPVs e α_s . A seguir, foram estimados os CS dos espécimes. Os resultados mostraram uma relação proporcional direta entre a UPV e o CS, enquanto o α_s e o CS mostraram uma relação proporcional inversa. Verificou-se que o α_s é um melhor preditor do CS do que o UPV.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos; parâmetros ultrassônicos; resistência à compressão de longo prazo; concreto.

1. Introducción

El cemento Portland (CP) desde su descubrimiento hace más de 175 años se ha convertido en el aglutinante más ampliamente utilizado para la edificación de estructuras de concreto (EC). A pesar de que muchos aspectos del CP, tales como su manufactura, componentes e hidratación, han sido investigados ampliamente, aún existen incertidumbres sobre el potencial de algunas técnicas no destructivas para la caracterización de sus propiedades.

Es conocido que el comportamiento mecánico de las EC es uno de los principales aspectos a evaluar (Lian *et al.*, 2011). En este sentido, la prueba de resistencia a la compresión (RC) es usada como una medición de la calidad del concreto y se calcula con la carga a la fractura y el área de la sección transversal del espécimen utilizado (Al-Sahawneh, 2013). A pesar de su simplicidad, la prueba de RC es destructiva, requiriendo la extracción de corazones de concreto o la elaboración de una cantidad considerable de especímenes si se desea evaluar la RC de un concreto a largo plazo.

Una técnica no destructiva que ha sido utilizada para evaluar la RC de los materiales basados en CP es la propagación de pulsos ultrasónicos (PPU) (Fan *et al.*, 2012; Jain *et al.*, 2013). La PPU puede resultar ventajosa porque es una técnica no destructiva; no obstante, su confiabilidad aun es cuestionable. En este sentido, la propagación tanto de la onda ultrasónica de compresión (onda P) así como la onda ultrasónica de corte (onda S) puede proporcionar parámetros como la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y atenuación espacial (α_s) para la caracterización no destructiva de materiales basados en CP (Sharma y Mukherjee, 2014). Posteriormente, estos parámetros pueden correlacionarse con otras propiedades físicas y mecánicas para estudios más completos de las propiedades de los materiales manufacturados con CP (Philippidis y Aggelis, 2003; Benmeddour *et al.*, 2012).

Varios estudios han demostrado que la VPU de la onda P se puede utilizar para predecir la RC de concretos (Solís-Carcaño y Moreno, 2008; Jain *et al.*, 2013). Recientemente, se ha investigado el uso de parámetros ultrasónicos, calculados a partir de resultados de la onda P y la onda S, para estimar ciertas propiedades del concreto. Se encontró que la atenuación espacial estimada a partir de la onda P no es útil para predecir ciertas propiedades del concreto. De la misma manera, se encontró que la VPU estimada a partir de la onda S tampoco es un buen predictor tales propiedades (Franco-Lujan, 2020). Otros estudios sugieren que la atenuación espacial estimada a partir de la onda S (α_s) puede correlacionarse con la permeabilidad o la porosidad de los materiales elaborados con CP (Lafhaj *et al.*, 2006). En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue investigar de manera preliminar el uso de la α_s como un predictor de la resistencia del concreto.

2. Materiales y métodos

Para la preparación de la mezcla de concreto se utilizó cemento Portland compuesto (CPC-30R) con una gravedad específica de 2.94, el cual cumple los requerimientos de la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004. Además, se emplearon agregado triturado con un tamaño máximo de 19 mm y arena de río con un módulo de finura de 2.97. La mezcla de concreto se elaboró de acuerdo con el método de volúmenes absolutos del Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés). La mezcla fue preparada con una relación agua/cemento de 0.5 y diseñada para lograr un revenimiento de 75 ± 20 mm y una RC a 28 días de 25 ± 8 MPa. Con la mezcla de concreto se elaboraron tres especímenes cilíndricos de concreto de $\varnothing 100$ mm x 200 mm. Posteriormente, los cilindros fueron curados en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por 2500 días.

La resistencia a la compresión de los cilindros a 2500 días de edad se obtuvo de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M-20. La prueba de RC se realizó en una prensa hidráulica Instron® modelo 600DX-B1-C3-G1A. Pevio a la prueba de resistencia a la compresión, a los cilindros se les realizó pruebas de propagación de pulsos ultrasónicos como describe a continuación.

La prueba de propagación de pulsos ultrasónicos a los especímenes cilíndricos fue realizada en condición saturada. Para la prueba se emplearon dos pares de transductores Panametrics® de ondas P y S con una frecuencia de 50 kHz y 0,1 MHz, respectivamente. Para la generación de señales ultrasónicas y la adquisición de datos se utilizó un receptor-emisor de pulsos ultrasónicos 5058PR Olympus® y un osciloscopio de fósforo digital Tektronix® TDS 3014C, respectivamente. El emisor-receptor de señales ultrasónicas fue utilizado con los siguientes parámetros: una frecuencia de 50 Hz, una resistencia de 200Ω y un voltaje de 200 V. Se obtuvieron cinco señales de onda P y de onda S por cada cilindro. Posteriormente, se calcularon la velocidad del pulso ultrasónico de la onda P (VPU) y la atenuación espacial de la onda S (α_s) de acuerdo con el procedimiento propuesto por Martínez-Martínez *et al.* (2011).

3. Resultados y discusión

3.1 Resistencia a la compresión

La figura 1 muestra los resultados de RC de los especímenes cilíndricos de concreto a 2500 días de edad. Se puede observar que los tres especímenes obtuvieron una RC mayor a la de diseño, específicamente 1.65, 1.33 y 1.46 veces más para los especímenes 1, 2 y 3, respectivamente. El valor promedio de la RC fue de 37.05 MPa.

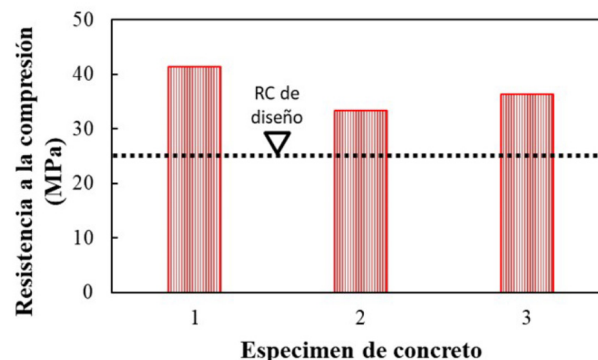


Figura 1. Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto a 2500 días.

Los resultados de RC obtenidos en esta investigación concuerdan con los reportados en otras investigaciones de RC a largo plazo. Cordeiro *et al.* (2018) reportaron valores de RC de 38 MPa para concretos de una edad de 3500 días, elaborados con una relación agua/cemento de 0.6 y una RC a 28 días de 25 MPa, similar a la RC de diseño de la presente investigación.

3.2 Resultados de pulsos ultrasónicos

Las figuras 2 y 3 muestran todas las señales obtenidas para los tres cilindros como resultado del tránsito de la onda P y de la onda S a través de la matriz de concreto, respectivamente. Los valores de VPU se obtuvieron como el cociente de la longitud del espécimen de concreto dividida entre el tiempo de tránsito de la onda P a través de dicho espécimen. El tiempo de tránsito se estima al inicio de la señal, los demás picos son reflexiones de la onda.

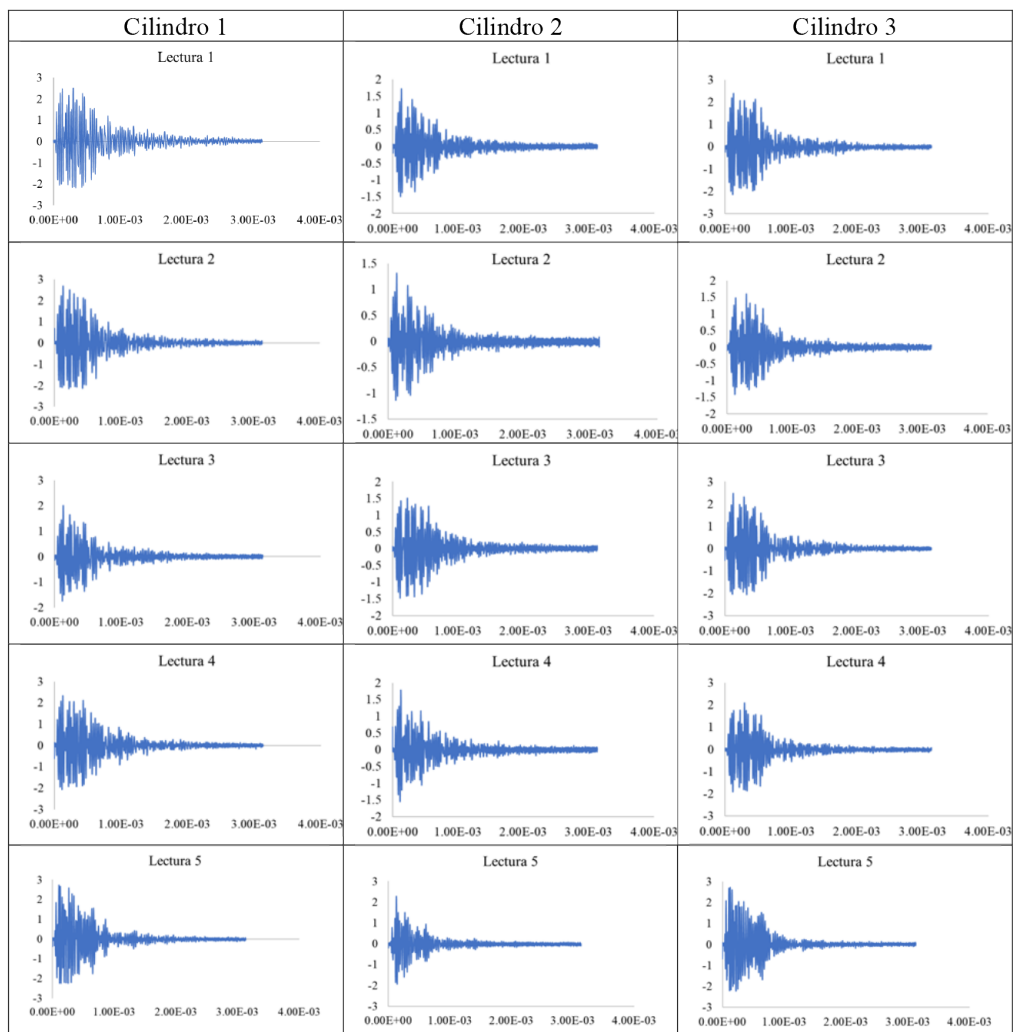


Figura 2. Resumen de señales obtenidas mediante el tránsito de la onda P en la matriz del concreto.

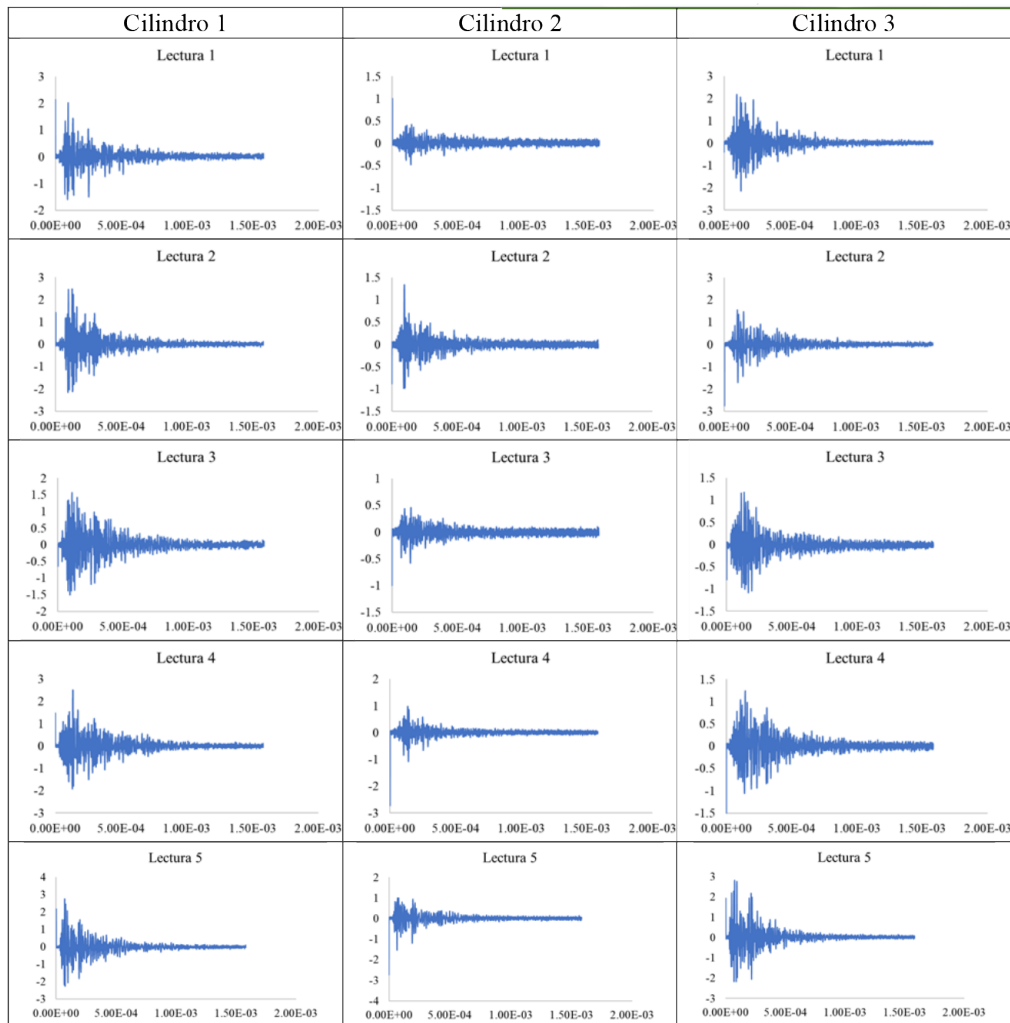


Figura 3. Resumen de señales obtenidas mediante el tránsito de la onda S en la matriz del concreto.

Por otra parte, la *uss* se basa en cuantificar la disminución de la amplitud de la señal entre dos puntos diferentes, y se obtiene dividiendo la amplitud original de la señal de entrada de la onda S entre la máxima amplitud registrada por las reflexiones dentro del material (Martínez-Martínez *et al.*, 2011). Como se mencionó anteriormente, estas señales fueron obtenidas antes de realizar la prueba de RC.

3.3 Velocidad de pulso ultrasónicos de los cilindros de concreto

Los resultados de los cinco valores de VPU estimados con las mediciones de la sección anterior se promediaron y se muestran en la figura 4. Se observa que aparentemente no existen diferencias entre los valores de VPU de los tres cilindros, y el análisis estadístico confirma que no hay diferencias estadísticamente significativas ($P=0.529$).

Diversas investigaciones (Demirboğa *et al.*, 2004; Shariq *et al.*, 2013) mencionan que un concreto de buena calidad debe de obtener un valor de VPU mayor a 4100 m/s. En este sentido, la media de los tres especímenes de concretos es estadísticamente mayores ($p < 0.05$) al valor propuesto por la literatura. Lo anterior concuerda con los resultados de RC, donde todos los especímenes mostraron valores de RC superiores a la de diseño.

3.4 Atenuación espacial de los cilindros de concreto

La figura 5 ilustra los resultados de atenuación espacial de la onda S (α_s) de los especímenes de concreto a 2500 días de edad. Se puede observar que los tres cilindros de concreto presentan valores entre 7.0 y 7.5 dB/cm. El análisis estadístico de los resultados muestra que tampoco hay diferencias significativas entre las α_s de los tres cilindros. A diferencia de la VPU, la atenuación de una señal ultrasónica en concretos ha sido poco investigada. Philippidis y Aggelis, (2005) reportaron que un concreto de una relación agua/cemento de 0.45 y una edad de 900 días presentó una atenuación de 4 dB/cm; sin embargo, dicha atenuación fue reportada para la onda P.

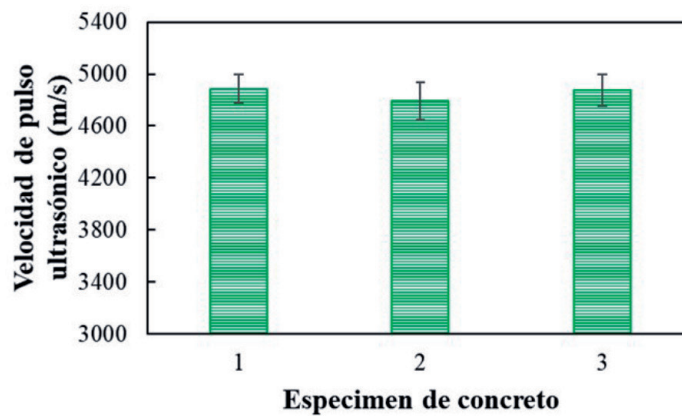


Figura 4. Velocidad de pulso ultrasónico de los especímenes de concreto a 2500 de edad.

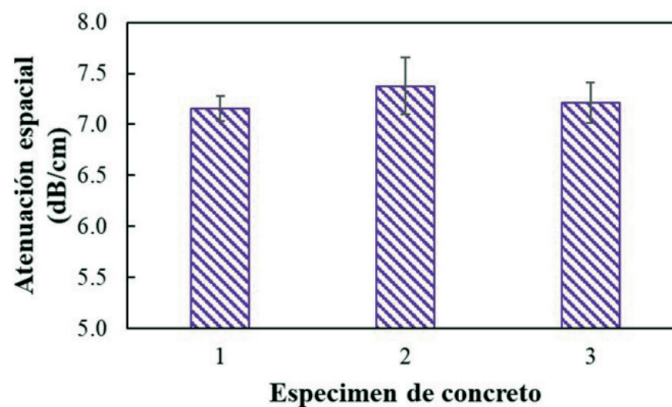


Figura 5. Atenuación espacial de los cilindros de concreto a 2500 días de edad.

Por otra parte, es conocido que una señal ultrasónica experimenta una atenuación como consecuencia de la absorción y dispersión del medio donde se propaga (Gaydecki *et al.*, 1992). Los resultados de las pruebas ultrasónicas demuestran que los cilindros se prepararon, curaron y

acondicionaron adecuadamente; por cual, los matrices cementantes son homogéneas y las correlaciones entre los parámetros ultrasónicos y la RC serán confiables.

3.5. Correlaciones entre parámetros ultrasónicos y RC de los cilindros de concreto

La correlación entre la VPU y la RC de los especímenes de concreto se muestra en la figura 6. En general se puede observar que los datos se ajustan a un modelo lineal con coeficiente de correlación de $R=0.86$. La relación entre variables es directamente proporcional, es decir, conforme se incrementa la VPU también incrementa la RC de los concretos estudiados. Este tipo de relación también ha sido reportado por otros investigadores (Demirboğa *et al.*, 2004). Es conocido que la propagación de una señal ultrasónica es influenciada por la microestructura de un concreto; y cuando la microestructura presenta un mayor número de discontinuidades, fisuras y grietas, el tiempo de recorrido de la señal ultrasónica será mayor y, por consiguiente, su velocidad disminuirá. Además, si existen discontinuidades en la matriz cementante la RC de un concreto también disminuirá (Lian *et al.*, 2011 y Chen *et al.*, 2013).

En cuanto a la correlación entre α_{ss} y RC, los datos se pueden ajustar también a un modelo lineal con una relación inversamente proporcional, es decir, conforme disminuye la α_{ss} la RC de los especímenes incrementa. En este caso el coeficiente de correlación es notablemente más alto que en la correlación anterior, con un valor de $R=0.92$. Lo anterior concuerda con lo reportado en la literatura, donde en materiales con altos valores de RC sus α_{ss} son bajas (Boadu, 1997). La relación inversamente proporcional entre la α_{ss} y RC puede ser debido a que la atenuación de una señal ultrasónica incrementa en un medio con mayores discontinuidades, fisuras y poros (Ju *et al.*, 2007). En consecuencia, a causa de estas discontinuidades la RC de un concreto puede decrecer (Chen *et al.*, 2013).

A pesar de la relevancia de los resultados, los cuales indican que la α_{ss} es un mejor predictor de la RC del concreto que la VPU, es importante mencionar que en esta investigación se utilizó un número pequeño de especímenes y una sola mezcla de concreto. Investigaciones futuras deberán considerar un mayor número de especímenes y mezclas que contengan adiciones minerales.

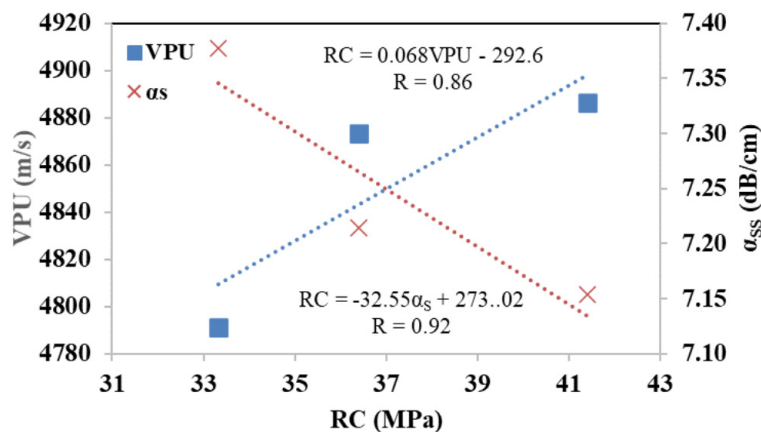


Figura 6. Correlación entre VPU y α_{ss} con la resistencia a la compresión del concreto en estudio.

4. Conclusiones

Con base en los resultados de la presente investigación se concluye que la atenuación espacial, la cual se obtiene de una señal de pulso ultrasónico de la onda S, es un mejor predictor de la resistencia a la compresión de una matriz de concreto que la velocidad de pulso ultrasónico.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por las facilidades y el apoyo financiero brindado para esta investigación. Además, los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por uso de las instalaciones y equipo para las pruebas de resistencia a la compresión.

6. Referencias

- Al-Sahawneh, E. I. (2013). Size effect and strength correction factors for normal weight concrete specimens under uniaxial compression stress. *Contemporary Engineering Sciences*, 6(1–4), 57–68. <https://doi.org/10.12988/ces.2013.13006>
- ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294–4298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- Benmeddour, F., Villain, G., Abraham, O., & Choinska, M. (2012). Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair. *Construction and Building Materials*, 37, 934–942. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.038>
- Boadu, F. K. (1997). Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, 37(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00008-6)
- Fan, Y., Hu, Z., & Liu, J. (2012). Ultrasonic measurement of corrosion depth development in concrete exposed to acidic environment. *International Journal of Corrosion*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/749185>
- Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>
- Cordeiro, G. C., Paiva, O. A., Toledo Filho, R. D., Fairbairn, E. M. R., & Tavares, L. M. (2018). Long-Term Compressive Behavior of Concretes with Sugarcane Bagasse Ash as a Supplementary Cementitious Material. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(2), 20160316. <https://doi.org/10.1520/jte20160316>
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., & Karakoç, M. B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2329–2336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- Franco-Luján V.A. Efecto de la corrosión por ión cloruro en las propiedades mecánicas de acero de refuerzo embebido en concretos ternarios CP-CV-CBC. Tesis Doctoral. CIIDIR Oaxaca, IPN. Septiembre 2020; 172 pág.
- Gaydecki, P. A., Burdekin, F. M., Damaj, W., & John, D. G. (1992). The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete: A signal analytical approach. *Measurement Science and Technology*, 3(1), 126–134. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/3/1/018>
- Jain, A., Kathuria, A., Kumar, A., Verma, Y., & Murari, K. (2013). Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. *Procedia Engineering*, 54, 241–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.022>

- Ju, Y., Sudak, L., & Xie, H. (2007). Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 44(13), 4256–4271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ij-solstr.2006.11.015>
- Lian, C., Zhuge, Y., & Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., & Kaczmarek, M. (2006). Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 625–633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., & García-del-Cura, M. A. (2011). Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Engineering Geology*, 119(3–4), 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.002>
- ONNCCE, S. (2004). NMX-C-414-ONNCCE-2004.
- Philippidis, T. P., & Aggelis, D. G. (2003). An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(4), 525–538. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00999-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00999-7)
- Philippidis, T. P., & Aggelis, D. G. (2005). Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 43(7), 584–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>
- Shariq, M., Prasad, J., & Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 40, 944–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070>
- Sharma, S., & Mukherjee, A. (2014). Ultrasonic guided waves for monitoring the setting process of concretes with varying workabilities. *Construction and Building Materials*, 72, 358–366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.018>

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



ENSAYOS SEMI Y NO DESTRUCTIVOS

Análisis del estado de conservación de estelas prehispánicas intemperizadas de roca caliza de Campeche y Yucatán mediante la técnica de transmisión de ultrasonidos

K. J. Pérez Ostos^{1,2}, Responsable: J. Reyes Trujeque¹,
S. N. Fajardo Reyes¹, M. R. Domínguez Carrasco³

¹ Laboratorio Nacional de Ciencias Para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural
Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

² Maestría en Ciencia y Preservación de Materiales, Universidad Autónoma de Campeche.

³ Laboratorio Nacional de Ciencias Para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural
Centro de Investigaciones Históricas y Sociales, Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto:

Resumen

En la Península de Yucatán, existen numerosas estelas prehispánicas de incalculable valor patrimonial elaboradas con roca caliza, que contienen registros de hechos históricos, políticos, sociales y religiosos de la cultura Maya. En muchas ocasiones, estas piezas se encuentran en sitios arqueológicos expuestas al aire libre, bajo condiciones climáticas potencialmente agresivas que inducen severo deterioro ambiental, lo que pone en riesgo su pervivencia a largo plazo. A tal razón, resulta necesario el desarrollo de protocolos de diagnóstico empleando métodos de evaluación no destructivos que permitan establecer su estado de conservación y desarrollar estrategias de conservación preventiva y correctiva. Esta contribución presenta resultados inéditos de un estudio realizado en estelas prehispánicas localizadas en sitios arqueológicos de Campeche y Yucatán, mediante el uso del método de transmisión de ultrasonidos. Los resultados permitieron establecer variaciones en la condición de deterioro de las piezas estudiadas, que pueden relacionarse con las condiciones exposición y la susceptibilidad propia de las rocas a sufrir cambios en su estructura interna.

Palabras clave: Métodos no destructivos, deterioro ambiental, estelas prehispánicas, roca caliza.

Abstract

In the Yucatan Peninsula, there are numerous pre-Hispanic stelae of incalculable patrimonial value made of limestone, which contain records of historical, political, social and religious events of the Mayan culture. On many occasions, these pieces are found in archaeological sites exposed to the open air, under

potentially aggressive climatic conditions that induce severe environmental deterioration, putting their long-term survival at risk. For this reason, it is necessary to develop diagnostic protocols using non-destructive evaluation methods that allow us to establish their state of conservation and develop preventive and corrective conservation strategies. This contribution presents unpublished results of a study conducted on pre-Hispanic stelae located in archaeological sites of Campeche and Yucatan, using the method of ultrasound transmission. The results allowed establishing variations in the condition of deterioration of the studied pieces, which can be related to the exposure conditions and the own susceptibility of rocks to suffer changes in their internal structure.

Keywords: Non-destructive methods, environmental deterioration, pre-Hispanic stelae, limestone.

1. Introducción

Debido entre otras cosas a su valor patrimonial, el mantenimiento sostenible, la conservación y la rehabilitación del patrimonio cultural construido, y en particular de los sitios y estructuras históricas, elaboradas con materiales pétreos requieren del empleo de técnicas de evaluación no destructivas para estimar su capacidad de resistencia al ambiente, además de diagnosticar y medir diferencias en sus propiedades físicas y mecánicas. Aunque existen una gran variedad de técnicas analíticas disponibles, que pueden usarse en el campo de la protección del patrimonio cultural construido, las dificultades asociadas con la accesibilidad y el muestreo destructivo irreversible en los monumentos no permiten el uso extensivo de tales herramientas de evaluación, además de la imposibilidad de llevar las piezas al laboratorio, como ocurre en el caso de las estelas prehispánicas de gran volumen y peso. Resulta pues de interés, el desarrollo de protocolos de medición que empleen técnicas de diagnóstico no destructivas y no invasivas para el estudio de los cambios que ocurren en la roca ante los procesos de intemperización, así como de características portátiles (Moropoulou *et al.*, 2005; Parent *et al.*, 20015; Corkum *et al.*, 2018).

Sin embargo, las investigaciones y desarrollos de análisis de datos asociados han mejorado su utilidad y hoy en día son una herramienta indispensable en el desarrollo de estrategias para la protección del patrimonio cultural basadas en la caracterización de materiales, la detección de su desgaste y degradación, la evaluación de la efectividad de las intervenciones, así como también para la evaluación de materiales compatibles y aplicaciones de procesos de restauración (Moropoulou *et al.*, 2005, Coombes *et al.*, 2013).

Entre estos métodos se tiene la transmisión de ultrasonidos, que se basa en el fenómeno físico de la propagación de ondas a través de un medio material. La técnica de propagación de pulso ultrasónico consiste, básicamente, en la medición del tiempo que emplea el impulso en recorrer la distancia comprendida entre un transductor emisor y un transductor receptor, acoplados al material que se está ensayando.

La aplicación de esta técnica no provoca cambios permanentes en las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, por lo que se considera un método de evaluación no destructivo. Por otra parte la velocidad de pulso ultrasónico también es útil para determinar la calidad de un material pétreo y su estado de conservación, además es una técnica de evaluación portátil, lo que lo hace ideal para estudios en el patrimonio construido (Barbera *et al.*, 2012; Fort, 2008 y 2012).

En la Península de Yucatán, se tienen numerosos vestigios arqueológicos pertenecientes a la Cultura Maya, construidos con piedra caliza. Ejemplo de esto lo constituyen numerosas estelas con registros epigráficos, dinteles, columnas, y esculturas pétreas que contienen valiosa información sobre la cultura de los pueblos originarios de la región maya. Estas estructuras se encuentran en un entorno ambiental agresivo, en el cual, la gran disponibilidad de agua origina reacciones químicas que modifican las propiedades fisicomecánicas de la piedra e inducen su deterioro, sin que hasta el momento se hallan desarrollado estudios sistemáticos que permitan evaluar su estado de deterioro empleando métodos de evaluación no destructivos.



Figura 1. Estelas prehispánicas del sitio arqueológico de Oxpemul, dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Campeche), expuestas a un entorno húmedo tropical que causa su deterioro.

Esta contribución presenta resultados inéditos de un estudio realizado en estelas prehispánicas localizadas en sitios arqueológicos de Campeche y Yucatán, mediante el uso del método de transmisión de ultrasonidos. Con esto se busca generar información de primera mano que permita establecer su estado de conservación y los efectos de su exposición a largo plazo a las condiciones ambientales del trópico húmedo ante las cuales se encuentran, con miras al desarrollo de futuras estrategias de conservación.

2. Procedimiento experimental

2.1. Ubicación del estudio y selección de las muestras

La figura 2, muestra la ubicación de los sitios arqueológicos donde se encuentran las piezas que fueron estudiadas, estos fueron los Sitios Arqueológicos (SA) de Sihó (1 estela) y Oxpemul (11 estelas), las zonas arqueológicas (ZA) de Mayapán (3 dinteles, 1 escultura) y Chichén Itzá (2 esculturas, 9 bloques de una

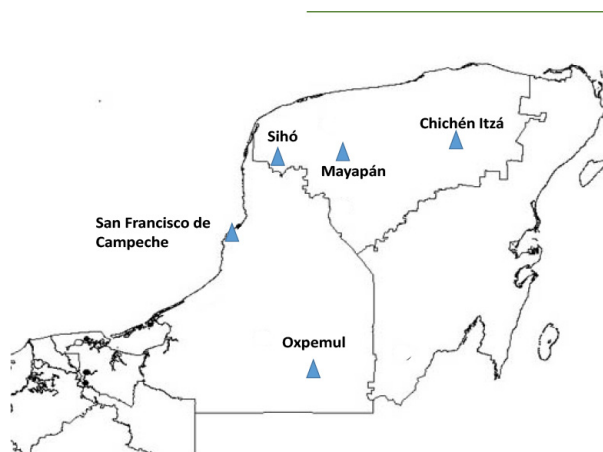


Figura 2. Mapa de ubicación de los sitios en los cuales se encuentran las estelas prehispánicas objetos de este estudio.

columna) y en el Museo de Cultura Maya (MCM) de San Francisco de Campeche (2 estelas), para un total de 30 piezas (figura 3).

2.2. Medición de pulso ultrasónico

El análisis de ultrasonidos se realizó con un equipo PUNDIT PL 200 (PROCEQ) que contaba con transductores de contacto seco de 54 KHz, operando a una longitud de onda de 68.5 mm, en modo de transmisión directa. Cuando esto no era posible, se realizaban mediciones indirectas. Se midieron como parámetros característicos: Velocidad de pulso ultrasónico (V_0) y tiempo de Transmisión (T_0).

Para la evaluación de discontinuidades se obtuvieron mapas de área, a través de los cuales se interpretaron cambios en la velocidad de transmisión de ultrasonidos, lo que pudo relacionarse con los procesos de deterioro y el grado de calidad del material pétreo que conformaba las piezas estudiadas. Los mapas de transmisión de V_0 , se procesaron mediante el software PL-Link.

El mapeo se realizó trazando una retícula con cuadros de 15 x 15 cm que ocupaban el área superficial de izquierda a derecha de la pieza, siguiendo el esquema mostrado en la figura 4. Las mediciones se realizaron sistemáticamente, partiendo desde la parte inferior a la superior y de derecha a izquierda.



Figura 3. Ejemplo de las estructuras analizadas durante el estudio. a) Estelas prehispánicas de Oxpepul, b) dinteles de la puerta de acceso del Edificio de los Nichos Pintados de Mayapán, c) Estela del Museo de la Cultura Maya de San Francisco de Campeche, d) escultura de serpiente de la Subestructura de los Guerreros de Chichén Itzá, e) escultura de cabeza de serpiente del Juego de Pelota de Chichén Itzá, f) estela prehispánica de Sihó.

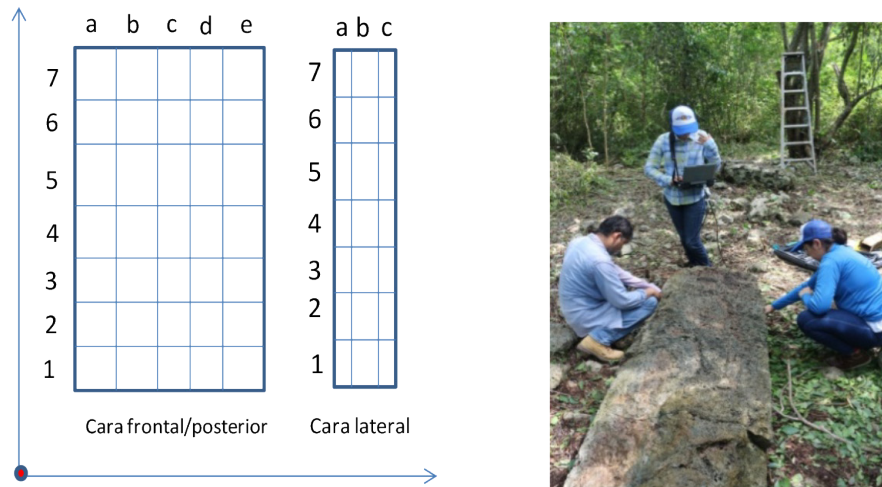


Figura 4. Esquema seguido para la medición de los parámetros de transmisión de pulso ultrasónico y medición de V_0 mediante transmisión directa.

3. Resultados y discusión

3.1 Medidas de transmisión de ultrasonidos

La velocidad de transmisión de ultrasonidos (V_0), es un parámetro físico que usualmente se emplea para determinar la calidad de los materiales pétreos (Fort, 2012; Vasanelli *et al.*, 2013). Sus usos en estudios de conservación de estructuras históricas permiten evaluar la evolución de los procesos de deterioro, y medir cambios de esta propiedad a lo largo del tiempo (Barbera *et al.*, 2012). Esto es posible debido a que, al hacer incidir un tren de ondas de ultrasonido a través de una estructura de volumen definido, la medición de su tiempo o velocidad de transmisión varía en función de las características del medio que atraviesan. En el caso de los materiales pétreos, esto depende de su densidad, porosidad, textura, composición mineral entre otros (Rodríguez *et al.*, 2011; Vasanelli *et al.*, 2013; Parent *et al.*, 2015). La tabla 1, muestra valores de V_0 en rangos inferior y superior de diferentes tipos litológicos usados en construcción.

Tabla 1. Valores de V_0 en rangos inferior y superior de diferentes tipos litológicos usados en construcción (Modificado de Fort, 2008).

Roca	V_0 inferior (m/s)	V_0 superior (m/s)
Granito	3000	5000
Basalto	4500	6500
Arenisca	1400	4000
Caliza	2500	6000
Mármol	3500	6000
Cuarcita	5000	6500
Pizarra	3500	5500

Con el paso del tiempo, los materiales intemperizados sufren alteraciones químicas que modifican sus propiedades físicas, con lo que disminuye su comportamiento mecánico. La técnica de ultrasonido permite evaluar estas modificaciones pues con el incremento del deterioro interno de la estructura, la velocidad de transmisión de ultrasonidos disminuye (Barbera *et al.*, 2012; Parent *et al.*, 2015 Vasanelli *et al.*, 2013).

La tabla 2, muestra los valores máximo mínimo y promedio de V_0 obtenidos en el conjunto de estelas analizadas. En ella se puede observar que el valor promedio fue de 2113.6, mientras que el máximo y el mínimo fueron de 12793.1 y 190.0 respectivamente, estos últimos de las estelas del Museo de la Cultura Maya de San Francisco de Campeche.

Las estelas de Oxpemul presentaron un valor promedio de velocidad de transmisión de ultrasonidos de 1312.7, con un máximo de 7874 y mínimo de 244.0 m/s. Por su parte, la estela de Sihó mostró registro promedio de V_0 de 1312.7, con máximo de 4672.0 y mínimo de 1113.3 m/s. En Mayapán se registraron valores promedio de V_0 de 1856.1 m/s, con máximo de 3076.2 y mínimo de 464.0. Por su parte en Chichén Itzá, el registro máximo fue de 3446.2, con mínimo de 797.3 y promedio de 2214.2 m/s. Respecto a las estelas del Museo de Arqueología Maya de Campeche, se presentaron V_0 promedio de 3407.5 con un máximo de 12793.1 y mínimo de 190.0 m/s.

En términos generales, la degradación de una estructura pétreo depende en gran medida de sus condiciones de exposición, siendo menor en espacios cerrados que en espacios al aire libre (Corvo *et al.*, 2010; Freire-Lista *et al.*, 2012). La figura 5, corresponde a un gráfico comparativo de los valores promedio de V_0 de todas las piezas analizadas durante este estudio, en ella se puede apreciar menor velocidad de transmisión de ultrasonidos en las estelas del sitio arqueológico de Oxpemul, cuyas condiciones húmedo-tropicales influyen fuertemente en la degradación de la roca.

Esta menor V_0 está relacionada con un mayor daño del material. Cambios de temperatura y de humedad, hacia condiciones ambientales menos agresivas, como las observados en sitios como Sihó, Chichén Itzá y Mayapán, así como la naturaleza de las rocas usadas para la fabricación de estelas y dinteles favorecen un mejor comportamiento ante el medio ambiente, así como la conservación de sus propiedades originales (Pérez-Ostos, 2020).

En estos lugares, los valores de velocidad de transmisión de ultrasonidos son mayores en las piezas que se encuentran protegidas de la intemperie, como ocurre en la Subestructura de Guerreros, y en menor medida en la estela de Mayapán, que cuentan con una cubierta protectora. Se puede observar una disminución en los valores de V_0 , en los dinteles del Templo de los Nichos Pintados, los cuales presentan mayor exposición a la intemperie.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la velocidad de propagación de ultrasonidos en estelas y dinteles de los sitios de estudio.

Sitio	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Conjunto de datos	190.0	12793.1	2113.6	1812.1
SA Oxpemul	244.0	7874.0	1312.7	904.6
MCM Campeche	190.0	12793.1	3407.5	158.0
ZA Chichén Itzá	797.3	3446.2	2214.2	746.8
ZA Mayapán	464.0	3076.2	1856.1	863.2
SA Sihó	1113.3	4672.0	1312.7	904.6

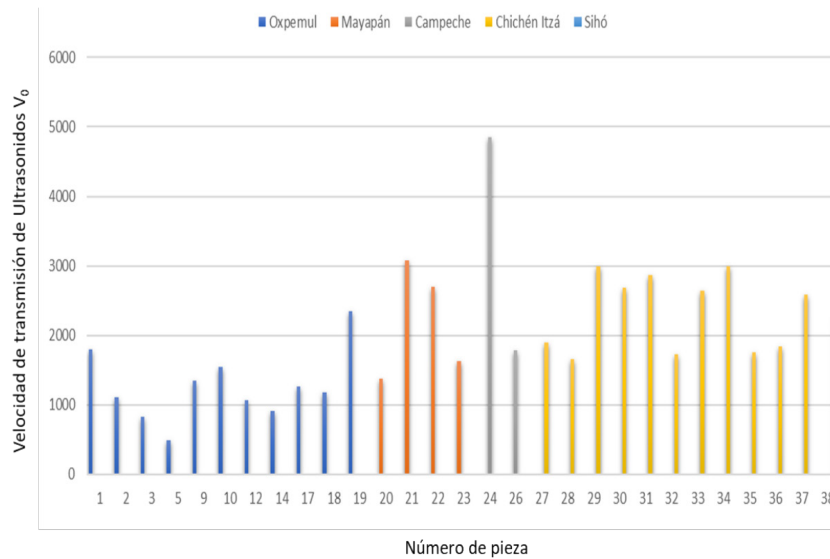


Figura 5. Velocidades de transmisión de ultrasonidos, V₀ (m/s) de estelas, dinteles y esculturas analizadas durante este estudio.

En Campeche, las estelas del Museo de Arqueología Maya, mostraron valores elevados de V₀, en especial el caso de la estela 20, lo que refiere un buen estado de conservación, como lo indica el hecho de que el valor de V₀ registrado en esta pieza se encuentra entre los límites inferior y superior de los tipos litológicos mostrados en la tabla 1. Mención aparte merece la estela de Sihó, la cual, a pesar de encontrarse expuesto a la intemperie, presenta altos valores de V₀, lo que es indicador de su buen estado de conservación, comparable, incluso con aquellas piezas que se encuentran en espacios cerrados como las de la Subestructura de los Guerreros. Por otra parte, las propiedades de transmisión de ultrasonidos pueden ser utilizadas para establecer correlaciones entre parámetros como V₀ y tiempo de transmisión (T₀), que son relaciones funcionales que permiten eventualmente, predecir el comportamiento de los materiales pétreos, o relacionar estos parámetros con comportamientos similares (Parent *et al.*, 2015). Considerando la anterior, con los datos de las mediciones de ultrasonidos realizados en las piezas de Oxpemul, Campeche, Chichén Itzá, Mayapán y Sihó se generó el gráfico de correlación mostrado en la figura 6.

El modelo de regresión obtenido, con coeficiente de correlación R, de 0.7315, permite explicar el comportamiento lineal de V₀ y T₀ en las diferentes piezas analizadas. En el gráfico, se puede apreciar que las muestras de Oxpemul se dispersan alrededor de la línea de regresión, ocupando la porción más baja de la gráfica. Esto responde a la menor calidad que en la actualidad presentan los materiales calizos usados para su elaboración, como consecuencias de los severos procesos de degradación originados por los agentes ambientales prevalecientes en este sitio arqueológico, pues fenómenos como cristalización de sales en su interior y absorción de humedad tienden a disminuir la velocidad de transmisión de ultrasonidos (Barbera, *et al.*, 2012).

En la misma gráfica, se pueden observar dos cúmulos de datos. Los de la zona alta incluyen las estelas del museo de la Cultura Maya y dinteles de Mayapán, en apariencia mejor conservadas que las de Chichen Itzá, que se concentran en el centro de la gráfica. En oposición a esto la mayor dispersión de los datos de

Oxpemul, indican mayor variabilidad en su condición de calidad, variabilidad que puedes ser causada por un mayor grado de degradación.

3.2 Mapas de distribución de ultrasonidos

Como complemento a este trabajo, la técnica de evaluación de ultrasonidos permite diagnosticar el estado de conservación interior de un material. La naturaleza de la medición, mediante la cual un tren de ondas atraviesa la pieza bajo estudio permite determinar las heterogeneidades que retardan la recepción de la señal y la posición dentro de la pieza en la que este retardo ocurre (Vasanelli, 2013). Esto puede señalarse en mapas de áreas de distribución de daños, lo cuáles constituyen un registro real de la condición interna de la pieza.

Los mapas de transmisión de ultrasonidos destacan en tonos de color las diferentes velocidades de propagación de ondas ultrasónicas que atravesaban las piezas. De esta manera, siguiendo criterios como el que indica que, una disminución de V_0 señala puntos de las estructuras con heterogeneidades que pueden estar asociadas a procesos de deterioro. Estos mapas se generaron en algunas piezas de Oxpemul, Mayapán, Chichén Itzá y Sihó (figuras 7-11).

El mapa correspondiente a la estela 2 de Oxpemul (figura 7, muestra valores de V_0 por debajo de 2000 m/s, en todos los puntos de medición de la estela. Este indica un material de baja calidad, que se encuentra por debajo del valor mínimo reportados para litotipos calizos (tabla 1).

El mapa de esta estela muestra que las zonas de mayor daño (por debajo de 500 m/s) están localizadas en la base, el centro y en la parte superior de la estela. Mientras tanto, a pesar de que en la zona media se observa incremento de V_0 de hasta 700 m/s, aún siguen siendo bajos como para que la roca sea considerada como un material de buena calidad.

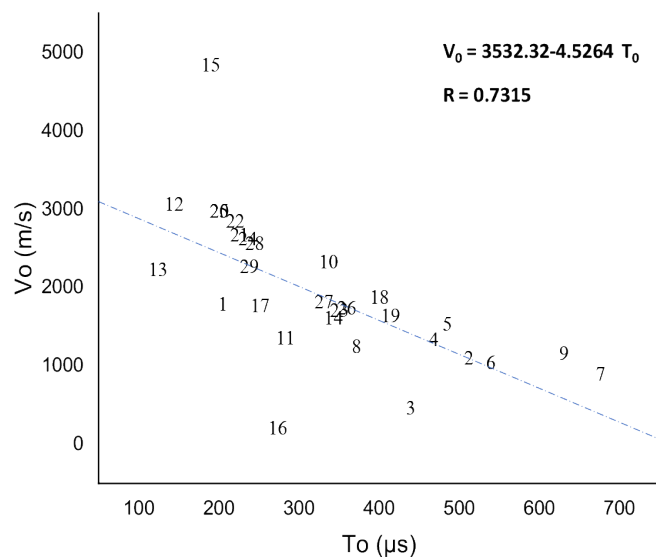


Figura 6. Correlación ente V_0 y T_0 del conjunto de estelas y dinteles estudiados con el método de propagación de ultrasonidos.

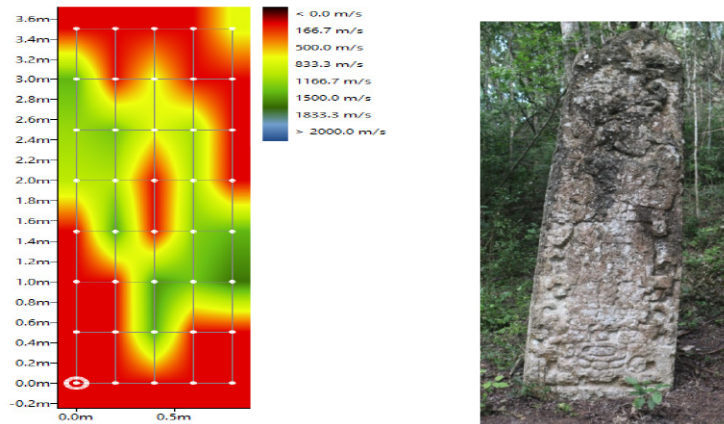


Figura 7. Mapa de velocidad de transmisión de ultrasonidos de la estela 2 del sitio arqueológico de Oxpekul.

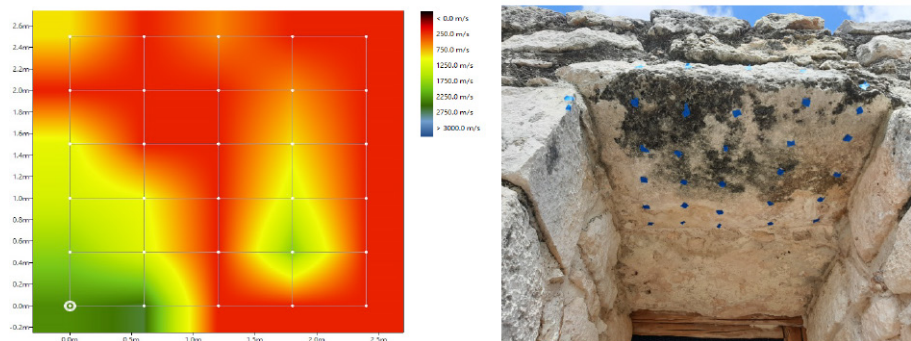
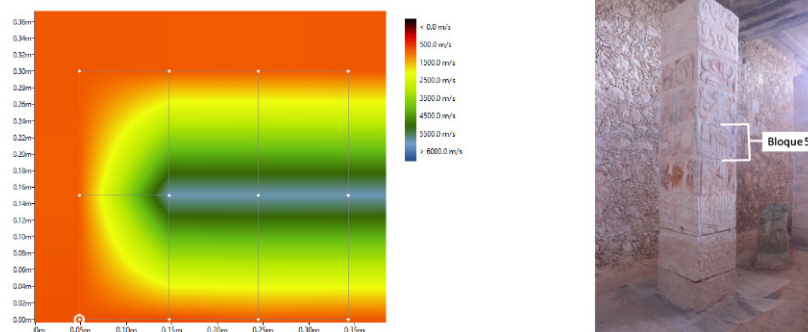


Figura 8. Mapa de velocidad de transmisión de ultrasonidos del dintel 22 (Templo de los Nichos Pintados de la Zona Arqueológica de Mayapán).



Figuras 9. Mapa de velocidad de transmisión de ultrasonidos el bloque 5 del Pilar Número 8 de la Subestructura de los Guerreros de Chichén Itzá.

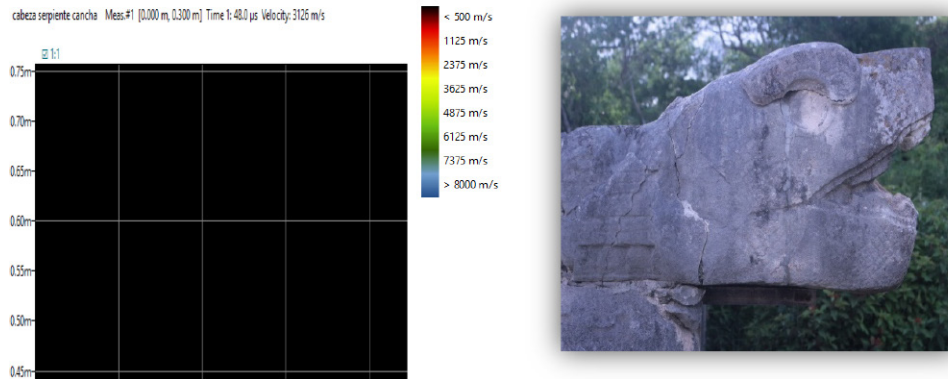


Figura 10. Mapa de velocidad de transmisión de ultrasonidos en la cabeza de serpiente del Juego de Pelota de Chichén Itzá.

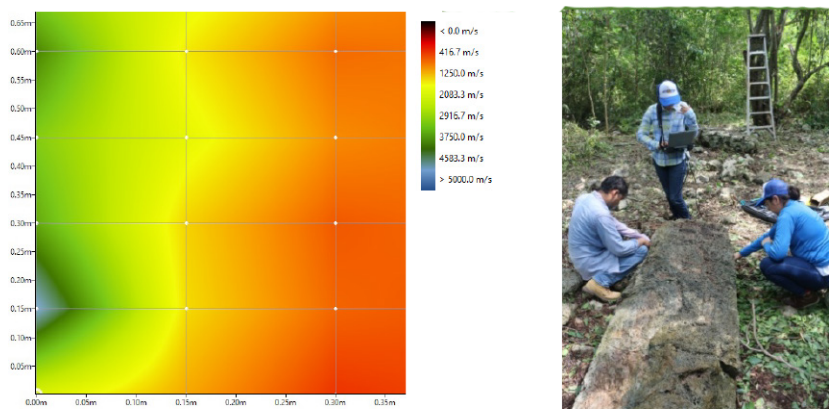


Figura 11. Mapa de velocidad de transmisión de ultrasonidos de la estela del sitio arqueológico de Sihó.

El dintel 22, del Templo de los Nichos Pintados, muestra valores de V_0 por debajo de los 2250, que también es un valor por debajo de los rangos de calizas de buena calidad estimados entre 2600 y 6000 m/s (figura 8). Aunque los registros mayores se limitan a la esquina inferior izquierda, pues la mayor parte de la estructura muestra valores de transmisión menores de 700 m/s, por lo que la roca de este dintel se considera de mala calidad.

El mapa de correspondiente al bloque 5 del pilar Número 8 (figura 9), muestra una zona central que tiende a valores de V_0 mayores a 6000 m/s, disminuyen hacia los extremos hasta alcanzar alrededor de 1500 m/s, observándose menor V_0 en los bordes del bloque. En este sentido queda claro que las zonas en contacto con el ambiente se encuentran sensibilizadas y con mayor grado de daño, mientras que, en términos generales, su calidad es buena.

La escultura de cabeza de serpiente, que se encuentra en Chichén Itzá, presentó rango de V_0 de entre cercanos 2000, considerado dentro del límite de calidad que le corresponde a su capacidad de transmitir

ultrasonidos. En el mapa se puede observar que las áreas de mayor daño se presentaron en la base de la escultura, y los valores de velocidad de transmisión de ultrasonidos tienden a incrementarse hacia la parte superior, con valores cercanos a 5000 m/s (figura 10).

En el caso de la estela de Sihó, ésta muestra un rango de V_0 de entre 900 y 5000 m/s. El grado de daño se incrementa generalizadamente de izquierda (donde se encuentran los valores mínimos) hacia la derecha, aunque los valores máximos solo se observan hacia el extremo de derecho de la estela (Figura 11), por lo que su calidad puede ser considerada, en general baja.

4. Conclusiones

La técnica de medición de pulso ultrasónico es un método de evaluación no destructivo y portable que puede emplearse para evaluar la calidad de un material pétreo, y que, bajo diferentes condiciones ambientales, permite realizar mediciones in situ. Lo anterior lo convierte en un método ideal para el diagnóstico del estado de conservación de estructuras construidas con materiales pétreos.

Su utilidad quedó demostrada en este estudio en el cual permitió evaluar estelas, esculturas y dinteles prehispánicos mayas en cinco sitios de la Península de Yucatán. Los datos resultan inéditos para esta región del país, en la cual existen muchas estructuras arqueológicas expuestas al aire libre, sin que se desarrollen estudios sistemáticos para evaluar su estado de conservación.

Los resultados de este estudio permitieron concluir que, entre las piezas estudiadas, las estelas de Oxpe-mul, presentaron una mayor dispersión y menores valores de V_0 , lo que indica una baja calidad de materiales pétreos, lo que seguramente es causado por las condiciones de exposición tan agresivas de la selva húmeda tropical dentro de la cual se encuentran.

En este sentido, las piezas que se encuentran en espacios interiores o bajo alguna cubierta protectora, tienden a presentar rangos de V_0 mayores, que se relaciona con un mejor estado de conservación. Mención aparte merece la estela de Sihó, la cual, a pesar de encontrarse expuesta a la intemperie, en un entorno húmedo tropical, presenta altos valores de V_0 , lo que indica que un estado deterioro no solo depende de la acción ambiental, sino que también, está condicionado por las propiedades minerales y fisicomecánicas del material pétreo.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Red de estudios Interdisciplinarios Sobre Medio Ambiente y Conservación del Patrimonio Mexicano (SES-PRODEP) y contó con el apoyo del Proyecto CONACYT 279740 LANCIC-Consolidación y de los Centros INAH Campeche y Yucatán, a través de la M. C. Claudia Elena Escalante Díaz y de la Dra. Claudia García Solís.

6. Referencias

- García Solís, C., Escalante, M. F., Jáidar Benavides, Y. (2018). Subproyecto: Contexto pictórico de la Subestructura de Guerreros en Chichén Itzá: Problemática y propuesta de conservación. Informe Técnico. Centro INAH-Yucatán.
- Moropoulou A, D. E. (2013). Integrated diagnostics using advanced in situ measuring technology. In: Proceedings of the 10th international conference on durability of building materials and components. Elsevier, 1111.
- Parent, T., Domede, N, Sellier, A., Mouatt, L. (2015). Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 70, 149-156.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



- Fort González, R. (2012). La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. Madrid: Programa Geomateriales.
- Reyes, J. Corvo, F., Cobo, J., Quintana, P., Bartolo, P., Pérez. T., Casanova, E. (2016). Weathering effects of an historic Building in San Francisco de Campeche, México. *Intervención*. 13, 22-31.
- Sprajc, I. (2008) Reconocimiento Arqueológico en el sureste del estado de Campeche, México: 1996-2005. Paris Monographs in American Archeology 19, Eric Taladoire Ed. BAR Internacional series 1742. England
- Vasanelli, E., Sieo M., Calia A., Aiello M. A. (2013). Non destructive techniques to assess mechanical and physical properties of soft calcarenitic stones. *Procedia Chemistry* (2013). 35-44.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Corrosión de Estructuras de Concreto





CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Espectroscopia de impedancia electroquímica aplicada a la evaluación de un sistema acero – concreto ternario (CBCA – CV)

A.E. Landa-Gómez¹, G. Fajardo-San Miguel², R. Orozco-Cruz³, R. Galván-Martínez³

¹ Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana

² Facultad de ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

³ Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana

Autor de Contacto: aldolanda12@gmail.com

Resumen

En la presente investigación se utiliza la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) para evaluar los mecanismos de corrosión en sistemas acero-concreto ternarios. Los sistemas fueron elaborados con acero al carbono (AC) y acero galvanizado (AG), los cuales fueron embebidos en concretos con relación $a/c = 0.45$, con sustitución parcial de cemento portland ordinario (CPO 40) en 10, 20 y 30 % por materiales suplementarios. De acuerdo con el análisis cuantitativo de los espectros de EIE, mediante la simulación de circuitos eléctricos equivalentes (CEE), se obtiene que la capacitancia de la doble capa electroquímica (Cdc) de los AC y AG embebidos en el concreto 30SF disminuye el 60 % y 33 % respectivamente, con respecto a los aceros en el concreto REF.

Palabras clave: Corrosión; Técnicas electroquímicas; Impedancia; Concretos ternarios.

Abstract

In the present investigation the technique of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) is used to evaluate the corrosion mechanisms in steel-concrete ternary systems. The systems were manufactured with carbon steel (CS) and galvanized steel (GS), which were embedded in concrete in relation to $a/c = 0.45$, with partial replacement of ordinary portland cement (OPC 40) by 10, 20 and 30% by supplementary materials. According to the quantitative analysis of IEE spectra, by simulating equivalent electrical circuits (EEC), it is obtained that the capacitance of the electrochemical double layer (Cdl) of the CS and GS embedded in the concrete 30SF decreases 60% and 33% respectively, with respect to steels in concrete REF.

Keywords: Corrosion; Electrochemical Techniques; Impedance; Ternary concrete.

Resumo

Na presente investigação, a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) é utilizada para avaliar os mecanismos de corrosão em sistemas de aço-concreto ternários. Os sistemas foram feitos de aço carbono (AC) e aço galvanizado (AG), que foram embebidos em concreto em relação ao $c/c = 0,45$, com substituição parcial do cimento portland ordinário (CPO 40) por 10, 20 e 30% por materiais suplementares. De acordo com a análise quantitativa do espectro do IEE, através da simulação de circuitos elétricos equivalentes (CEE), obtém-se que a capacidade da dupla capa eletroquímica (Cdc) do AC e AG embutida no concreto 30SF diminui 60% e 33% respectivamente, com respeito aos aços em concreto REF.

Palavras chave: Corrosão; Técnicas eletroquímicas; Impedância; Concreto Ternário.

1. Introducción

Las estructuras de concreto reforzado (ECR) han satisfecho las necesidades de la construcción desde hace varias décadas, sin embargo, la comunidad científica ha sometido a este material a diversos experimentos para aumentar su durabilidad, debido a que, siendo un material con propiedades físicas y mecánicas aceptables, puede desarrollar problemas patológicos cuando interactúa con el medio donde fueron construidas (Castro-Borges *et al.*, 2017).

El principal problema patológico de las ECR es la corrosión del acero, el cual es un fenómeno de origen electroquímico que sucede después de la despasivación de las barras de refuerzo (Elsener y Rossi, 2018). La degradación del sistema acero-concreto, aumenta con la presencia de iones despasivantes como los cloruros (Cl⁻) que se pueden encontrar en grandes concentraciones cerca de mares y océanos (Abd El Fattah *et al.*, 2018; Hu, Deng *et al.*, 2018).

El gran impacto económico por corrosión en ECR es relevante, un estudio realizado por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE, por sus siglas en inglés) en 2010, estimó costos por corrosión de 2.5 Billones de dólares, lo que equivale a un 3.4 del PIB del país (NACE, 2010).

Actualmente el reto para disminuir dicha problemática es muy extenso, existen reportes con métodos de prevención directos como el uso de aceros con alta resistencia a la corrosión (Luo *et al.*, 2018), aceros galvanizados (Rivera-Corral *et al.*, 2017) y protección catódica (Selvaraj *et al.*, 2009). Pero hay también métodos de prevención indirectos, como sustituciones y adiciones de materiales suplementarios (Franco-Luján *et al.*, 2019), y recientemente el uso de nanopartículas (Cruz-Moreno *et al.*, 2020; Landa-Gómez *et al.*, 2019).

Para un análisis complejo del fenómeno de corrosión en los sistemas acero-concreto se ha utilizado la técnica electroquímica de impedancia electroquímica (EIE), consiste en aplicar una señal alterna de pequeña amplitud (10-20 mV) al acero de refuerzo (usado como electrodo de trabajo) embebido en el concreto, en un rango de frecuencia seleccionada. La perturbación inicial es un potencial de perturbación sinusoidal (ΔE), que debe imponerse en condiciones de estado estable dentro del sistema, y la respuesta del electrodo es una corriente sinusoidal (ΔI) con una diferencia de fase (Φ) de la señal aplicada. Por lo tanto, la impedancia, representada por Z , mide la relación entre ΔE y ΔI (Ribeiro y Abrantes, 2016).

En la técnica de EIE principalmente se realizan dos tipos de análisis, el primero es un análisis cualitativo que permite conocer los mecanismo de corrosión presente en el sistema; el segundo es un análisis cuantitativo que se lleva a cabo con la simulación de los espectros de EIE, mediante el uso de circuitos eléctricos equivalentes (CEE), donde se obtienen parámetros de las diferentes interfaces presentes en el sistema tales como: resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) del electrodo (Acero), capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dl}) y coeficiente de difusión de Warburg (σ_w) por mencionar algunos (Vedalakshmi *et al.*, 2009; Sohail *et al.*, 2020).

De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo se evalúa los mecanismos del proceso de corrosión en sistemas acero-concreto ternario en curado en inmersión parcial a la edad de 180 días, mediante la aplicación y análisis de la técnica de EIE con la finalidad de demostrar la contribución de los materiales suplementarios (Ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza volante) en la disminución del proceso de corrosión en el acero de refuerzo, utilizando como indicador la Cdc.

2. Procedimiento experimental

2.1 Sistema acero-concreto

2.1.1 Electrodo de trabajo

En la figura 1, se observa la representación esquemática del sistema acero-concreto, constituida por los electrodos de trabajo (ET), los cuales consistieron en barras de refuerzo corrugadas de acero al carbono (AC) y acero galvanizado (AG) de diámetro nominal de 9.5 mm y 120 mm de longitud. El área de exposición se delimitó con pintura epóxica generando una sección de 14.9 cm². Con la finalidad de proteger los ET del medio, se introdujeron en un tubo de CPVC de 12.5 mm, relleno con resina epóxica para encapsular el electrodo de trabajo dejando únicamente libre el área de exposición. Los ET fueron embebidos en los especímenes de concreto.

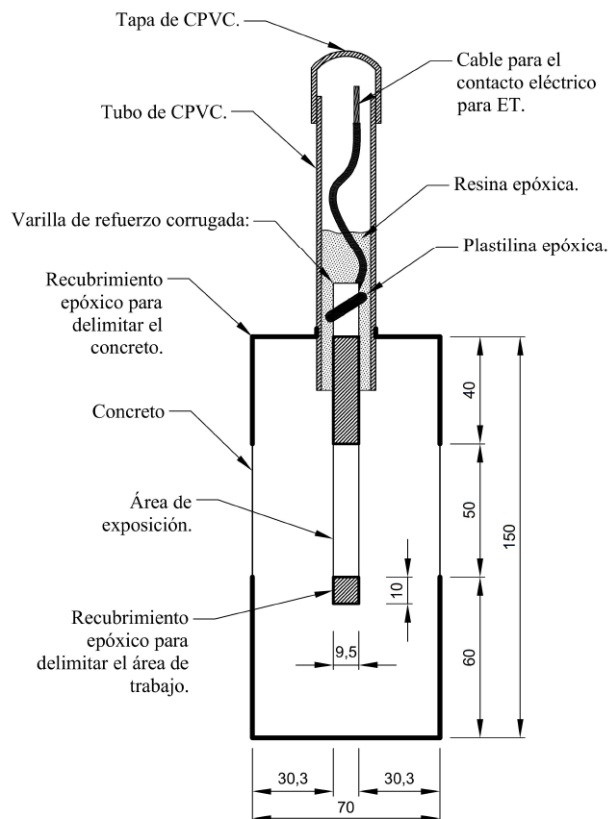


Figura 1. Representación esquemática del sistema acero-concreto.

2.1.2 Concreto

El diseño de mezclas de concreto se ejecutó de acuerdo con las especificaciones del método del ACI 211.1, se utilizó una relación agua/cemento de 0.45 con la finalidad de tener un concreto de uso estructural. Se utilizó cemento portland ordinario (CPO 40) que cumple con la designación ASTM C150. Se llevó a cabo la sustitución parcial de cemento por 10, 20 y 30 % de materiales suplementarios, estos porcentajes corresponden al 50% de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y 50 % de ceniza volante (CV), estas puzolanas cumplen con la designación ASTM C618. Los concretos elaborados cumplen con las especificaciones de la designación ASTM C192/C192M. Se elaboraron especímenes prismáticos con dimensiones de 150 x 70 x 150 mm (figura 1) y su curado se realizó en potable con 3.5% de hidróxido de calcio con respecto al volumen de agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2$, en un periodo de 180 días.

2.2 Caracterización electroquímica

Se fabricó una celda electroquímica con un arreglo típico de tres electrodos (figura 2), un electrodo de trabajo, ET, un electrodo de referencia, ER (Calomel saturado-Hg/HgCl₂) y un electrodo auxiliar, EA (barra de grafito sinterizado). La técnica de EIE se realizó de acuerdo con la norma ASTM G106 a la edad de 180 días. El rango de frecuencia de evaluación fue de 0.01 Hz a 100 kHz tomando 10 puntos por década, con una amplitud de 0.020 V. Para la ejecución de la prueba se utilizó un potencióstato/galvanostato con analizador de frecuencias integrado.

Se realizó el análisis cualitativo con la interpretación de los diagramas de Nyquist. Para el análisis cuantitativo de los espectros de EIE correspondientes a un sistema acero – concreto se llevó a cabo mediante el ajuste con circuitos eléctricos equivalentes (CEE), los cuales simulan la respuesta de la impedancia en las diferentes interfaces del sistema. Los ajustes se realizaron mediante el software ZSimp Win Versión 3.22. En dicho ajuste se utilizaron elementos de fase constante (CPE, por sus siglas en inglés), debido a que la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dc}) en el concreto no presenta un comportamiento puramente

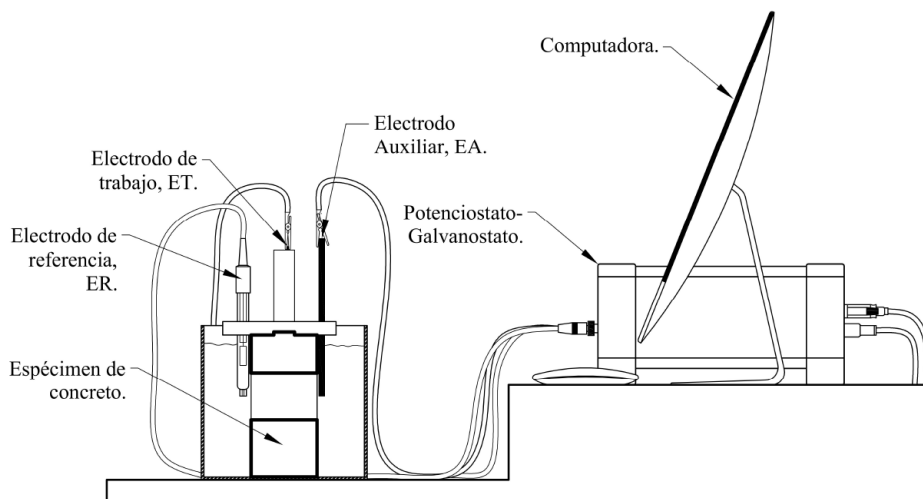


Figura 2. Arreglo experimental para la evaluación electroquímica mediante EIE.

capacitivo, lo cual está relacionado con la heterogeneidad de la matriz. De acuerdo con lo anterior, la Cdc se sustituyó por un CPE, posteriormente se determinó la Cdc mediante la ecuación de G.J. Brug *et al.* (Brug *et al.*, 1984; Tribollet, 2013). El coeficiente de difusión de Warburg (σ_w) se calculó con la ecuación propuesta por Vedalakshmi *et al.* (2009).

2.3 Nomenclatura de los especímenes

En la tabla 1, se presenta la nomenclatura para la identificación de los diferentes sistemas evaluados en la presente investigación.

3. Resultados

3.1 Análisis cualitativo de los espectros de EIE

En la figura 3 y 4, se presentan los resultados de las mediciones de EIE mediante diagramas de Nyquist y Bode (ángulo de fase vs frecuencia) donde se puede observar los datos experimentales (Marcadores) y la línea de ajuste (Línea continua).

En este análisis se observa que los espectros de EIE de los sistemas en evaluación, se presentan tres constantes de tiempo (τ) (figuras 3b y 3c), la primera τ_1 se detecta a bajas frecuencias en un rango 0.1 Hz a 1 Hz que corresponden a la resistencia del electrodo de trabajo, y, por lo tanto, están relacionadas con el fenómeno de corrosión. En frecuencias adicionales 0.01 Hz a 0.1 Hz se pueden observar los fenómenos de difusión. La segunda τ_2 se localiza a medianas frecuencias en un rango de 10 Hz a 10kHz la cual se atribuye principalmente a la composición de la estructura del concreto y a la interfaz acero – concreto en donde se observa la resistencia de la película de productos de corrosión. La tercera τ_3 se observa a altas frecuencias localizadas en 10 kHz a 100 kHz atribuida a la resistencia eléctrica del concreto (Ribeiro & Abrantes, 2016; Sohail *et al.*, 2020).

En la figura 3a se observa el diagrama de Nyquist de los AC embebidos en los concretos a 180 días, donde se obtienen semicírculos con diferentes magnitudes dominados por un proceso de difusión (transferencia de masa) con un comportamiento típico de Warburg, atribuido principalmente por la difusión de oxígeno a través de la película pasiva (Vedalakshmi *et al.*, 2009). En la misma figura se aprecia que los espectros de EIE de los AC de mayores resistencias se encuentran en el concretos 10SF, 20SF y 30SF con respecto a REF, este incremento puede ser asociado directamente con la contribución de los materiales suplementarios que a su vez contribuye al aumento de la impedancia de Warburg. Los espectros obtenidos de EIE han sido reportado por diferentes autores donde se observan de igual manera los procesos de transferencia de masa (Oliveira y Cascudo, 2018; Sohail *et al.*, 2020; Vedalakshmi *et al.*, 2009).

Tabla 1. Nomenclatura de los sistemas acero-concreto.

Aceros		Concretos	
Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
AC	AISI 1018	REF	Referencia (100% CPO 40)
		10SF	Concreto Ternario (90%CPO-05%CBCA-05%CV)
AG	Galvanizado	20SF	Concreto Ternario (80%CPO-10%CBCA-10%CV)
		30SF	Concreto Ternario (70%CPO-15%CBCA-15%CV)

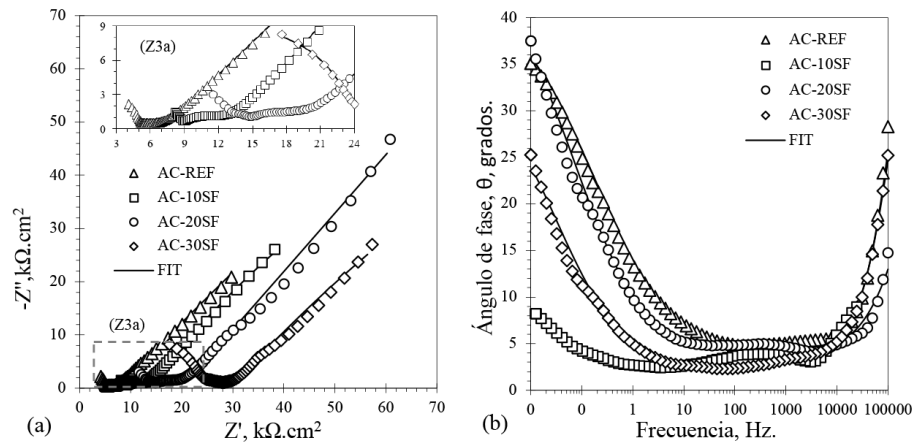


Figura 3. Diagramas de EIE de AC a la edad de 180 días, a) Nyquist y b) Bode (θ vs f).

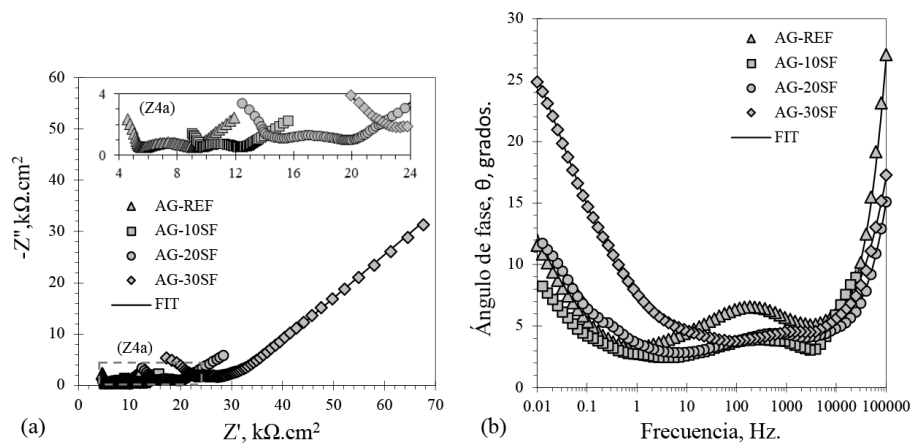


Figura 4. Diagramas de EIE de AG a la edad de 180 días, a) Nyquist y b) Bode (θ vs f).

En la figura 3b, se muestran los diagramas Bode (ángulo de fase vs frecuencia) obtenidos de los AC a la edad de 180 días. Se observa que el AC que presenta mayor ángulo de fase se encuentra embebido en el concreto 20SF, lo que se asocia a una menor actividad del proceso corrosión.

En la figura 4a, se presenta el diagrama Nyquist de los AG, donde se observan los diferentes espectros de EIE que presentan un proceso mixto, es decir, un proceso de transferencia de carga influenciado con un proceso de transferencia de masa, atribuido principalmente a que el recubrimiento de zinc se encuentra en un proceso de disolución y a la difusión limitada de oxígeno a través de la película compuesta de óxido de zinc (ZnO) e hidróxido de zinc (Zn(OH) $_2$) y del concreto (Padilla y Alfantazi, 2014). Se aprecia que los espectros de EIE de los AG con mayor magnitud se encuentran embebidos en los concretos 20SF y 30SF con respecto a los AG en REF y 10SF. Los espectros de EIE obtenidos son similares a los reportado por diferentes autores en sus investigaciones (Landa-Gómez *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018).

En la figura 4b, se muestra el diagrama Bode (ángulo de fase vs frecuencia) obtenido de los AG en los concretos ternarios, se observa que el AG embebido en el concreto 30SF presenta un ángulo de fase de mayor magnitud con respecto a los AG en REF, 10SF y 20SF.

3.2 Análisis cuantitativo de los espectros de EIE

En la figura 5, se presenta el esquema del circuito eléctrico equivalente (CEE) y su correspondiente explicación física. Es importante mencionar que el CEE es propuesto, a partir de las tres constantes de tiempo obtenidas y presentadas en el análisis cualitativo de los espectros de EIE la primera τ_1 , constituida por un CPE_{dc} el cual representa la correspondiente a la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dc}) en paralelo con la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) y un elemento Warburg (W), la segunda τ_2 , conformada por un CPE_{pel} que representa la capacitancia de la interface formada en el sistema acero – concreto (C_{pel}), en paralelo con la resistencia de la misma interface (R_{pel}), la tercera τ_3 , integrada por CPE_c que a su vez representa la correspondiente capacitancia del concreto (C_c) en paralelo con la resistencia del mismo (R_c). Es importante mencionar que las constantes de tiempo τ_1 y τ_2 están en serie y estas dos constantes a su vez están en paralelo con los elementos de la constante τ_3 . El circuito eléctrico utilizado en el presente trabajo es usado en la comunidad científica en el estudio de la corrosión en concretos (Ismail y Ohtsu, 2006; Ribeiro y Abrantes, 2016; Sohail *et al.*, 2020).

Para un mayor entendimiento de la explicación física del proceso de corrosión del sistema AC-concreto se presenta la figura 5a, donde se observa de derecha a izquierda la solución, la cual contiene la especie a reducir como el oxígeno, debido a que la reacción catódica es aireada en medio básico (característico de la solución del poro del concreto).

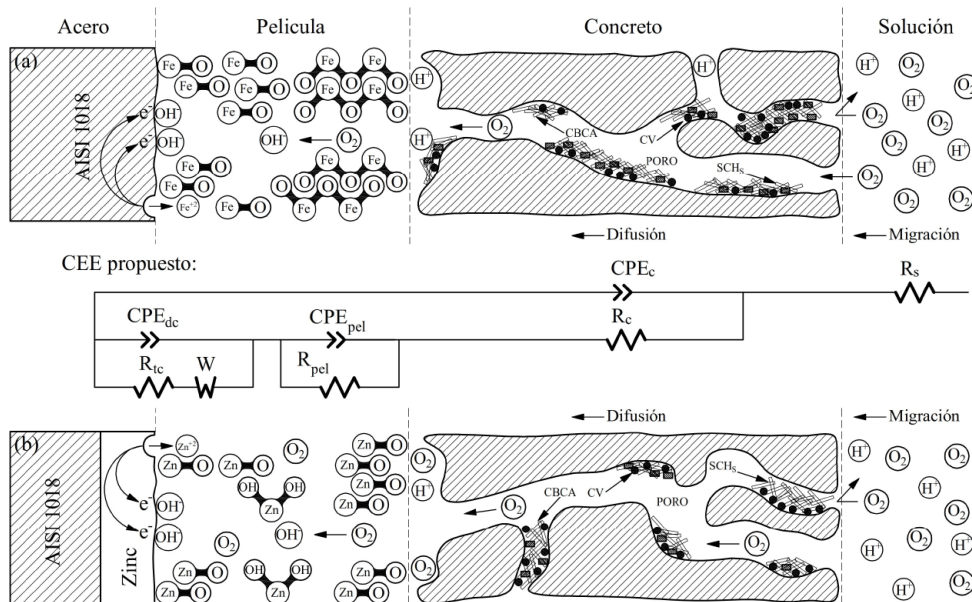


Figura 5. Esquema del CEE empleado para el ajuste de los espectros de EIE en el caso de un proceso, a) Difusión (transferencia de masa) en acero AISI 1018 y b) Trasterencia de carga influenciado por un proceso de transferencia de masa en acero galvanizado.

Posteriormente se encuentra el concreto, constituido principalmente por silicato de calcio hidratado (CSH) e hidróxido de calcio (CH) como productos primarios de hidratación del cemento portland con el agua de mezclado (Marchon y Flatt, 2016; Van Damme *et al.*, 2013). En el caso de los concretos ternarios se tiene la formación de CSH secundario después de los 60 días, producto de las reacciones puzolánicas de los materiales complementarios (CBCA y CV) ricos en óxido de silicio (SiO₂) con el CH presente en la matriz cementante (Alavéz-Ramírez *et al.*, 2012; Arenas-Piedrahita *et al.*, 2016).

Consecuentemente la película de productos de corrosión compacta y adherente (película pasivante) compuesta por una capa interna de óxido de hierro (II) (FeO) y una externa de óxidos de hierro (III) (Fe₂O₃) (Sánchez-Moreno *et al.*, 2009), originada por una reacción exotérmica espontánea en la superficie metálica debido a que se encuentra en un medio altamente alcalino (pH = 13) (Elsener y Rossi, 2018). Finalmente, la superficie metálica donde se localiza la doble capa electroquímica. De acuerdo con lo anterior, el proceso de difusión se lleva a cabo cuando el oxígeno como especie electroactiva se mueve desde la solución a través del concreto y de la película de productos de corrosión hasta llegar a la superficie metálica, en donde ocurre su reducción (Vedalakshmi *et al.*, 2009).

Para el sistema AG-concreto se presenta la figura 5b, en donde se observa la existencia de constantes de tiempo similares a la respuesta del acero AC-concreto. Sin embargo, la diferencia entre los dos aceros es la presencia del zinc que recubre al acero, por lo cual, la película de productos de corrosión está constituida principalmente por óxido de zinc (ZnO) e hidróxido de zinc (Zn(OH)₂) que fue originada por la reacción en la superficie metálica entre el Zn²⁺ y los grupos hidroxilos (OH⁻) (Andrade y Alonso, 2004; Padilla y Alfantazi, 2014). El proceso mixto que se lleva a cabo en este sistema es el proceso de transferencia de carga que se origina con la disolución del zinc debido a que se encuentra en un medio alcalino (pH = 13) (Popov, 2015) y el proceso de difusión del oxígeno a través del concreto y de la interface acero-concreto hasta llegar a la superficie metálica del zinc (Padilla y Alfantazi, 2014).

En las tablas 2 y 3, se presentan los resultados de los parámetros electroquímicos obtenidos de los ajustes de los espectros de impedancia de los sistemas AC y AG mediante el uso de los CEE.

Inicialmente se analiza el promedio de la R_c de los sistemas AC y AG, donde se obtiene que los concretos ternarios 10SF, 20SF y 30SF desarrollaron un incremento 87, 177 y 297 % con respecto al concreto REF, estos resultados se atribuyen a el CSH secundario que generó la nucleación de los poros presentes en la matriz cementante, que dependió directamente del contenido de materiales suplementarios (CBCA y CV) al incrementar la reactividad puzolánica. Lo anterior tiene sustento en diferentes reportes científicos donde se observa el aumento de las propiedades físicas y mecánicas cuando se utiliza materiales suplementarios en concreto (Arenas-Piedrahita *et al.*, 2016; Arif *et al.*, 2017; De Soares *et al.*, 2016; Jalal *et al.*, 2015; Ríos-Parada *et al.*, 2017b).

Tabla 2. Parámetros obtenidos del ajuste con CEE de los espectros de EIE de los sistemas AC-concreto a la edad de 180 días.

Nomenclatura	R _c	C _c	R _{pel}	C _{pel}	R _{tc}	C _{dc}	σ _w	Chi-squared
	(kΩ.cm ²)	(μF/cm ²)	(kΩ.cm ²)	(μF/cm ²)	(kΩ.cm ²)	(μF/cm ²)	(Ω.m.s ^{-1/2})	
AC-REF	4.10	2.35E-04	1.96	1.79E-01	180.90	3.36E+03	1.59E-01	2.91E-04
AC-10SF	8.20	8.06E-05	5.15	2.13E-01	311.10	2.02E+03	4.30E-01	8.95E-05
AC-20SF	12.94	2.05E-05	6.64	1.07E-01	410.90	1.47E+03	4.64E-01	3.15E-04
AC-30SF	16.73	6.19E-05	7.14	3.68E-02	385.70	1.33E+03	1.05E+00	1.77E-04

Tabla 3. Parámetros obtenidos del ajuste con CEE de los espectros de EIE de los sistemas AG-concreto a la edad de 180 días.

Nomenclatura	R_c	C_c	R_{pel}	C_{pel}	R_{tc}	C_{dc}	σ_w	Chi-squared
	($k\Omega.cm^2$)	($\mu F/cm^2$)	($k\Omega.cm^2$)	($\mu F/cm^2$)	($k\Omega.cm^2$)	($\mu F/cm^2$)	($\Omega.m.s^{-1/2}$)	
AG-REF	5.27	1.44E-04	4.02	4.09E-01	5.21	6.30E+03	2.01E-01	2.01E-04
AG-10SF	9.36	8.02E-05	3.13	3.04E-01	20.18	5.62E+03	2.67E-01	4.70E-05
AG-20SF	13.03	2.77E-05	6.98	6.21E-02	22.20	3.46E+03	1.00E+00	4.96E-05
AG-30SF	20.48	2.18E-05	6.49	5.28E-02	18.83	4.23E+03	8.49E-01	5.41E-05

En la tabla 2, se aprecia que la R_{pel} de los AC en los concretos ternarios 10SF, 20SF y 30SF presentan un aumento del 163, 239 y 264 % con respecto a la R_{pel} de AC en REF, este comportamiento se puede asociar directamente con el aumento de la R_c , al provocar una película de productos de corrosión adherente y compacta lo cual se ve reflejado en el aumento de esta. Así mismo, la R_{tc} de los AC desarrolla un aumento del 72, 127 y 113 % para los aceros embebidos en 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, esto con respecto a la R_{tc} del AC en REF (Sohail *et al.*, 2020).

Por otra parte, la C_{dc} de los AC en los concretos ternarios presenta un decremento del 40, 56 y 60 % para 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, con respecto a C_{dc} del AC en REF. Este comportamiento indica que las reacciones de oxidación y reducción disminuyen, debido a que la carga reflejada en el capacitor es de menor magnitud, lo que indica la disminución del proceso de corrosión (Ribeiro y Abrantes, 2016).

El σ_w en los sistemas AC-concreto, se observa un incremento del 170, 192 y 560 % para 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, con respecto a REF. Esto se atribuye a la difusión del oxígeno a través del concreto y de la película de productos de corrosión es más lenta en los concretos ternarios lo que contribuye directamente a disminuir las reacción de reducción (Vedalakshmi *et al.*, 2009).

En la tabla 3, se aprecia que la R_{pel} de los AG embebidos en 20SF y 30SF presentan un incremento de 73 y 61 % respectivamente, con respecto a R_{pel} del AG en el concreto REF. Posteriormente, la R_{tc} se ve atribuida por el aumento de la R_c y R_{pel} , al aumentar 287, 326 y 261 % para 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, con respecto a la R_{tc} del AG en REF.

La C_{dc} de los AG, se observa una disminución de este parámetro de los AG embebidos en los concretos ternarios, en un 11, 45 y 33 % para 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, con respecto de la C_{dc} del AG en el concreto REF. Este parámetro indica nuevamente que la acumulación de carga en el capacitor disminuye con respecto al decremento de las reacciones de oxidación y reducción, lo que contribuye la disminución de este fenómeno.

Finalmente, el σ_w en los sistemas AG-concreto, se observa un incremento del 33, 399 y 323 % para 10SF, 20SF y 30SF respectivamente, con respecto a σ_w en REF. Este aumento se atribuye principalmente al aumento de la R_c y a la R_{pel} que genera que el proceso de difusión a través de estas se mas paulatino, lo que disminuye las reacciones electroquímicas en el sistema (Vedalakshmi *et al.*, 2009).

4. Conclusiones

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica es una técnica integral para la evaluación de los sistemas acero-concreto, con la cual es posible detectar los mecanismos de corrosión y cuantificar mediante el ajuste de CEE las magnitudes de cada uno de los parámetros electroquímicos que presenta el sistema. De acuerdo con la evaluación de los sistemas se concluye lo siguiente:

- Se confirma la reactividad puzolánica de la CBCA y CV con los cristales de CH, al generar gel CSH secundario, al aumentar la R_c en los sistemas.
- Se confirma la contribución de la CBCA y CV a la matriz cementante al promover el aumento de la R_{pel} de los AC y AG.
- El incremento de R_c y R_{pel} en los concretos ternarios con tratamiento contribuye a el aumento de σ_w , con lo cual se reduce la difusión de la especie electroactiva en el sistema acero – concreto.
- La R_{tc} de los AC y AG desarrollaron mayor magnitud gracias a R_c , R_{pel} y σ_w . Este comportamiento fue corroborado con los valores de C_{dc} , los cuales presentan valores de acumulación de energía menores con respecto a los aceros embebidos en las referencias, indicando con esto una disminución del fenómeno de corrosión.
- El concreto ternario 30SF desarrolló la matriz cementante más resistente lo que contribuyó a los AC y AG un mejor comportamiento frente a la corrosión, atribuido principalmente al mejoramiento de las propiedades electroquímicas, es decir, al aumento de la R_{tc} y a la disminución de la C_{dl} .

5. Agradecimientos

A. E. Landa-Gómez expresa su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Programa de Doctorado en Materiales y Nanociencia del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología de la Universidad Veracruzana por el apoyo financiero y técnico para la realización de esta investigación.

6. Referencias

- Abd El Fattah, A., Al-Duais, I., Riding, K., & Thomas, M. (2018). Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions. *Construction and Building Materials*, 165, 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077>
- Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, 34, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Electrochemical Aspects of Galvanized Reinforcement Corrosion. *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete*, 111–144. <https://doi.org/10.1016/B978-008044511-3/50020-7>
- Arenas-Piedrahita, J. C., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J. M., López Calvo, H. Z., Valdez-Tamez, P. L., & Martínez-Reyes, J. (2016). Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials*, 105, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- Arif, E., Clark, M. W., & Lake, N. (2017). Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 151, 692–703. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>

- Brug, G. J., van den Eeden, A. L. G., Sluyters-Rehbach, M., & Sluyters, J. H. (1984). The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 176(1–2), 275–295. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(84\)80324-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(84)80324-1)
- Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., & Zozaya-Ortiz, A. (2017). Electrochemical meaning of cumulative corrosion rate for reinforced concrete in a tropical natural marine environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6973605>
- Cruz-Moreno, D., Fajardo, G., Flores-Vivian, I., Orozco-Cruz, R., & Ramos-Rivera, C. (2020). Multifunctional surfaces of portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles. *Applied Surface Science*, 531(May), 147355. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147355>
- De Soares, M. M. N. S., Garcia, D. C. S., Figueiredo, R. B., Aguilar, M. T. P., & Cetlin, P. R. (2016). Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. *Cement and Concrete Composites*, 71, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>
- Elsener, B., & Rossi, A. (2018). Passivation of Steel and Stainless Steel in Alkaline Media Simulating Concrete. In *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13772-2>
- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.004>
- Hu, J., Deng, P., Li, X., Zhang, J., & Wang, G. (2018). The vertical Non-uniform corrosion of Reinforced concrete exposed to the marine environments. *Construction and Building Materials*, 183, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.015>
- Ismail, M., & Ohtsu, M. (2006). Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 20(7), 458–469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.062>
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O. F., & Jafari, D. (2015). Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>
- Landa-Gómez, A. E., Fajardo-San Miguel, G., Orozco-Cruz, R., & Galván-Martínez, R. (2019). Evaluation of Corrosion in Reinforced Concrete During the Curing Stage, Treated Superficially with Nanoparticles. *ECS Transactions*, 94(1), 365–374. <https://doi.org/10.1149/09401.0365ecst>
- Luo, H., Su, H., Li, B., & Ying, G. (2018). Electrochemical and passive behaviour of tin alloyed ferritic stainless steel in concrete environment. *Applied Surface Science*, 439, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.243>
- Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Mechanisms of cement hydration. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>
- NACE. (2010). *Corrosion costs and preventive strategies in the United States* (Vol. 35). <https://doi.org/10.1097/jce.0b013e3181fb9a65>
- Oliveira, A. M. de, & Cascudo, O. (2018). Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192, 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>
- Padilla, V., & Alfantazi, A. (2014). Corrosion film breakdown of galvanized steel in sulphate-chloride solutions. *Construction and Building Materials*, 66, 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.053>
- Popov, B. N. (2015). Corrosion of Structural Concrete. In *Corrosion Engineering*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62722-3.00012-4>

- Ribeiro, D. V., & Abrantes, J. C. C. (2016). Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach. *Construction and Building Materials*, *111*, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.047>
- Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V. G., Valdez-Tamez, P. L., & Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, *157*, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>
- Rivera-Corral, J. O., Fajardo, G., Arliguie, G., Orozco-Cruz, R., Deby, F., & Valdez, P. (2017). Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish. *Construction and Building Materials*, *147*, 815–826. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.186>
- Sánchez-Moreno, M., Takenouti, H., García-Jareño, J. J., Vicente, F., & Alonso, C. (2009). A theoretical approach of impedance spectroscopy during the passivation of steel in alkaline media. *Electrochimica Acta*, *54*(28), 7222–7226. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.07.013>
- Selvaraj, R., Selvaraj, M., & Iyer, S. V. K. (2009). Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures. *Progress in Organic Coatings*, *64*(4), 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.005>
- Sohail, M. G., Kahraman, R., Alnuaimi, N. A., Gencturk, B., Alnahhal, W., Dawood, M., & Belarbi, A. (2020). Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels. *Construction and Building Materials*, *232*, 117205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117205>
- Tribollet, B. (2013). Analysis of Constant Phase Element. *223rd ECS Meeting*, *1*(2), 75252.
- Van Damme, H., Pellenq, R. J. M., & Ulm, F. J. (2013). Cement hydrates. In *Developments in Clay Science* (2nd ed., Vol. 5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00027-4>
- Vedalakshmi, R., Saraswathy, V., Song, H. W., & Palaniswamy, N. (2009). Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient. *Corrosion Science*, *51*(6), 1299–1307. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.017>
- Zheng, H., Dai, J. G., Li, W., & Poon, C. S. (2018). Influence of chloride ion on depassivation of passive film on galvanized steel bars in concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, *166*, 572–580. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.174>



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Comportamiento de corrosión del acero al carbono AISI 1018 en reparaciones localizadas de morteros con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería

E. Maldonado-Bandala¹, N. Higuereado-Moctezuma²,
D. Nieves-Mendoza¹, C. Gaona-Tiburcio³, H. Hernandez-Martínez¹,
F. Almeraya-Calderón³

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana,

² Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana,

³ FIME—Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA),
Universidad Autónoma de Nuevo León

Autor de Contacto: aldolanda12@gmail.com

Resumen

La producción de cemento Portland es un proceso de alta demanda de energía que emite 900 kg de CO₂ a la atmósfera por tonelada de cemento que contribuyó al calentamiento global y al cambio climático. Por lo tanto, en la búsqueda de formas de reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento mediante el uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) para reemplazar parte del cemento Portland. El objetivo de este trabajo era estudiar el comportamiento de corrosión del acero al carbono en morteros con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería. Se compararon con tres morteros convencionales, con dos morteros de reparación fabricados con ECC, donde el cemento es reemplazado por 20 % de FA y SF; y dos más con reemplazo total de OPC por MK y MK/SCBA. Los especímenes reforzados fueron sumergidos en dos electrolitos diferentes, expuestos a 3,5 wt. % de soluciones NaCl y Na₂SO₄, durante 12 meses.

Palabras clave: Reparación de morteros; corrosión; técnicas electroquímicas.

Abstract

Portland cement production is an energy-intensive process that emits 900 kg of CO₂ into the atmosphere per ton of cement which has contributed to global warming and climate change. Therefore, in the search for ways to reduce CO₂ emissions associated with cement production by using supplementary cement

materials (SCM) to replace some of the Portland cement. The objective of this work was to study the corrosion behavior of carbon steel in mortars with alkaline cements and cementitious engineering compounds. They were compared with three conventional mortars, with two repair mortars manufactured with ECC, where the cement is replaced by 20% of FA and SF; and two more with total replacement of OPC by MK and MK/SCBA. The reinforced specimens were immersed in two different electrolytes, exposed to 3.5 wt. % of NaCl and Na₂SO₄ solutions, for 12 months.

Keywords_Repair mortar; corrosion; electrochemical techniques

1. Introducción

La producción de cemento Portland es un proceso de alta demanda de energía [1,2] que emite 900 kg de CO₂ a la atmósfera por tonelada de cemento [3] que contribuyó al calentamiento global y al cambio climático. Por lo tanto, en la búsqueda de formas de reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento [4,5] mediante el uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) para reemplazar parte del cemento Portland [6].

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto puede estar sujeta a múltiples causas de daño potencial y deterioro de la infraestructura [7,8], Qué puede ser físico, mecánico, biológico o químico.

Sin embargo, el principal problema por el que una estructura de concreto armado requiere reparación es la corrosión del acero, que influye negativamente en la durabilidad de las construcciones, poniendo en riesgo su funcionalidad y seguridad [9], induciendo agrietamiento, desprendimiento del concreto y debilitamiento mecánico. Una vez que las barras de refuerzo están expuestas al medio ambiente, la corrosión se produce a mayor velocidad lo que conduce a la pérdida del acero de refuerzo [10-13]. Se han investigado diferentes soluciones para retardar o reducir el proceso de corrosión y mitigar las emisiones producidas por la industria cementera. Los nuevos materiales activados por álcalis han sustituido al OPC por diferentes tipos de cenizas con el fin de brindar durabilidad a los morteros, con resultados satisfactorios. La sustitución de OPC por cenizas: cenizas volantes (FA), escoria de alto horno (SFA) y metacaolín (MK) entre otros [14,15]. Además, en los últimos 20 años, la ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) y la ceniza de cáscara de arroz (RHA), se han estudiado con el fin de proporcionar una solución más sostenible y de rendimiento igual para las estructuras reforzadas [16-19], ya que disminuye los efectos de corrosión de la armadura producida en ambientes hostiles y mejora las propiedades mecánicas, estructurales, físicas, químicas y electroquímicas [20,21].

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento a la corrosión del acero al carbono AISI 1018 (CS) en morteros fabricados con cementos alcalinos, compuestos cementosos de ingeniería (ECC) y materiales cementantes suplementarios (SCM). Se utilizaron dos tipos de cemento Portland ordinario (OPC) 30R y 40R. Los materiales constituyentes para los morteros con morteros de mezcla ECC utilizan OPC 40R, cenizas volantes clase F (FA), fibras de humo de sílice (SF) y polipropileno (PP). El hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na₂SiO₃) se utilizaron como agentes activadores en cementos activados con álcali. Las probetas reforzadas se sumergieron en dos electrolitos diferentes, expuestas a un 3,5% en peso de soluciones de NaCl y Na₂SO₄, durante 12 meses y se estudió su comportamiento electroquímico mediante potencial de media celda (E_{corr}) y resistencia de polarización lineal (LPR) según ASTM C876. -15 y ASTM G59-97, respectivamente.

2. Procedimiento

Se utilizó cemento Portland ordinario (OPC) de dos clasificaciones; Se utilizó OPC 30R de acuerdo con NMX-C-414-ONNCCE [40] de 30 MPa y OPC 40R [22] de 40 MPa a los 28 días. Las adiciones puzolánicas se realizaron con el tipo de cenizas volantes (FA) Clase F de acuerdo con ASTM C618-94a [23], obtenido de una planta termoeléctrica en Coahuila, México. Se utilizó metacaolín (MK) que se obtuvo por calcinación de mineral caolinita a 750 °C durante 4 h. Finalmente, la ceniza de bagazo de caña de azúcar se obtuvo de la industria azucarera en Veracruz, México.

Se diseñaron seis morteros de reparación y uno de control.

- Dos Morteros con OPC 30R (MCX y MCXF) el cual fue fabricado en condiciones similares al mortero de control pero variando la relación a / c y añadiendo fibras de polipropileno (PP).
- Dos morteros con OPC-40R añadiendo fibras de polipropileno más cenizas volantes (MECC-FA) y otros con humo de sílice (MECC-SF).
- Dos morteros se fabricaron con 100% metacaolín (MK) y otro en proporciones iguales de MK / SBCA. El hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na₂SiO₃) se utilizaron como agentes activadores en cementos activados con álcali.

La fibra de PP utilizada en el presente estudio tiene un diámetro medio de 39 µm y una longitud nominal de 12 mm. La resistencia a la tracción y el alargamiento máximo de la fibra son 6120 MPa y 6,0% respectivamente. Las fibras se recubren con un agente hidrofóbico patentado al 1,2% (en peso) para modificar la interacción entre la fibra y la matriz de cemento para un mejor rendimiento.

La resistencia a la compresión de los morteros se midió según ASTM C39 [24], con una máquina de ensayo universal de clase 30 t (Controls Mod. Pilot. Milán, Italia), y el valor medio se utilizó midiendo la resistencia a la compresión en un conjunto de muestras por triplicado a los 7, 14, 60 y 360 días.

2.1 Métodos de Prueba

La evaluación de la corrosión del acero al carbono AISI 1018 en morteros de reparación estructural se desarrolló comparando el comportamiento frente a la corrosión de un mortero de control (MC) fabricado mediante técnicas convencionales de albañilería frente a seis morteros de reparación estructural.

2.2 Técnicas electroquímicas

Muestras de mortero prismático con dimensiones de 9 × 15 × 15 cm (Figura 1a) Fueron fabricados con dos varillas incrustadas en los morteros. El acero al carbono AISI 1018 (CS) se utilizó como barras y tenía una longitud de 15 cm y 9,5 mm de diámetro. Una configuración de celda convencional de tres electrodos (Figura 1b) para los estudios electroquímicos, que consistió en dos electrodos nominalmente idénticos (barras CS) como electrodo de trabajo (WE) y contraelectrodo (CE), un electrodo de cobre-sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), respectivamente. Las mediciones electroquímicas se llevaron a cabo utilizando un potencióstato / galvanostato / ZRA Gill-AC de ACM Instruments (Manchester, Reino Unido). Los experimentos de corrosión se realizaron mediante inmersión en soluciones de NaCl y Na₂SO₄ al 3,5 % en peso, durante 12 meses, a temperatura ambiente. Las pruebas electroquímicas se realizaron por triplicado.

El potencial de corrosión de media celda (E_{corr}) se utilizó para evaluar el estado de corrosión de las muestras de hormigón armado de acuerdo con la norma ASTM C876-15 [25] y considerando un rango más, según la literatura [26]. E_{corr} establece los criterios o rangos que relacionan los valores de E_{corr} con el riesgo de corrosión para probetas de acero embebidas hechas con morteros con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería, ver tabla 1 [25,26].

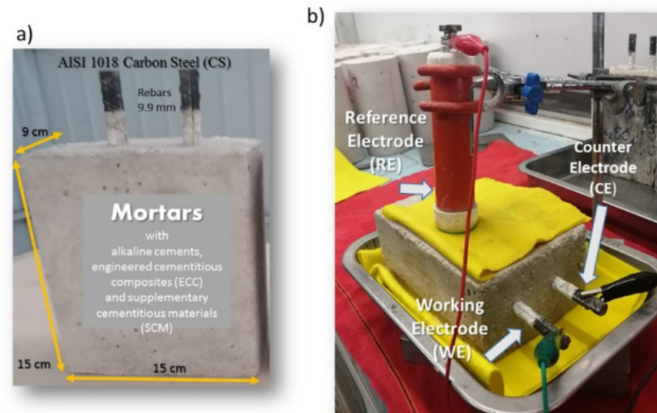


Figura 1. Arreglo experimental. (a) Dimensiones de las probetas, (b) celda de corrosión convencional de tres electrodos.

Tabla 1. Potencial de corrosión de media celda (E_{corr}) medido frente a Cu /CuSO₄ en concreto armado.

E_{corr} vs Cu/CuSO ₂ (mV)	actividad de corrosión
$E_{corr} > -200$	10 % probabilidad de corrosión
$-200 > E_{corr} > -350$	Incertidumbre de corrosión
$E_{corr} < -350$	Alta probabilidad de corrosión

La resistencia de polarización lineal (LPR) se registró a una velocidad de barrido de 10 mV / min, se aplicó un rango de exploración potencial entre -20 a +20 mV frente a (Cu / CuSO₄), de acuerdo con la norma ASTM G59-99 y Stern– Geary [27,28]. El i_{corr} y la velocidad de corrosión (v_{corr}) se estimaron a partir de la técnica LPR utilizando la ecuación de Stern y Geary [28]

$$i_{corr} = \frac{\beta}{Rp}$$

donde R_p se expresa en $\Omega \cdot \text{cm}^2$ y β en V es una constante resultante de una combinación de las pendientes de Tafel anódicas y catódicas: β es una constante con un valor recomendado de 0.026 V para la corrosión activa y 0.052 V para la pasiva del acero en el concreto [29,30]. Los niveles de corrosión se definieron de acuerdo con las especificaciones de la red Durar [31].

Para determinar la v_{corr} de aceros al carbono embebidos en las probetas elaboradas de morteros con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería, se utilizaron los valores de i_{corr} . Los criterios utilizados para analizar los resultados de i_{corr} se basan en el estado de corrosión del acero en el hormigón informado en la literatura [32], como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Rangos de densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y la velocidad de corrosión (v_{corr}) relacionado con el nivel de corrosión [31].

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	v_{corr} (mm/d)	Nivel de corrosión
$i_{corr} \leq 0.1$	$v_{corr} \leq 0.001$	Insignificante (pasivo)
$0.1 < i_{corr} < 0.5$	$0.001 < v_{corr} < 0.005$	Baja corrosión
$0.1 < i_{corr} < 1$	$0.001 < v_{corr} < 0.010$	Moderada corrosión
$i_{corr} > 1$	$v_{corr} > 0.010$	Alta corrosión

2.3 Resistividad eléctrica y adherencia

Las pruebas de resistividad se realizaron según norma UNE 83988-2 [33] (método de los cuatro puntos: método de Wenner) a los 14, 28, 60 y 360 días. Este método consiste en utilizar un equipo que tiene cuatro electrodos espaciados a igual distancia (5 cm). Al colocarse sobre la superficie del hormigón, se aplica una carga eléctrica entre los dos electrodos externos y los dos electrodos internos miden la diferencia de potencial resultante. Se utilizaron tres probetas para cada mezcla y se realizaron tres mediciones de resistividad en cada probeta, espaciadas por ángulos de 120° ; para cada condición, se tomaron un total de nueve mediciones.

Los valores de resistividad eléctrica debían corregirse de acuerdo con el tamaño de las muestras. Este factor es 0.377. Por tanto, la elección de la forma de las muestras (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) se produjo debido al conocimiento previo del factor de forma necesario para medir la resistividad eléctrica. Además, se evaluó la adherencia con el ensayo de corte inclinado [34]. Se utilizaron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud, hechos de dos mitades idénticas unidas a 30° y ensayadas bajo compresión axial, la mitad inferior fue el hormigón a reparar (sustrato de concreto 30 MPa) y la mitad superior de los morteros de reparación analizados.

3. Resultados

3.1 Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple (figura 2) de los morteros de reparación analizados a temprana edad, el mortero convencional MCX tiene una mejor resistencia a la compresión que el mortero MC, ya que este mortero tiene una relación $a/c = 0,45$ y el mortero MC tiene una relación $a/c = 0,78$. A la edad de 90 días, la resistencia a la compresión de ambos morteros no presenta una diferencia significativa porque el mortero MCX tuvo una resistencia de 25,63 MPa y el MC una resistencia de 26,42 MPa, no alcanzando ambos la resistencia mínima deseada del sustrato de concreto.

En el mortero con fibras MCXF, se observa que la adición de 1 % de fibra con respecto al peso del cemento incrementó significativamente la resistencia a la compresión en 39,65 MPa con respecto a los morteros MC y MCX. Eso significa que la adición de fibra de PP al 1 % registró un aumento en la resistencia a la compresión de 13,23 MPa a la edad de 90 días. Los resultados indicaron que el mortero MECC-FA presenta resistencias a la compresión menores que el mortero con fibras MCXF en edades tempranas. Sin embargo, a los 90 días, registró un aumento en su resistencia de 40,51 MPa; es decir, 0,86 MPa en morteros MCXF con fibra PP.

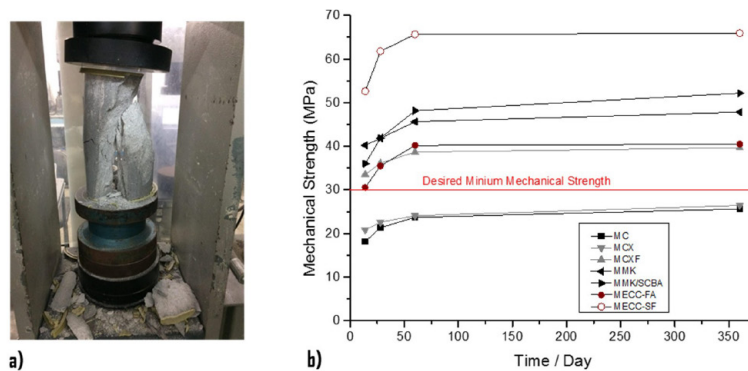


Figura 2. Resistencia a la compresión de los morteros. (a) Prueba de acuerdo con ASTM C39 [24].
(b) Medir a las edades de 7, 14, 60 y 360 días.

La fibra de polipropileno (PP) de alta tenacidad se estudió como una alternativa a la fibra de alcohol polivinílico (PVA) debido a su menor costo e intensidad energética [35,36]. Se encontró que PP ECC tiene ductilidad (3% de capacidad de deformación) comparable a la de PVA ECC [37]. ECC con fibras híbridas de PVA y PP mostró una ductilidad mejorada con menor resistencia [38].

El mortero de reparación estructural MECC-SF es el mortero que logró la mayor resistencia a la compresión, lo que resultó en una resistencia a la compresión de 90 días de 65,92 MPa. Además, se observaron resistencias a compresión extremadamente altas desde edades tempranas, ya que a los 14 días desarrolló resistencias a compresión de 52,60 MPa.

Los morteros fabricados con cementos alcalinos MMK y MMK / SCBA obtuvieron mayores resistencias a compresión que los morteros MC, MCX, MCXF y MECC, aunque fueron inferiores al mortero de reparación estructural MECC-SF. La resistencia de los morteros con cementos alcalinos a los 90 días fue de aproximadamente 50 MPa.

3.2 Potencial de media celda y densidad de corriente

La figura 3 muestra la variación de E_{corr} e i_{corr} en función del tiempo de inmersión en solución de NaCl al 3,5% en peso. En figura 3a se observa que los elementos reparados con mortero convencional MC con relación a/c 0.78 tienen valores potenciales menores a -400 mV, indicando 90 % de probabilidad de corrosión, las probetas con mortero MCX y MCXF no presentan cambio significativo debido a que ambos tienen valores de alta probabilidad de corrosión pero a los 200 días, muestran potenciales cercanos a -350 mV. Es importante destacar los valores de los elementos reparados con morteros MECC-FA, MCCE-SF y MMK / SCBA ya que, a los 150 días, la barra de acero comienza a pasivarse y tiene valores superiores a -350 mV, y aproximadamente a los 300 días, tiene un 10 % de probabilidad de corrosión. En caso contrario, ocurrió con los elementos reparados con mortero a base de cemento activado MMK que presentó los valores de E_{corr} más electronegativos.

La figura 3b muestra los valores de densidad actuales. El comportamiento de las probetas reparadas con los morteros MCXF, MECC-FA, MCCE-SF y MMK / SCBA, de 25 días a 365 días, tienen valores entre 0.1 y 0,5 $\mu A/cm^2$, situándose en los rangos de baja corrosión. Al respecto, Andrade y González [39] describen que es precisamente en este rango de valores de i_{corr} donde se inicia la despasivación del acero de

refuerzo. Las otras probetas presentaron valores muy altos de densidad de corriente en rangos de corrosión altos y muy altos. Esto posiblemente se deba a la alta demanda de álcalis y la alta área superficial del MK, lo que conduce a una alta demanda de agua y, en consecuencia, una alta contracción y agrietamiento [40] y en presencia de agua, permite la entrada de iones Cl^- con mayor facilidad.

La figura 4 se muestran las variaciones de E_{corr} e i_{corr} , en función del tiempo de inmersión en solución de Na_2SO_4 al 3,5% en peso. En la figura 4a se observó que las probetas reparadas con mortero a base de cemento alcalino activado con metacaolín MMK presentan los valores más electronegativos, entre -600mV al inicio del monitoreo hasta -400mV a los 365 días, colocándose en una región de 90% de probabilidad de corrosión. En la cinética de corrosión presentada en la Figura4b, donde este mismo ejemplar presenta la máxima velocidad de corrosión (valores superiores a $0,5\ \mu\text{A} / \text{cm}^2$) después de 200 días se despasiva y aumenta la velocidad de corrosión.

El análisis de los datos de i_{corr} se realiza mediante el uso de gráficos de corrosión acumulada ($\mu\text{A} / \text{cm}^2 \times \text{mes}$), que resulta de calcular el área bajo la curva de i_{corr} a lo largo del tiempo. Esta forma de representación tiene la ventaja de que la corrosión acumulada, calculada integrando la tasa hasta la edad adecuada, siempre crece con el tiempo y permite una mejor comparación de los efectos. Esta herramienta se informó anterior-

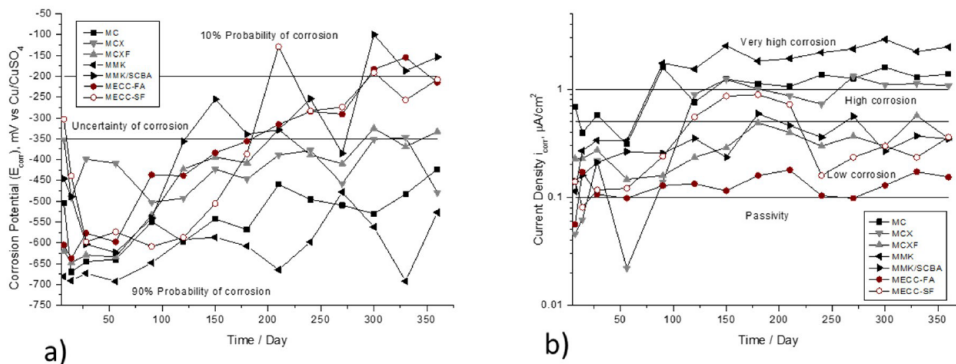


Figura 3. Comportamiento a la corrosión de AISI 1018 CS en morteros expuestos en solución de NaCl al 3,5 % en peso. (a) Potencial de media celda (E_{corr}), (b) Densidad de corriente (i_{corr}).

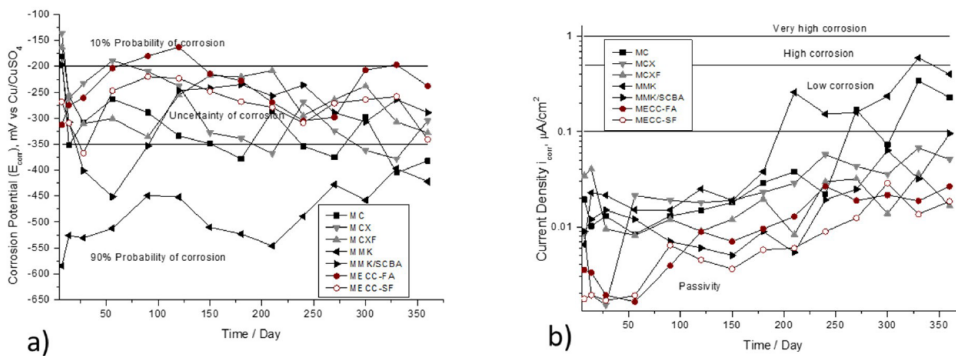


Figura 4. Comportamiento a la corrosión de AISI 1018 CS en morteros expuestos solución de Na_2SO_4 al 3,5 % en peso. Potencial de media celda (E_{corr}). (b) Densidad de corriente (i_{corr}).

mente en este campo [13,41-44]. La información reportada discutida por estos autores contiene no solo el uso de corrosión acumulativa, sino también su interpretación en pruebas tanto naturales como simuladas.

La figura 5 muestra la evolución de la densidad de corriente de corrosión acumulada de las varillas expuestas en una solución de NaCl al 3,5 % en peso, donde es más evidente que las muestras reparadas con un mortero convencional MC tienen una tasa de corrosión muy alta. Sin embargo, los fabricados con MMK presentan un punto de inflexión mayor a 4 meses (aproximadamente 120 días), demostrando muy baja protección contra la corrosión del acero de refuerzo. Se observó que, a los 3 meses (90 días), existe un cambio de pendiente en la gráfica para estos dos morteros MC y MMK, lo que se atribuye al período de despasivación, lo cual puede estar relacionado con lo observado en este mismo período en la figura 4b.

El comportamiento de la densidad de corriente de corrosión acumulada en el AISI 1018 CS de las probetas reparadas con mortero MECC-FA, muestra una pendiente tendiente a la horizontal, lo que se considera corrosión despreciable. Los morteros MCXF, MMK / SCBA y MECC-FA mostraron pendientes muy similares sin deflexiones ni cambios bruscos, lo que indica que la corrosión acumulada durante el tiempo de prueba fue muy baja. Por tanto, estos morteros pueden considerarse buenos protectores frente a la corrosión del acero de refuerzo en soluciones de cloruros y sulfatos.

La figura 6 muestra la evolución de la densidad de corriente de corrosión acumulada del acero de refuerzo expuesto en solución de Na₂SO₄ al 3,5 % en peso. El mortero que ofrece menor protección contra la corrosión es el MMK debido a las fuertes pendientes que presentaban corrosión acumulada, destacándose un cambio de valores en el mes 6. Al hacer la comparación con la gráfica de la Figura 4b, este cambio es evidente en el momento en que cruza el rango de pasividad y pasa a baja corrosión y presenta valores superiores a 0.1 $\mu\text{A} / \text{cm}^2$. Los morteros MCXF, MMK / SCBA y MECC-FA son los que presentan mejores comportamientos frente a la corrosión de las armaduras.

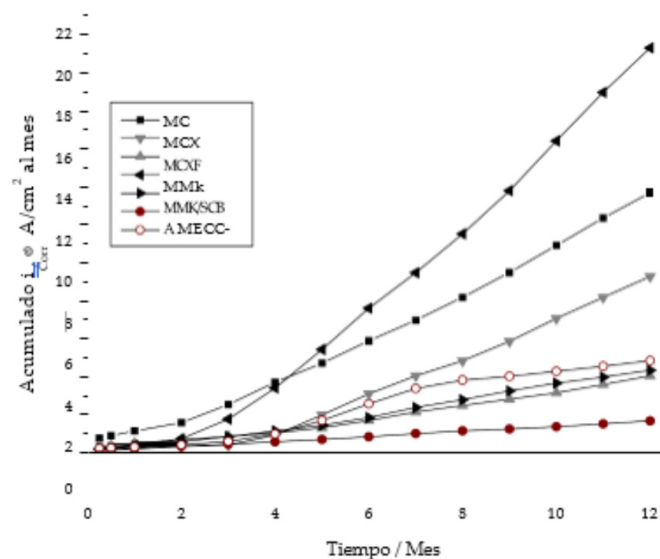


Figura 5. Evolución de la densidad de corriente de corrosión acumulada de AISI 1018 CS en morteros, expuestos en solución de NaCl al 3,5 % en peso.

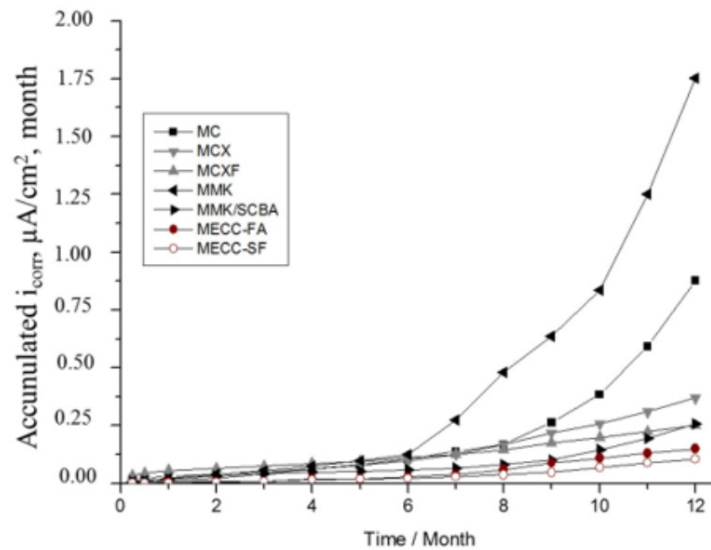


Figura 6. Evolución de la densidad de corriente de corrosión acumulada de AISI 1018 CS en morteros, expuestos en solución de Na₂SO₄ al 3,5 % en peso.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se pueden construir diagramas que relacionen las propiedades eléctricas, mecánicas y de corrosión.

Se evaluó la resistividad eléctrica como parámetro de durabilidad de los morteros de reparación, por lo que esta técnica se puede utilizar para establecer la relación con propiedades, tales como: grado de hidratación del cemento [45], resistencia a la compresión [46-52], resistencia a la permeabilidad al ion Cl⁻ [53], ajuste de tiempo [54], y probabilidad de corrosión [55]. La resistividad eléctrica puede estar relacionada indirectamente con la porosidad del mortero o concreto y, por tanto, puede estar ligada a la susceptibilidad a la entrada de agentes agresivos.

La resistencia a la adherencia entre el sustrato de hormigón y el mortero de reparación tiene una gran influencia porque puede representar un eslabón muy débil y puede considerarse como la zona por donde entran agentes agresivos para desencadenar daños por corrosión [34]. Esa perspectiva implica que si existe una buena adherencia entre el concreto viejo y el mortero de reparación, la falla presentada en la prueba será monolítica, es decir, como una pieza completa. Si la falla se debe a la interfaz o unión entre el sustrato de concreto y el mortero de reparación, la falla se considera por adherencia [56], lo cual es crítico porque genera un área de aireación que permite la entrada de iones cloruro.

En la figura 7, este diagrama solo presenta los morteros expuestos en una solución de NaCl al 3,5 % en peso, este diagrama relaciona las pruebas de adherencia de los morteros estudiados con el sustrato de hormigón propuesto, mediante el método de corte inclinado vs. resistividad eléctrica vs. densidad de corriente, obtenido por el método LPR. Se puede apreciar que las líneas verdes corresponden a las probetas reparadas con morteros MCXF, MMK / SCBA y MEC-FA, que mostraron una adecuada adherencia con el concreto viejo (sustrato de concreto) con falla monolítica.

Asimismo, los valores de resistividad eléctrica a los 365 días se ubicaron en rangos de probabilidad moderada de corrosión según la Red Durar. Además, también es bien conocido que estos tres morteros de

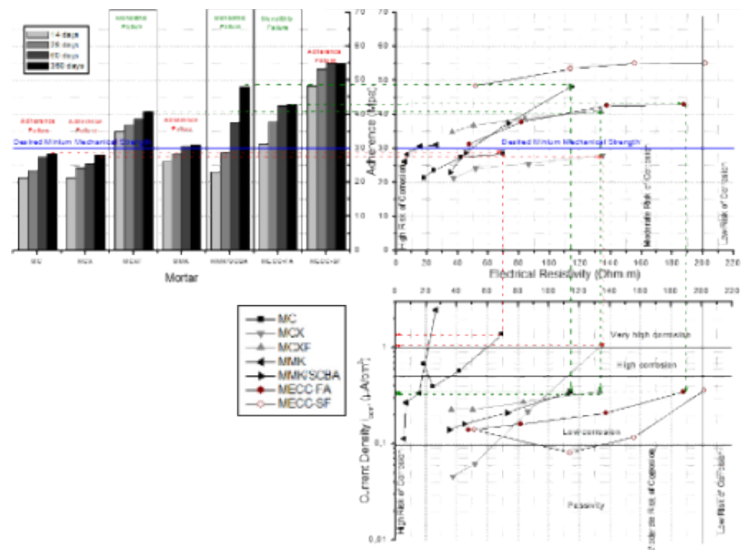


Figura 7. Relación entre resistividad eléctrica, adherencia y densidad de corriente de corrosión de AISI 1018 CS en morteros puestos en una solución de NaCl al 3,5 % en peso.

reparación tienen tasas de corrosión en el rango de 0,1 a 0,5 $\mu\text{A} / \text{cm}^2$. Las probetas MC, MCX y MMK, que presentan 365 días después de ensayar una falla de adherencia, es decir por la unión entre mortero-concreto, y resistencias mucho menores a las estimadas de 30 MPa, se ubican en valores de resistividad entre 40 y 140 $\Omega\cdot\text{m}$, pero con índices de corrosión muy elevados. Este diagrama es bastante útil para seleccionar los materiales de reparación que se utilizarán aplicando no solo criterios mecánicos, sino también eléctricos y electroquímicos.

El mortero de reparación MMK / SCBA presentó un buen resultado y se puede atribuir a la presencia de un mayor contenido de sílice (relación Si: Al) que el mortero MMK. Un mayor contenido de sílice es generalmente beneficioso, la evidencia experimental sugiere que puede conducir a la formación de poros más pequeños que pueden prevenir la entrada de agentes agresivos a largo plazo [57].

Los morteros MECC-FA y MECC-SF presentaron resultados que pueden ser causados por reacciones secundarias de hidratación del cemento Portland y el alto porcentaje de SiO_2 en el SCBA. Por tanto, da como resultado una matriz de cemento más densa y con menos poros que evita la entrada rápida de agentes agresivos (NaCl y Na_2SO_4) y la misma estructura compacta de los silicatos cálcicos hidratados (CSH) aporta una mayor ventaja en cuanto a propiedades mecánicas y corrosión.

El desempeño del mortero convencional MCXF, el cual fue fabricado con cemento Portland ordinario de 30 MPa, y relación a / c de 0.78, presentó buena protección contra la corrosión por la incorporación de fibras de polipropileno. Según la literatura consultada, disminuyen la propagación de microgrietas en la etapa de endurecimiento del cemento [57].

4. Conclusiones

El uso de ensayos de corrosión, resistividad eléctrica y adherencia permitió observar el comportamiento del acero al carbono AISI 1018 (CS) en morteros fabricados con cementos alcalinos y compuestos cementosos de ingeniería (ECC) añadiendo materiales cementosos suplementarios (SCM).

El mortero que presenta mejores prestaciones y durabilidad es el mortero convencional MCXF, con OPC 30R y la adición de fibra de polipropileno PP al 1 % mejora el comportamiento frente al ataque de cloruros y sulfatos. Además, mejoró su resistencia a la compresión dando resultados comparables al mortero MECC-FA. Los fallos presentados en adherencia fueron monolíticos.

Los morteros con metacaolín MK de cemento activado por álcali tienen una alta resistencia a la compresión. Sin embargo, los valores de resistividad eléctrica y corrosión fueron pobres, colocándolo en una zona de alto riesgo de corrosión.

Los morteros MECC-FA y MMK / SCBA tienen excelentes propiedades de durabilidad. Sin embargo, el uso de morteros convencionales como MCXF, que desarrolla buenas propiedades de durabilidad, puede ser implementado.

El diagrama propuesto en la figura 7 se puede utilizar como una herramienta eficaz para relacionar la adherencia, la resistividad eléctrica y la corrosión. También puede ayudar en la selección de mortero o materiales que se utilizarán para la reparación de estructuras de hormigón armado.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al PRODEP por el apoyo otorgado por la SEP, al Cuerpo Académico UV-CA-300 y UANL-CA-316; y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca No. 494879 a Noema Higuereado-Moctezuma. Los autores agradecen a la UV y la UANL por las instalaciones del laboratorio.

6. Referencias

- (Wianglor, K. ; Sinthupinyo, S. ; Piyaworapaiboon, M. ; Chaipanich, A.) Efecto del metacaolín activado por alcaliscento sobre resistencia a compresión de morteros. *Apl. Arcilla. Sci.* 2017, 41, 272–279. [CrossRef]
- (Puertas, F. ; Torres-Carrasco, M.) Utilización de residuos de vidrio como activador en la preparación de escoria activada por álcalis. Resistencia mecánica y caracterización de la pasta. *Cem. Concr. Res.* 2014, 57, 95–104. [CrossRef]
- (Benhelal, E. ; Zahedi, G. ; Shamsaei, E. ; Bahadori, A.) Estrategias y potenciales globales para frenar el CO₂ emisiones en industria del cemento. *J. Limpio. Pinchar.* 2013, 51, 142–161. [CrossRef]
- (Mahasenan, N. ; Smith, S. ; Humphreys, K.) La industria del cemento y el cambio climático global actual y potencial futuro industria del cemento CO₂ emisiones. En *Greenhouse Gas Control Technologies, Actas de la 6ª Conferencia Internacional, Kyopto, Japón, 1 a 4 de octubre de 2002*; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos, 2003; págs. 995–1000.
- (Gartner, E.) Enfoques industrialmente interesantes para “bajas emisiones de CO₂” Cementos. *Cem. Concr. Res.* 2004, 34, 1489–1498. [CrossRef]
- (Wang, J. ; Wu, XL; Wang, JX; Liu, CZ; Lai, YM; Hong, ZM; Zheng, JP) Síntesis hidrotérmica y caracterización de materiales cementosos de escoria-cenizas volantes-metacaolín activados por álcalis. *Mesoporoso Microporoso Mater* 2012, 155, 186-191. [CrossRef]
- (Criado, M. ; Bastidas, DM; Fajardo, S. ; Fernández-Jiménez, A. ; Bastidas, JM) Comportamiento a la corrosión de un nuevo acero inoxidable bajo en níquel incrustado en morteros de cenizas volantes activadas. *Cem. Concr. Comp.* 2011, 33, 644–652. [CrossRef]

- (Baltazar, MA; Bastidas, DM; Santiago, G.; Mendoza, JM; Gaona, C.; Bastidas, JM; Almeraya, F). Efecto de aditivos de humo de sílice y cenizas volantes sobre el comportamiento a la corrosión del AISI 304 incrustado en hormigón expuesto en solución de NaCl al 3,5%. *Materiales* 2019, 12, 4007. [CrossRef]
- (Andrade, C.; Feliu, S.) *Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras*; ICCT: Madrid, España, 1989.
- (Martínez-Echeverría, JM; López-Alonso, A.; Cantero-Romero, D.; Rodríguez-Montero, J.) Influencia del estado anterior de corrosión de las armaduras en la predicción de la vida útil de las estructuras de hormigón armado. *Constr. Construye Mater.* 2018, 188, 915–923. [CrossRef]
- (Manzur, T.; Baten, B.; Hasan, MJ; Akter, H.; Tahsin, A.; Hossain, K.) Comportamiento a la corrosión de mezclas de concreto con astillas de mampostería como agregado grueso. *Constr. Construir. Mater.* 2018, 185, 20–29. [CrossRef]
- (Xu, F.; Xiao, Y.; Wang, S.; Li, W.; Liu, W.; Du, D.) Modelo numérico para la tasa de corrosión del refuerzo de acero en estructura de hormigón armado agrietada. *Constr. Construir. Mater.* 2018, 180, 55–67. [CrossRef]
- (Maldonado, ABEJA; Jiménez, QV; Olguin, CF; Lizarraga, ML; Baltazar-Zamora, MZA; Ortiz, CF; Almeraya, CP; Zambrano, R.; Gaona Tiburcio, C.) Caracterización electroquímica de hormigones modificados con ceniza de bagazo de caña de azúcar. *En t. J. Electrochem. Sci.* 2011, 6, 4915–4926.
- (Habert, G.; d’Espinoza de Lacaillerie, JB; Roussel, N.) Una evaluación ambiental de geopolímeros basada en producción de hormigón: revisión de las tendencias de investigación actuales. *J. Limpio. Pinchar.* 2011, 19, 1229–1238. [CrossRef]
- (Baltazar, MA; Ariza, H.; Landa, L.; Croche, R.) Evaluación electroquímica de acero inoxidable AISI 304 y acero galvanizado en hormigón ternario ecológico a base de ceniza de bagazo de caña de azúcar y humo de sílice (SCBA-SF) expuesto a N / A2ENTONCES4. *EUR.J. Eng. Res. Sci.* 2020, 5, 353–357. [CrossRef]
- (Padhi, R.; Mukharjee, B.) Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del hormigón agregado reciclado. *J. Aplicación básica Ing. Res.* 2017, 4, 356–359.
- (Baltazar, MA; Mendoza, JM; Croche, R.; Gaona, C.; Hernández, C.; López, L.; Olguín, F.; Almeraya, F.) Comportamiento a la corrosión del acero galvanizado empotrado en hormigón expuesto a suelo tipo MH contaminado con cloruros. *Frente. Mater.* 2019, 6. [CrossRef]
- (Pellegrini Cervantes, JM; Barrios Durstewitz, PC; Núñez Jaquez, R.; Almeraya Calderón, F.; Rodríguez-Rodríguez, M.; Fajardo-San-Miguel, G.; Martínez-Villafañe, A.) Ensayo de corrosión acelerada en morteros de consistencia plástica con sustitución de cenizas de cascarrilla de arroz y nano-SiO₂. *En t. J. Electrochem. Sci.* 2015, 10, 8630–8643.
- (Pellegrini Cervantes, JM; Almeraya Calderon, F.; Baldenebro López, JF; Nuñez Jaquez, R.; Fajardo San Miguel, G.; Chacón Nava, GJ; Barrios Durstewitz, PC; Martínez Villafañe, A.) Penetración de cloruro en morteros con reemplazos de ceniza de cáscara de arroz y nano-SiO₂. *IOSR J. Eng. (IOSRJEN)* 2013, 3, 24–30. [CrossRef]
- (Saraswathy, V.; Song, HW) Comportamiento frente a la corrosión del hormigón mezclado con cenizas de cáscara de arroz. *Constr. Construye Mater.* 2007, 21, 1779-1784. [CrossRef]
- (Abu Bakar, BH; Putrajaya, R.; Abdulaziz, H.) Ceniza de cáscara de arroz de Malasia: mejora la durabilidad y la corrosión Resistencia del hormigón: Pre-revisión. *Concr. Res. Letón.* 2010, 11, 6–13.
- UNA VEZ. NMX-C-414-ONNCCE-2014 – Industria de la Construcción — Cementantes Hidráulicos — Especificaciones y Métodos de Ensayo; ONNCCE: Ciudad de México, México, 2014.
- ASTM C618-17a. Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolana natural bruta o calcinada para uso en concreto; ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2017.

- ASTM C 876-15. Método de prueba estándar para el potencial de corrosión del acero de refuerzo sin recubrimiento en concreto; ASTM Internacional: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2015.
- (Song, HW; Saraswathy, V.) Monitoreo de la corrosión de estructuras de hormigón armado: una revisión. En t. J. Electrochem. Sci. 2007, 2, 1–28.
- ASTM G 59-97. Método de prueba estándar para realizar mediciones de resistencia a la polarización potenciodinámica; ASTM Internacional: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2014.
- (Stern, M. ; Geary, AJ) Polarización electroquímica: análisis teórico IA de la forma de polarización curvas. J. Electrochem. Soc. 1957, 104, 56–63. [CrossRef]
- (Feliu, S. ; González, JA; Andrade, C.) Métodos electroquímicos para la determinación in situ de las tasas de corrosión de las barras de refuerzo. En Técnicas para evaluar la actividad de corrosión de estructuras de hormigón armado con acero; ASTM STP 1276; Berke, NS, Escalante, E., Nmai, CK, Whiting, D., Eds. ; ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 1996; págs. 107-118.
- (González, JA; Ramírez, E. ; Bautista, A. ; Feliú, S.) El comportamiento del acero pre-oxidado en el hormigón. Cem. Concr. Res. 1996, 26, 501–511. [CrossRef]
- (Ariza-Figueroa, H. ; Bosch, J. ; Baltazar-Zamora, MA; Croche, R. ; Santiago-Hurtado, G. ; Landa-Ruiz, L. ; Mendoza-Rangel, JM; Bastidas, JM; Almeraya-Calderón, F. ; Bastidas, DM) Comportamiento a la corrosión de armaduras de acero inoxidable AISI 304 en hormigón ecológico ternario SCBA-SF expuesto a MgSO₄. Materiales 2020, 13, 2412. [CrossRef]
- RED DURAR. Evaluación de Inspección Manual y Evaluación de Corrosión en Estructura de Hormigón Armado; Programa CYTED: Río de Janeiro, Brasil, 1997.
- ASTM C39 C39M-18. Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón, estadounidense Sociedad de Ensayos y Materiales; ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2018.
- UNE 83988-2. Durabilidad del hormigón. Métodos de prueba. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Cuatro puntos o Método Wenner; Asociación Española de Normalización: Madrid, España, 2014.
- (Momayez, A. ; Ehsani, MR; Ramezani-pour, AA; Rajaie, H.) Comparación de métodos para evaluar el vínculo-Resistencia entre el sustrato de hormigón y los materiales de reparación. Cem. Concr. Res. 2005, 35, 748–757. [CrossRef]
- (Zhu, H. ; Zhang, D. ; Wang, T. ; Wu, H. ; Li, CV) Comportamiento mecánico y de autocuración de ingeniería baja en carbono. compuestos cementosos reforzados con fibras de PP. Constr. Construir. Mater. 2020, 259, 119805. [CrossRef]
- (Felekoglu, B. ; Tosun-Felekoglu, K. ; Ranade, R. ; Zhang, Q. ; Li, VC) Influencia de la fluidez de la matriz, el procedimiento de mezcla de fibras y las condiciones de curado en el rendimiento mecánico de HTPP-ECC. Compos. B. Ing. 2014, 6, 359–370. [CrossRef]
- (Yang, MI.; Li, CV) Optimización de fibrocemento de endurecimiento por deformación y adaptación de componentes mediante un modelo micromecánico. Constr. Construir. Mater. 2010, 24, 130-139. [CrossRef]
- (Pakravan, RH; Jamshidi, M. ; Latifi, M.) Estudio sobre el efecto de hibridación de fibras de cementosos de ingeniería compuestos con fibras poliméricas de bajo y alto módulo. Constr. Construir. Mater. 2016, 112, 739–746. [CrossRef]
- (Andrade, C. ; González, JA) Mediciones cuantitativas de la velocidad de corrosión de aceros de refuerzo in-crustados en hormigón utilizando medidas de resistencia a la polarización. Mater Corros. 1978, 29, 515-519. [CrossRef]

- (Provis, JL; Van Deventer,) JSJ Geopolímeros: estructuras, procesamiento, propiedades y aplicaciones industriales; CRC Prensa: Nueva York, NY, EE. UU., 2009.
- (Andrade, C .; Gulikers, J.) Avances en el modelado de la vida útil del hormigón; Springer: Dordrecht, Holanda, 2012.
- (Pedrosa, F .; Andrade, C.) Estudio de la variabilidad de la velocidad de corrosión en muestras de interior y exterior. En *Advances in Modeling Concrete Services Life*, Actas del IV Taller Internacional de Doctorado RILEM, Madrid, España, 19 de noviembre de 2012; Andrade, C., Gulikers, J., Eds .; RILEM Bookseries 3; Springer: Dordrecht, Países Bajos, 2012. [CrossRef]
- (Rebolledo, C .; Andrade, C.) Desde la velocidad de corrosión hasta la profundidad de corrosión acumulada o la pérdida en la sección transversal de las armaduras. En *Advances in Modeling Concrete Services Life: Proceedings of 4th International RILEM PhD Workshop*, Madrid, España, 19 de noviembre de 2012; Andrade, C., Gulikers, J., Eds .; RILEM Bookseries 3; Saltador: Dordrecht, Países Bajos, 2012. [CrossRef]
- (Andrade, C .; Sánchez, J .; Fulla, F .; Rebolledo, N .; Tavares, F.) Mediciones de la tasa de corrosión in situ: simulación 3D y valores representativos. *Mater. Corros.* 2012, 63, 1154–1164. [CrossRef]
- (Tomlinson, D .; Moradi, F .; Hajiloo, H .; Ghods, P .; Alizadeh, A .; Green, M.) Comportamiento de resistividad eléctrica en edades tempranas de varias mezclas de hormigón sujetas a ciclos de baja temperatura. *Cem. Concr. Comp.* 2017, 83, 323–334. [CrossRef]
- (Ferreira, RM; Jalali, S.) Mediciones NDT para la predicción de la resistencia a la compresión de 28 días. *NDT E. Int.* 2010, 43, 55–61. [CrossRef]
- (Wei, X.; Xiao, L .; Li, Z.) Predicción de la resistencia a la compresión estándar del cemento mediante la medición de resistividad eléctrica. *Constr. Construir. Mater.* 2012, 31, 341–346. [CrossRef]
- (Lübeck, A .; Gastaldini, ALG; Barin, DS; Siquiera,) HC Resistencia a la compresión y propiedades eléctricas del hormigón con cemento Portland blanco y escoria de alto horno. *Cem. Concr. Comp.* 2012, 34, 392–399. [CrossRef]
- (Medeiros, RA, Jr .; Lima, MG; Medeiros, MHF; Real, LV) Investigaçã o da resistênci a compressã o e da resistividade elêtrica de concretos com diferentes tipos de cimento. *Rev. ALCONPAT* 2014, 4, 116-132.
- (Dong, B .; Zhang, J .; Wang, Y .; Fang, G .; Liu, Y .; Xing, F.) Traza evolutiva para la hidratación temprana de la pasta de cemento mediante el método de resistividad eléctrica. *Constr. Construir. Mater.* 2016, 119, 16-20. [CrossRef]
- (Bem, DH; Lima, DPB; Medeiros, RA) Efecto de los aditivos químicos sobre la resistividad eléctrica del hormigón. *En t. J. Construir. Pathol. Adaptar.* 2018, 36, 174-187. [CrossRef]
- (Camioneta Noort, R .; Hambre, M .; Spiesz, P.) Coeficiente de migración de cloruro a largo plazo en hormigón a base de cemento de escoriay resistividad como método de prueba alternativo. *Constr. Construir. Mater.* 2016, 115, 746–759. [CrossRef]
- (Yim, H .; Lee, H .; Kim, J.) Evaluación del tiempo de fraguado del mortero mediante el uso de medidas de resistividad eléctrica. *Constr. Construir. Mater.* 2017, 146, 679–686. [CrossRef]
- (Hornbostel, K .; Larsen, K .; Gieker, M.) Relación entre resistividad del hormigón y velocidad de corrosión — Arevisión de literatura. *Cement Concrete Comp.* 2013, 39, 60–72. [CrossRef]
- (Mendoza-Rangel, JM; Flores-Jarquín, J .; De Los Santos, UE; Garcés, P.) Durabilidad de morteros dereparación sustentables expuestos a ambiente industrial. *Rev. ALCONPAT* 2016, 6, 41–51. [CrossRef]
- (Osio Norgaard, J .; Gevaudan, JP; Srubar III, WV) Una revisión del transporte de cloruro en cemento activado por álcalipasta, mortero y hormigón. *Constr. Construir. Mater.* 2018, 186, 191–206. [CrossRef]

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



(Sermeth, F .; Ozdemir, A.) Investigación del comportamiento de perforación del acero y fibra de polipropileno reforzados de hormigón bajo carga normal. *Procedia Eng.* 2016, 161, 458–645. [[CrossRef](#)]

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Patologías de Estructuras Reforzamiento estructural con muros de corte en el Centro Médico Tipo C denominado el Paraíso, ubicado en el Cantón Machala Provincia del Oro-Ecuador

T. Morocho

Área de Patología e Ingeniería Forense, T. M. LL Construcciones.

Autor de Contacto: alconpat-ecuador@hotmail.com

Resumen

Este artículo tiene como objetivo presentar y discutir brevemente la utilización de este tipo de refuerzo como son los muros de corte o muros de diafragmas en este tipo de estructuras esenciales como son los Centros Médicos tipo C, esta estructura se diseñó bajo el Código Ecuatoriano de la Construcción del 2011, se realizó un análisis Estructural con la NEC 2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015), la Norma Ecuatoriana de la Construcción pretende dar respuesta a la demanda de la sociedad en cuanto a la mejora de la calidad y la seguridad de las edificaciones, persiguiendo a su vez, proteger a la población y fomentar un desarrollo urbano sostenible. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios dando un aumento de vida y seguridad Estructural bajo los parámetros de la NEC 2015, cumpliendo los parámetros para este tipo de estructuras de importancia para la comunidad.

Palabras clave: Nec 2015, refuerzo, centro médico, población

Abstract

This article aims to present and briefly discuss the use of this type of reinforcement such as shear walls or diaphragm walls in this type of essential structures such as Type C Medical Centers, these structures were designed under the Ecuadorian Code of the Construction of 2011, a Structural analysis was carried out with the NEC 2015 (Ecuadorian Construction Norm 2015), the Ecuadorian Construction Norm aims to respond to the demand of society in terms of improving the quality and safety of the buildings, seeking in turn, protect the population and promote sustainable urban development. The results obtained were

very satisfactory, giving an increase in life and structural safety under the parameters of the NEC 2015, complying with the parameters for this type of structures of importance to the community.

Keywords: NEC 2015, reinforcement, medical center, population

1. Introducción

El proyecto se encuentra ubicado en la zona occidental de la ciudad de Machala de la parroquia del mismo nombre, Provincia de El Oro cuyas coordenadas geográficas (UTM). Norte; 616935.31. Este; 9641333.50, tiene un área de 7 200 m², abarcando las siguientes áreas:

- Consulta externa
- Imogeneología
- Laboratorio
- Emergencias
- Administración
- Rehabilitación
- Morgue
- Centro obstétrico
- Esterilización
- Farmacia
- Vestidores – vivienda de médicos
- Cuartos de maquinas
- Guardianía

Los beneficiarios directos del proyecto son, principalmente las poblaciones del sector vía la primavera, es decir, 35 500 personas aproximadamente, que pertenecen a un número promedio de cuatro miembros por familia (según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC). Por su parte, el TIPO C abarca todas las funciones que le corresponden al Tipo A y B, es decir, su propósito será satisfacer las necesidades que los otros dos tipos no pudieren solventar. La implantación de este modelo dependerá de la densidad poblacional y de la distancia que se hallare a cualquier otro servicio de salud de mayor complejidad.

2. Tipología estructural del Centro Médico denominado El Paraíso

Esta estructura ha tenido varias interrupciones en la ejecución y terminación del proyecto, siendo la última un abandono de 45 meses. Con estos antecedentes y el informe preliminar inicial realizado, más documentación encontrada, planos estructurales, datos de la característica del suelo, se procedió al análisis matemático para determinar el diagnóstico final del centro de salud y determinar qué tipo de Reforzamiento Estructural se utilizará para una terapia adecuada.

La estructura tiene una modulación de luces en la dirección X de: Ejes A-B=7.20; Eje B-C=7.20; Eje C-D=7.20; Eje D-E= 7.20; Eje E-F= 2.80; Eje F-G= 7.20; Eje G-H= 7.20; Eje H-I= 7.20 metros, en la dirección Y de: Ejes 1-2= 7.20; Eje 2-3= 7.20; Eje 3-4= 7.20; Eje 4-5= 7.20; Eje 5-5'= 0.45; Eje 5'-6= 2.95; Eje 6-7= 7.20; Eje 7-8= 7.20 metros.

La planta tiene una configuración estructural regular tanto en planta como en altura, cubierta inaccesible con varios desniveles, la edificación no dispone de un elevador mecánico (ascensor). La altura de entresijos es variable por los desniveles que existen, la estructura es de hormigón armado constituida por columnas de

hormigón armado, vigas peraltadas principales de hormigón armado, vigas secundarias de acero ASTM A36 tipo I de: 330X160X7.5X11.5mm y losa tipo Deck, tipo de uso: Edificaciones esenciales, centro de salud o de emergencia sanitaria NEC 2015, (NEC-SE-DS; Capítulo 4, Tabla 6).

2.1 Principales patologías encontradas

2.1.1 Patología en Cimentaciones.

Se realizaron calicatas para determinar el tipo de cimentación utilizados ya que no se disponía de información al respecto, se evidencio que la cimentación utilizada era plintos aislados de dimensión 1,80 x 1,80m y una altura de zapata de 15cm, y una Hf de fundación de 80cm

2.1.2 Patología en Contrapiso

El ataque de la vegetación sobre la estructura del “Centro Médico Tipo C El Paraiso” producido por el largo abandono que ha sufrido la estructura y la falta de mantenimiento del mismo, esta vegetación retiene el agua sobre la superficie del hormigón, conduciendo a la saturación del material y por lo tanto ha causado daños físicos por acción de ciclos de humedecimiento y secado produciendo fisuras de hasta 5mm en una gran área del contrapiso. Y las raíces de la vegetación causo daños mecánicos por penetración de raíces de plantas, arbustos y árboles a través de fisuras y puntos débiles, que al crecer generan fuerzas de expansión que incrementan el daño y el deterioro de la estructura.



Figura 1. Estado del Centro Médico abandonado durante 45 meses.



Figura 2. Realización de calicatas tanto en el Interior y Exterior de la Estructura.

2.1.3 Patologías en Columnas

Se aprecia manchas de color marrón producto del sangrado de la oxidación del acero de refuerzo, hay daños mecánicos en las columnas, se evidencia en algunos elementos juntas frías por el aumento de altura de las columnas, recubrimientos de 1 a 1.5cm, hay hormigueros en pocas columnas producto de la mala vibración en la fundición. Despostillamiento en esquinas de columnas por el mal desencofrado. Se observa columnas cortas por el cambio de nivel de cubiertas.

2.1.4 Patologías en Vigas

Se aprecia manchas de color marrón producto del sangrado de la oxidación del acero de refuerzo, no hay daños mecánicos en las vigas, se evidencia en algunos elementos juntas frías por la interrupción de la fundición de vigas,

2.1.5 Patologías en vigas Metálicas ASTM A 36

La protección que tiene las vigas Metálicas ASTM A36 ha impedido que el material manifieste patologías como es la corrosión, sin embargo, hay pocos elementos con inicio de oxidación la cual será tratada de forma técnica y materiales adecuados de protección.



Figura 3. Daños producidos en el contrapiso por ataque de la vegetación local.

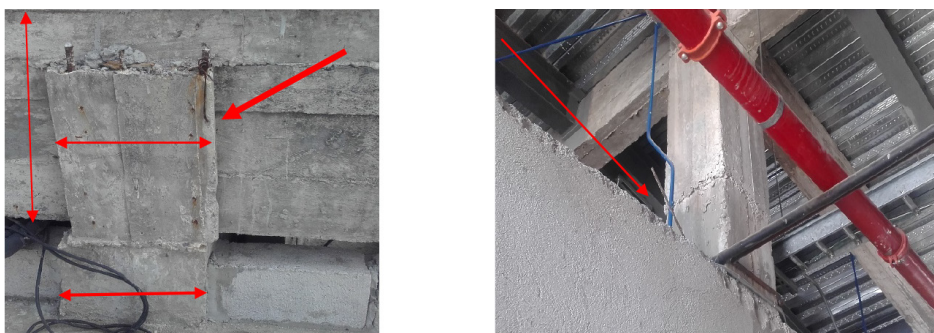


Figura 4. Falla en elementos estructurales, viga fuerte y columna débil, juntas frías.



Figura 5. Columna corta y daño mecánico en cabeza de columna y manchas de color marrón producto del sangrado de la oxidación del acero de refuerzo por el abandono producido.



Figura 6. Manchas en el hormigón en vigas y juntas frías, elementos de gran sección (viga fuerte y columna debil).



Figura 7. Vigas metálicas ASTM A36, no presenta manifestaciones Patologicas.

3. Desarrollo del trabajo analítico

Se realizó el análisis matemático del estado actual con la Norma Ecuatoriana de la Construcción para verificar si la estructura cumple con la norma vigente.

3.1 Cargas aplicadas

Tabla 1. Carga aplicadas al programa.

Piso	Cargas (ton/m ²)	
	L	PP
0	0	0
Terrazas inaccesibles	0.10	0.17

3.2 Ensayo de extracción de núcleos de hormigón



Figura 8. Extracción de núcleos en vigas y columnas bajo la norma ASTM C 39/C 42M, obtención y ensayo de núcleos (testigos) taladrados (extracción, preparación y ensayo).

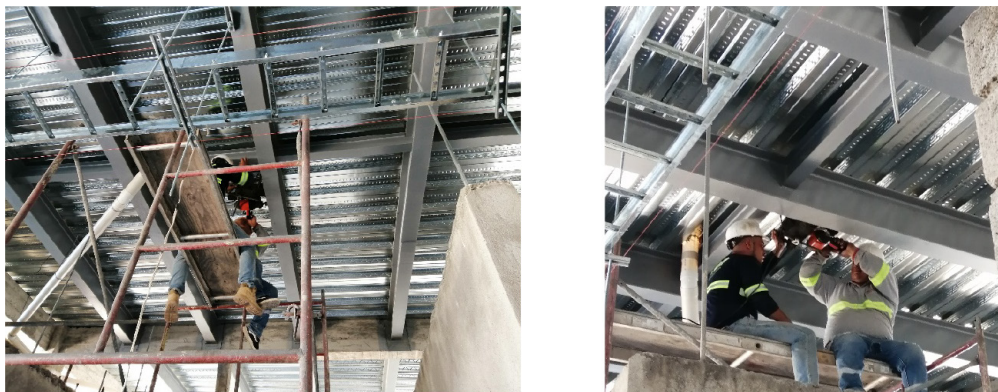


Figura 9. Ensayo de corrosión en acero ASTM A36.

3.2.1 Resultados de los ensayos

Dentro de los ensayos Destructivos se realizaron extracciones de núcleos (26) veinte y seis en total 13 en Vigas y 13 en Columnas, de acuerdo a la norma ASTM C42/C39 Método Normalizado de Ensayo de obtención y Ensayo de Núcleos cilíndricos de hormigón obtenidos a partir de estructuras existentes.

De la extracción de núcleos (26) se obtuvo resultados muy desfavorables (14) ya que el diseño del hormigón original indica un $F'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ (Fuente: diseño estructural del Centro Médico Tipo C El Paraíso), los otros 12 espécimen tomados nos sirvieron para los ensayos de acuerdo a las normas ASTM C42/C39, estos 12 especies extraídos no presentaban un hormigón homogéneo por tener cantos rodados que imposibilitaban a la realización de los ensayos, el promedio de resistencia de las 12 muestras es de un $F'c=180\text{kg/cm}^2$

Los ensayos de poro simetría por intrusión de mercurio se llevaron a cabo con un porosímetro modelo Autopore IV 9500, de Micromeritics, que opera hasta una presión 582 de 33.000 psi (228 MPa) y cuyo rango de medida de diámetro de poro es de 0,006 hasta 175 μm . Los ensayos se han efectuado de acuerdo con la norma ASTM D4404-84 (2004).

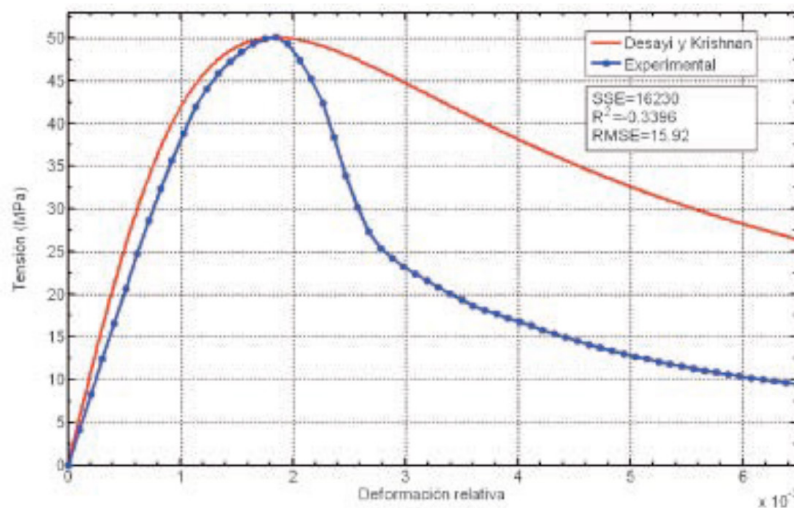


Figura 10. Comprobación entre los datos experimentales de las probetas M1 y la ecuación propuesta por Desayi y Krishnan.

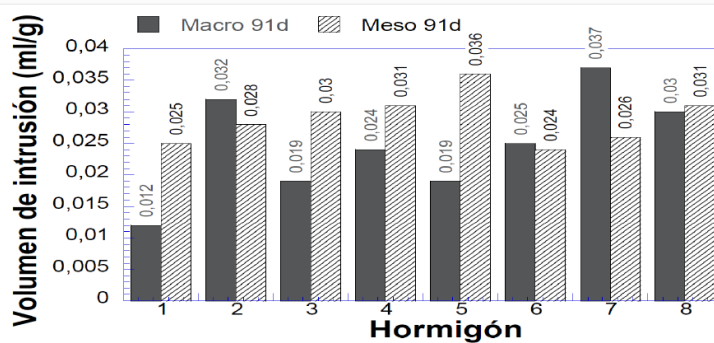


Figura 11. Distribución de Poros por Intrusión ensayados en los testigos extraídos.

Ensayo en el acero ASTM A36. Las características de la viga que se encuentra instaladas es Viga IPN de: 330x160x7.5x11.5.

Se realizaron tres muestras aleatorias en las Vigas Metálicas en las cuales se recopiló los datos de las propiedades más importantes del Acero ASTM A36 en este proyecto las cuales son, (Ver tabla 2).

Tabla 2. Datos de las propiedades del acero ASTM A36 del proyecto Centro de Salud El Paraíso.

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	7850	Kg/m ³
Límite de fluencia	32-36 (250-280)	Ksi (Mpa)
Resistencia a la tensión	58-80 (400-550)	Ksi (Mpa)
Módulo de Elasticidad	29000	Ksi
% de Elongación Mínimo	20	%
Punto de fusión	1538	°C

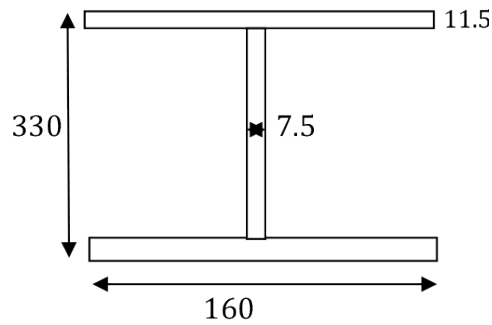


Figura 12. Geometría de la Viga IPN instalada en los Centros Médicos Tipo C.

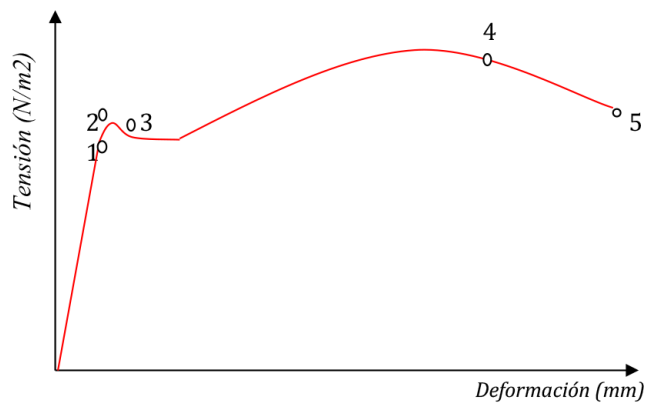


Figura 13. Diagrama, Desplazamiento -tensión aplicada.

Ensayo de Corrosión. Con los ensayos realizados en laboratorio en las tres muestras extraídas del Acero ASTM A36, no se evidencia corrosión primeramente en la capa superficial y posteriormente en el resto.

3.2.2 Análisis de la estructura en el estado actual bajo la norma NEC 2015

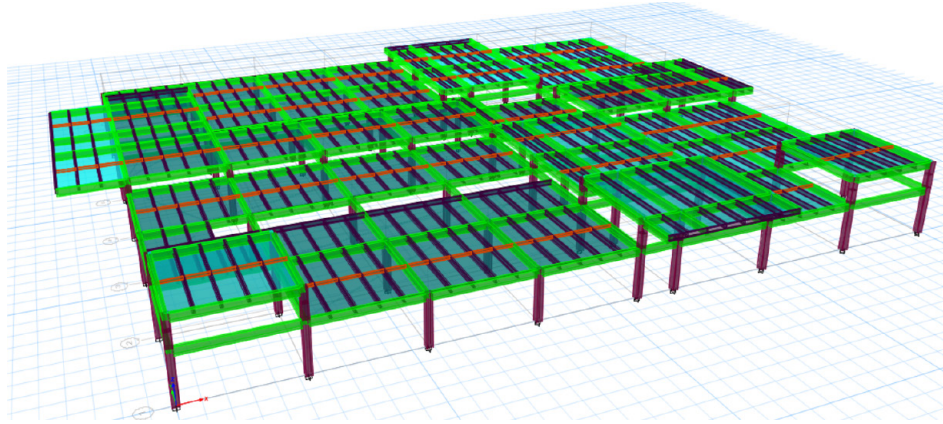


Figura 14. Modelación de la estructura actual.

3.2.3 Especificaciones Técnicas

- Hormigón $F'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ en todos los elementos estructurales (Fuente Planos Estructurales)
- Hierro Corrugado, $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- Módulo de elasticidad del hormigón $15100\sqrt{f'c}$
- El sistema estructural comprende: Plintos aislados, cadenas de amarre, vigas peraltadas, columnas de hormigón armado, vigas principales metálicas de $330 \times 160 \times 7.5 \times 11.5 \text{ mm}$, vigas secundarias metálicas de: $180 \times 91 \times 5.3 \times 8 \text{ mm}$ y losa conformada por losa Deck
- El diseño es de varios niveles en altura con terrazas inaccesibles
- Tipo de suelo (Tipo D). (Cimentación directa fuente: análisis de suelo: Informe geotécnico). Código. NEC-SE-DS capítulo 3 subcapítulo 3.2.

Fa= 1.20

Fd= 1.19

Fs= 1.28

To= 0.13

Tc= 0.70

- Tipo de uso= Edificaciones Esenciales con un coeficiente de 1.5. Código. NEC-SE-DS. Capítulo 4

Se observa que el periodo fundamental de vibración supera a lo que indica el código NEC 2015, por lo tanto, hay que rigidizar la Estructura.

ESPECTRO DE ACCELERACIÓN NEC 2015 (NEC-SE-DS) REFORZAMIENTO DEL CENTRO DE SALUD DENOMINADO EL PARAISO CÁLCULO DE LAS FUERZAS LATERALES DE ACUERDO AL MÉTODO ESTÁTICO				COEFICIENTES DEL PERFIL DEL SUELO																																																																																																																																				
1. FACTOR DE ZONA SISMICA (Z)				Zona sísmica	MACHALA	Sec 10.2																																																																																																																																		
				Costa	V	Sec 3.1.1																																																																																																																																		
				Z=	0,4																																																																																																																																			
2. TIPO DE USO DE LA EDIFICACIÓN				Factor de importancia:	Edificaciones esenciales																																																																																																																																			
				I=	1,50	Sec 4.1																																																																																																																																		
3. TIPO DE SUELO				Perfil de suelo tipo=	D	Sec 3.2.1																																																																																																																																		
4. CONFIGURACION ESTRUCTURAL				Configuración	Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras																																																																																																																																			
				Ct=	0,055	Sec 6.3.3																																																																																																																																		
				α=	0,75																																																																																																																																			
				Altura máxima de la edificación	hn=	5,50	m																																																																																																																																	
5. PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN				$T = C_p h_n^{\alpha}$																																																																																																																																				
				Periodo calculado	TN -NEC2015=	0,2002	seg																																																																																																																																	
				Periodo calculado del ETABS	TN-ETABS=	0,3640	seg																																																																																																																																	
				Maximo=1.30	%Variación	1,82	No Pasa																																																																																																																																	
				Rigidizar la Estructura																																																																																																																																				
				<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">TIPO DE ESTRUCTURAS</th> <th>Ct=</th> <th>α=</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Pórticos de hormigón sin muros ni diagonales</td> <td>0,055</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Pórticos de hormigón con muros o diagonales</td> <td>0,055</td> <td>0,75</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estructuras de acero sin arriostramiento</td> <td>0,072</td> <td>0,8</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estructuras de acero con arriostramiento</td> <td>0,073</td> <td>0,75</td> </tr> </tbody> </table>							TIPO DE ESTRUCTURAS		Ct=	α=	Pórticos de hormigón sin muros ni diagonales		0,055	0,9	Pórticos de hormigón con muros o diagonales		0,055	0,75	Estructuras de acero sin arriostramiento		0,072	0,8	Estructuras de acero con arriostramiento		0,073	0,75																																																																																																										
TIPO DE ESTRUCTURAS		Ct=	α=																																																																																																																																					
Pórticos de hormigón sin muros ni diagonales		0,055	0,9																																																																																																																																					
Pórticos de hormigón con muros o diagonales		0,055	0,75																																																																																																																																					
Estructuras de acero sin arriostramiento		0,072	0,8																																																																																																																																					
Estructuras de acero con arriostramiento		0,073	0,75																																																																																																																																					
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Zona sísmica</th> <th>Factor z</th> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V</th> <th>VI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Suelo</td> <td>0,15</td> <td>0,25</td> <td>0,3</td> <td>0,35</td> <td>0,4</td> <td>>0,5</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="5">Fa</td> <td>A</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1,4</td> <td>1,3</td> <td>1,25</td> <td>1,23</td> <td>1,2</td> <td>1,18</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1,6</td> <td>1,4</td> <td>1,3</td> <td>1,25</td> <td>1,2</td> <td>1,12</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>1,8</td> <td>1,4</td> <td>1,25</td> <td>1,1</td> <td>1</td> <td>0,85</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">Fd</td> <td>A</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1,36</td> <td>1,28</td> <td>1,19</td> <td>1,15</td> <td>1,11</td> <td>1,06</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1,62</td> <td>1,45</td> <td>1,36</td> <td>1,28</td> <td>1,19</td> <td>1,11</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>2,1</td> <td>1,75</td> <td>1,7</td> <td>1,65</td> <td>1,6</td> <td>1,5</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">Fs</td> <td>A</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> <td>0,75</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0,85</td> <td>0,94</td> <td>1,02</td> <td>1,06</td> <td>1,11</td> <td>1,23</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1,02</td> <td>1,06</td> <td>1,11</td> <td>1,19</td> <td>1,28</td> <td>1,4</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>1,5</td> <td>1,6</td> <td>1,7</td> <td>1,8</td> <td>1,9</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>							Zona sísmica	Factor z	I	II	III	IV	V	VI	Suelo	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	>0,5		Fa	A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	B	1	1	1	1	1	1	C	1,4	1,3	1,25	1,23	1,2	1,18	D	1,6	1,4	1,3	1,25	1,2	1,12	E	1,8	1,4	1,25	1,1	1	0,85	Fd	A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	B	1	1	1	1	1	1	C	1,36	1,28	1,19	1,15	1,11	1,06	D	1,62	1,45	1,36	1,28	1,19	1,11	E	2,1	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5	Fs	A	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	B	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	C	0,85	0,94	1,02	1,06	1,11	1,23	D	1,02	1,06	1,11	1,19	1,28	1,4	E	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2		
Zona sísmica	Factor z	I	II	III	IV	V	VI																																																																																																																																	
Suelo	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	>0,5																																																																																																																																		
Fa	A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9																																																																																																																																	
	B	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																	
	C	1,4	1,3	1,25	1,23	1,2	1,18																																																																																																																																	
	D	1,6	1,4	1,3	1,25	1,2	1,12																																																																																																																																	
	E	1,8	1,4	1,25	1,1	1	0,85																																																																																																																																	
Fd	A	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9																																																																																																																																	
	B	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																	
	C	1,36	1,28	1,19	1,15	1,11	1,06																																																																																																																																	
	D	1,62	1,45	1,36	1,28	1,19	1,11																																																																																																																																	
	E	2,1	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5																																																																																																																																	
Fs	A	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75																																																																																																																																	
	B	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75																																																																																																																																	
	C	0,85	0,94	1,02	1,06	1,11	1,23																																																																																																																																	
	D	1,02	1,06	1,11	1,19	1,28	1,4																																																																																																																																	
	E	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2																																																																																																																																	

Figura 15. Análisis estático lineal. NEC 2015 (NEC-SE-DS).

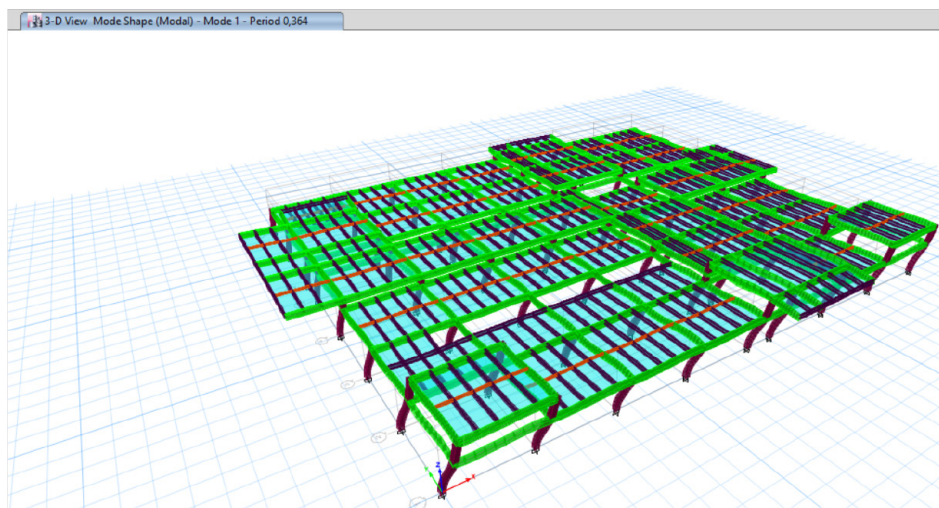


Figura 16. Periodo fundamental de vibración 0,364.

- IX Congreso Nacional ALCONPAT
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

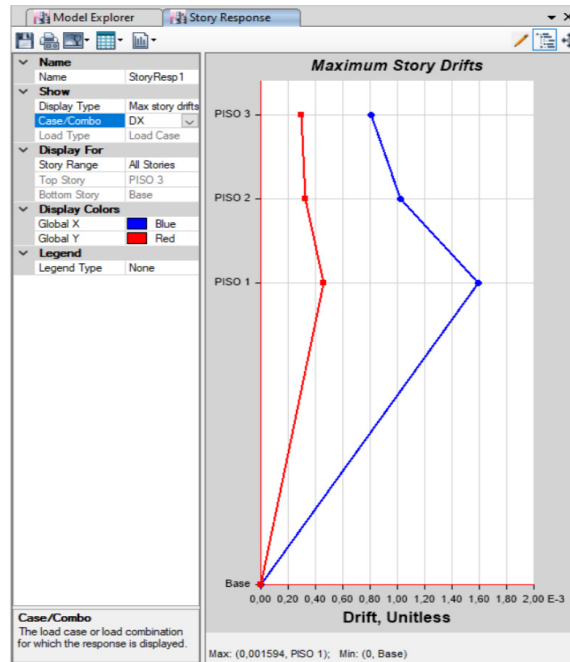


Figura 17. Deriva de piso DINÁMICO EN X= $0,001596 \times 0,75 \times 8 = 0,006 \times 100 = 6\%$.

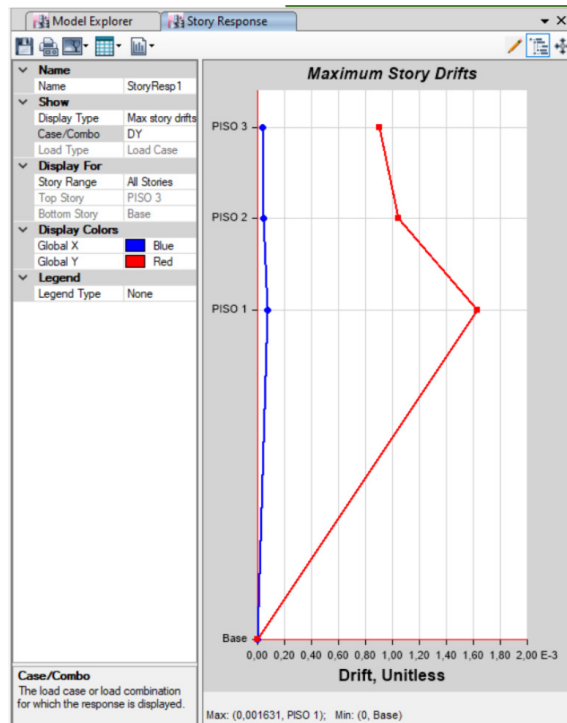


Figura 18. Deriva de piso DINÁMICO EN Y= $0,001631 \times 0,75 \times 8 = 0,009 \times 100 = 9\%$.

Como se observa las derivas de piso no cumple con lo indicado en el código NEC 2015, los valores máximos son del 2% de las derivas de piso.

3.2.4 Análisis matemático con el Reforzamiento Estructural propuesto.

Con los ensayos realizados en la estructura del Centro Médico Tipo C denominado el Paraíso y las múltiples patologías encontradas (documento completo contractual del proceso) se tomó la decisión de utilizar muros de corte en varios sectores de la estructura como se demuestra a continuación.

Se observa claramente que, con los muros de corte el periodo fundamental de vibración cumple con lo dispuesto en la NEC 2015

Tabla 3. abla 7 de la NEC-SE-DS, Capítulo 4 apéndice 4.2.2.

Estructuras de:	Δ_m máxima (sin unidades)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02 = (2%)
De mampostería	0.01 = (1%)

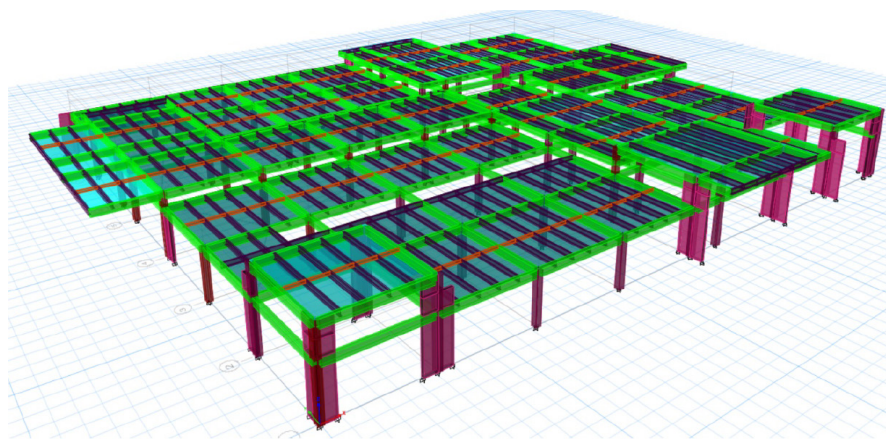


Figura 19. Modelación de la estructura con los muros de corte.

ESPECTRO DE ACELERACIÓN NEC 2015 (NEC-SE-DS) REFORZAMIENTO DEL CENTRO DE SALUD DENOMINADO EL PARAISO CÁLCULO DE LAS FUERZAS LATERALES DE ACUERDO AL MÉTODO ESTÁTICO			
1. FACTOR DE ZONA SISMICA (Z)			
Zona Sísmica	MACHALA	Sec 10.2	
Costa	V	Sec 3.1.1	
Z=	0,4		
2. TIPO DE USO DE LA EDIFICACIÓN			
Factor de Importancia:	Edificaciones esenciales		
I=	1,50	Sec 4.1	
3. TIPO DE SUELO			
Perfil de suelo tipo=	D	Sec 3.2.1	
4. CONFIGURACION ESTRUCTURAL			
Configuración	Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras		
Ct=	0,055	Sec 6.3.3	
α=	0,75		
Altura máxima de la edificación			
hn=	5,60	m	
5. PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN			
$T = C_t h_n^{0.9}$			
Periodo calculado	TN -NEC2015=	0,2002	seg
Periodo calculado del ETABS	TN-ETABS=	0,1810	seg
Maximo=1,30	%Variación	0,90	Ok
6. CÁLCULO DE ACELERACIÓN			
$T_o = 0.10 * F_s * \frac{F_d}{F_a}$		$T_c = 0.55 * F_s * \frac{F_d}{F_a}$	
NEC 2015		ESTUDIO DE SUELOS	
F _s =	1,20	F _s =	1,2
F _d =	1,19	F _d =	1,19
F _s =	1,28	F _s =	1,28
T _o =	0,13	T _c =	0,13
T _c =	0,70	T _c =	0,70
$S_a = \eta * Z * F_a$		PARA $0 \leq T \leq T_c$	
$S_a = \eta * Z * \left(\frac{T_c}{T}\right)^r$		PARA $T \geq T_c$	
η=	1,80		
r=	1		
S _a =	0,8640		Sec. 3.3.1

Figura 20. Análisis estático lineal.

Derivas de Piso (Dinámicos en X y en Y)

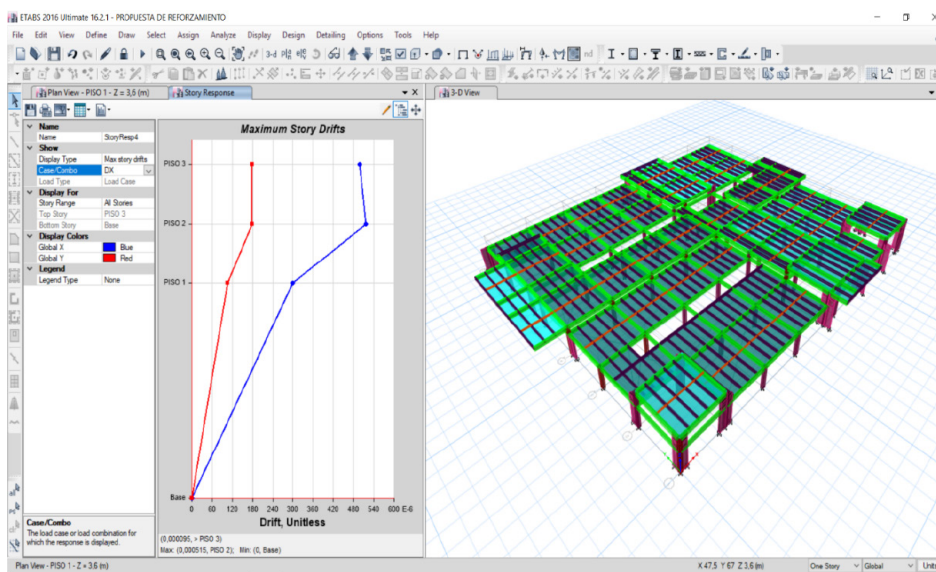


Figura 21. Deriva de piso DINÁMICO $X = 0.75 \times 8 \times 0.000515 = 0.00309 \times 100 = 0.309\%$ "OK" < 2%.

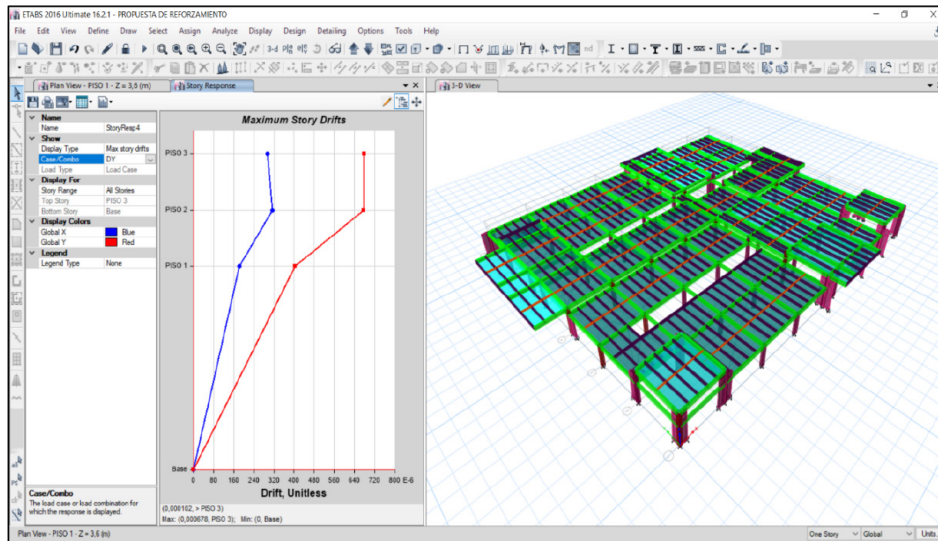


Figura 22. Deriva de piso DINÁMICO $Y = 0.75 \times 8 \times 0.000678 = 0.004068 \times 100 = 0.4068\%$ “OK” < 2%.

Las derivas de piso cumplen a satisfacción en los sentidos X y sentido Y, muy por debajo del 2 por ciento que exige la norma NEC-SE-DS, Capítulo 4 apéndice 4.2.2

4. Reforzamiento estructural

Con los estudios realizados y aprobados por la entidad contratante se procedió a la ejecución del Reforzamiento Estructural con las técnicas adecuadas y el personal calificado para el Centro Médico Tipo C denominado El Paraíso.



Figura 23. Reforzamiento con muros de corte en varios ejes de la estructura.



Figura 24. Proceso de Encamisado de columnas en varias columnas donde las cargas son más críticas.



Figura 25. Colocación del Acero de Refuerzo.



Figura 26. Ampliación del área de cimentación.

5. Resultados y discusiones

Con los ensayos realizados y análisis con la NEC 2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015), se logró aumentar la vida útil y dar seguridad Estructural bajo los parámetros del NEC 2015. El propósito fue incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras, que por sus características de utilización o de importancia deben permanecer operativas o sufrir menores daños durante y después de la ocurrencia del sismo de diseño de 10 % de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0,50 g de los valores de aceleración sísmica en roca.

Con la incorporación de los muros de corte y los encamisados en columnas, se corrigió las derivas de piso al 0.30% en DX y 0,40 en Dy, la estructura no presenta torción en planta,

Para la protección del acero, se protegió con un inhibidor de Corrosión por migración aplicado directamente previa a una limpieza con hidro lavado a una presión de 3600 psi a todos los elementos estructurales.

En lo que respecta a la cimentación, esta se aumentó las dimensiones y la altura de la zapata en columnas donde la carga era la máxima que llegaba a la cimentación.

Se diseño un hormigón de $F'c=280 \text{ Kg/cm}^2$ a los 28 días para todos los elementos de reforzamiento esto es: Muros de corte, encamisados de columnas y ampliación de la cimentación

Se cumplió con toda la normativa de la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC 2015), como son: NEC-SE-HM; NEC-SE-DS; NEC-SE-CG;

Los despostillamientos en esquinas de vigas y columnas se corrigieron con un mortero estructural de las mismas características de resistencia que el hormigón.



Figura 27. Proceso de terminación del Centro Medico Tipo C denominado El Paraíso, Estructura reforzada con muros de corte y encamisado de columnas.

6. Conclusión

La incorporación de muros de corte y encamisados de columnas en los ejes de mayores solicitaciones ocasiono que la estructura tenga respuestas muy favorables ante el diseño sismorresistente.

Se prolongó la vida útil de servicio de la estructura a largo plazo con la intervención del reforzamiento estructural.

Las derivas de piso son muy conservadores frente a las derivas de piso iniciales.

7. Referencias

- Norma Ecuatoriana de la Construcción, (2015) “Código NEC-SE-DS” ,2015
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, (2015) “Código NEC-SE-HM” ,2015
- T, Morocho, (2019) “Archivo fotográfico propiedad del Ing. Tomás Morocho”, 2019
- T, Morocho, (2018) “Notas de campo”, 2019

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Evolución de la corrosión en traveses de concreto reforzado bajo ciclos de mojado y secado: Efecto del diámetro del acero de refuerzo a tensión

N. Vega¹, J. Moreno¹, P. Castro Borges², J. Varela¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida

Autor de Contacto: joel.moreno@correo.uady.mx

Resumen

Se evaluó la evolución de la corrosión en traveses de concreto reforzado (CR) sometidas a cargas sostenidas. Se construyeron 8 traveses a escala natural, 4 con acero de refuerzo longitudinal (AR) a tensión de 10 mm de diámetro y 4 con AR de 13 mm de diámetro. 4 de las traveses fueron expuestas a ciclos de secado y mojado con una solución al 3.5% de cloruro sódico. Se midió el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto. Con base en los resultados obtenidos se encontró que; en traveses sin corrosión no se observaron diferencias entre los parámetros medidos. En las traveses sometidas a corrosión, se observó una mayor corrosión activa para aquellas con AR de mayor diámetro. Lo anterior está asociado a un mayor agrietamiento.

Palabras clave: Corrosión; concreto reforzado; diámetro del acero; agrietamiento; parámetros electroquímicos.

Abstract

The evolution of corrosion in reinforced concrete (RC) beams subjected to sustained loads was evaluated. 8 full-scale beams were built, 4 with 10 mm diameter tension longitudinal reinforcing steel (RS) and 4 with 13 mm diameter RS. 4 of the beams were exposed to drying and wetting cycles with a 3.5% sodium chloride solution. The corrosion potential, the corrosion rate and the electrical resistivity of the concrete were measured. Based on the results obtained, it was found that; In beams without corrosion, no differences were observed between the measured parameters. In the beams subjected to corrosion, a greater active corrosion was observed for those with RS of greater diameter. This is associated with greater cracking.

Keywords: Corrosion; reinforced concrete; steel diameter; cracking; electrochemical parameters.

Resumo

Foi avaliada a evolução da corrosão em vigas de concreto armado (CA) submetidas a cargas sustentadas. Foram construídas 8 vigas em escala real, 4 com armadura longitudinal de tensão de 10 mm de diâmetro (A) e 4 com 13 mm de diâmetro A. 4 das vigas foram expostas a ciclos de secagem e molhamento com solução de cloreto de sódio 3,5%. Foram medidos o potencial de corrosão, a taxa de corrosão e a resistividade elétrica do concreto. Com base nos resultados obtidos, constatou-se que; Em vigas sem corrosão, não foram observadas diferenças entre os parâmetros medidos. Nas vigas submetidas à corrosão, observou-se maior corrosão ativa para aquelas com RS de maior diâmetro. Isso está associado a maior fissuração.

Palavras-chave: Corrosão; concreto reforçado; diâmetro do aço; rachaduras; parâmetros eletroquímicos.

1. Introducción

En la actualidad, el sistema estructural más utilizado en el mundo es a base de elementos de concreto reforzado (CR), con una producción mundial de 11,000 millones de metros cúbicos por año (Ceballos, 2016). La causa más común en el deterioro del CR es la corrosión en el acero de refuerzo (AR). Esto da lugar a una secuencia de eventos debidos al incremento de volumen asociado con la transformación del acero en óxido. Debido a esto se generan esfuerzos de tensión dentro del concreto que lo rodea, causando agrietamientos y eventualmente desprendimiento del recubrimiento del concreto (Yingshu *et al.*, 2007). Uno de los factores que determina el fenómeno de corrosión en las estructuras es el tipo de ambiente al cual están expuestas. Si estas se encuentran en zonas marinas o cercanas a las costas se tendrán intrusiones de NaCl provenientes del mar; por otro lado, si estas se ubican en zonas industriales o en concentraciones de poblaciones se tendrá otro tipo de contaminantes como SO₂ o CO₂ entre los más importantes (Chávez, 2010). La evaluación de estructuras de CR, general, se realiza aplicando técnicas no destructivas. Entre estas la más aplicada es a base de medición por parámetros electroquímicos.

Las trabes de CR son elementos estructurales capaces de soportar los momentos internos y fuerzas cortantes provocados por las acciones impuestas y su peso propio. Su resistencia mecánica depende de la cantidad de AR suministrado, la ubicación del AR, la forma de la sección transversal y el tipo de concreto utilizado. Dichos sistemas son diseñados ante dos estados límite conocidos como servicio y falla; el primero está asociado a una función adecuada de la estructura donde se eviten los efectos por desplazamientos, agrietamientos y vibraciones; y el segundo, de ser alcanzado, puede ocasionar el colapso parcial o total del elemento. Dependiendo de la magnitud de las acciones que se impongan a estos elementos se pueden alcanzar los estados límite mencionados, los cuales, debido a la poca resistencia a tensión del concreto pueden generar los esfuerzos necesarios para agrietar al elemento. Dichos agrietamientos favorecen la intrusión de agentes agresivos externos al AR lo cual pone en riesgo la durabilidad de la estructura.

De una revisión de la literatura se encontró que se han realizado numerosos estudios que evalúan el comportamiento de elementos de CR con corrosión. Algunas de las variables más estudiadas han sido: el nivel de corrosión (Gu *et al.*, 2010; Hailong *et al.*, 2018), el diámetro de las barras de AR (Gu *et al.*, 2010; Ponce, 2018; Shamsad, 2017; Suvash y Gideon, 2017), la aplicación de cargas sostenidas (Ballim y Reid, 2003; Hailong *et al.*, 2018; Visairo, 2016); el efecto del ancho de grieta en la corrosión (Arya y Ofori, 1996; Faiz, 2018; Jiménez y Montes, 2017; Yingshu *et al.*, 2007) y la técnica de inducción de corrosión (Gu *et al.*, 2010; Hailong *et al.*, 2018; Yingshu *et al.*, 2007).

En la mayoría de estas investigaciones, las dimensiones, la cantidad y distribución del AR de las traves estudiadas son diferentes a las utilizadas en la práctica común (Arya y Ofori, 1996; Ballim y Reid, 2003; Jiménez y Montes, 2017; Shamsad, 2017; Suvash y Gideon, 2017; Yingshu *et al.*, 2007) por lo que su comportamiento mecánico será diferente a lo esperado en la realidad. Existen pocas investigaciones en donde se someten a los especímenes a cargas sostenidas. Para dichos casos se observó una propagación de la corrosión en zonas con mayor cantidad de grietas asociadas a la aplicación de las cargas (Hailong *et al.*, 2018; Ponce, 2018; Suvash y Gideon, 2017; Yingshu *et al.*, 2007). Por lo tanto, a diferencia de los estudios de traves de CR sin cargas sostenidas, en estos casos se puede estudiar la cinemática de la corrosión a través de los poros y en los agrietamientos. Se ha estudiado el efecto del agrietamiento en la corrosión del AR en traves de CR. En estas investigaciones se ha observado que la corrosión genera esfuerzos radiales en el AR por la transformación del acero en óxido, lo que propaga la aparición de grietas horizontales que facilitan el acceso de agentes agresivos (Hailong *et al.*, 2018; Yingshu *et al.*, 2007). Las técnicas de corrosión más utilizadas fueron mediante corrosión natural, corrosión por corriente impresa y corrosión por ciclos de mojado y secado. La técnica que mejor representa a la corrosión natural es mediante de ciclos de mojado y secado (Hailong *et al.*, 2018).

Por lo tanto, para complementar el conocimiento sobre el comportamiento de traves de CR afectadas con corrosión, se requiere estudiar elementos a escala natural, bajo cargas sostenidas que representen las condiciones de servicio de la estructura y utilizando técnicas que generen características similares a la corrosión natural. Lo anterior permitirá establecer relaciones entre los parámetros utilizados para evaluar la corrosión en estructuras y su comportamiento mecánico. El objetivo de este trabajo es evaluar la evolución de la corrosión en traves de CR sometidas a cargas sostenidas.

2. Metodología

2.1 Diseño y construcción de traves de concreto reforzado

Para el diseño de las traves se seleccionaron dos diámetros de AR longitudinal a tensión, 10 mm y 13 mm. Se consideraron dimensiones de traves de 15 cm x 30 cm x 350 cm (base x peralte x longitud). Se consideró una resistencia a compresión axial de diseño del concreto de 280 kg/cm². La resistencia a la fluencia promedio del AR longitudinal fue de 4532 kg/cm². La resistencia nominal a fluencia del AR transversal fue de 2320 kg/cm². El diseño por flexión se realizó utilizando las hipótesis fundamentales de flexión. En cual se utilizaron los modelos constitutivos propuestos por Rodríguez y Botero (1997) y Kent y Park (1971) para el acero de refuerzo a flexión y concreto, respectivamente. El diseño por cortante se realizó con base en los requisitos establecidos en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-2004). Se seleccionó la cantidad de AR por flexión y cortante necesario para garantizar la falla por flexión. Las cantidades de acero y la distribución del AR longitudinal y transversal de las traves se presenta en la figura 1.

Se construyeron 8 traves de concreto reforzado. Durante la construcción de dichas traves, las barras del AR longitudinal a compresión y el AR transversal se recubrieron con esmalte alquidálico (aislante electroquímico). Se utilizaron sujetadores de plástico para unir el acero de refuerzo transversal al longitudinal. Se colocó cinta aislante en cada zona de contacto entre el refuerzo longitudinal, el acero de refuerzo transversal y los sujetadores de plástico (figura 2). Dichas precauciones fueron necesarias para aislar electroquímicamente el AR longitudinal a compresión y el AR transversal (León, 2017). Posteriormente para estudiar los efectos de corrosión en traves de CR, se construyó una cámara de corrosión (figura 3).

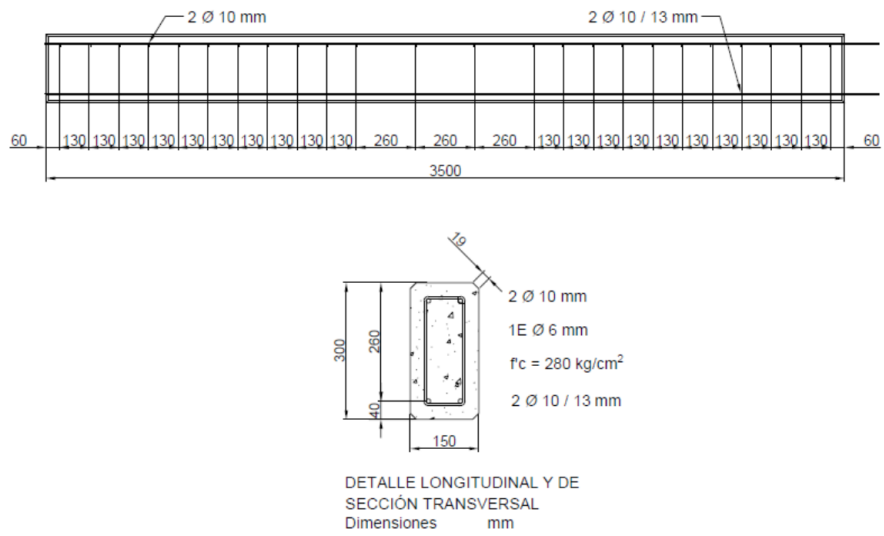


Figura 1. Cantidades y distribución del AR en traves.



Figura 2. Aislamiento de AR longitudinal del transversal.



Figura 3. Cámara de corrosión.

2.2 Aplicación de cargas de servicio sostenidas

Se aplicaron cargas constantes a las trabes mediante un sistema de cargas en cuatro puntos. Para poder registrar las curvas carga-desplazamiento de las trabes de CR, en una primera etapa se aplicaron cargas incrementales hasta la carga de servicio establecida. Las cargas se aplicaron con un actuador hidráulico a una edad de 150 días con respecto a la construcción de las trabes. Se midieron las cargas y los desplazamientos verticales mediante una celda de carga y potenciómetros lineales. Posteriormente, las cargas se aplicaron mediante barras roscadas tensionadas y apoyos de acero (figura 4). La tensión en las barras se aplicó por medio de actuadores hidráulicos hasta generar el 60 % de la carga asociada al momento de fluencia de las trabes. Este sistema de carga garantiza una zona de cortante nulo y flexión pura en el centro de la trabe. Se verificó de manera periódica la conservación de dicha carga sostenida.

2.3 Proceso de corrosión acelerada

A cuatro de las trabes se les aplicó una técnica de corrosión acelerada; dos con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y dos con AR longitudinal de 13 mm de diámetro. El proceso de corrosión acelerada consistió en ciclos de mojado y secado con una solución al 3.5 % de cloruro sódico. Aplicando ciclos de 4 horas de mojado y 20 horas de secado. Dicho proceso se comenzó a los 1100 días con respecto a la construcción de las trabes.

2.4 Medición de parámetros electroquímicos

Se midieron parámetros asociados a la evolución de la corrosión (parámetros electroquímicos). Tales como; el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto. Las mediciones se realizaron semanalmente utilizando un Potenciostato/Galvanostato (Gecor6) figura 5. Se tomaron lecturas a los centros y a los extremos en ambas caras de cada trabe.

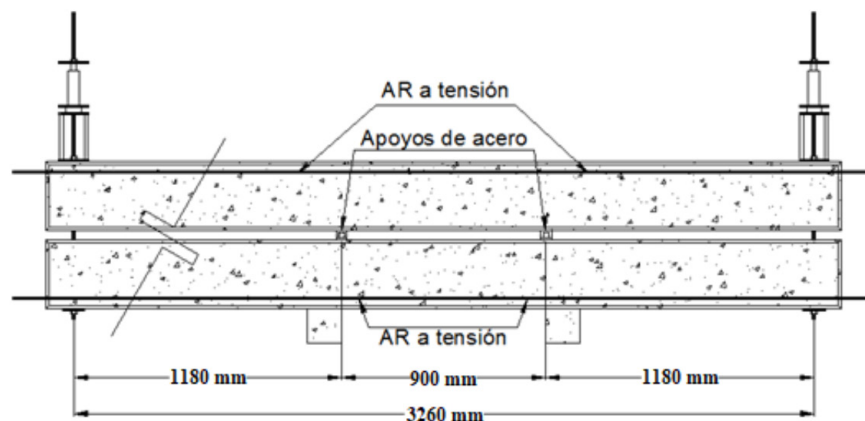


Figura 4. Sistema de cargas sostenidas.



Figura 5. Corrosímetro comercial (Gecor 6).

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados en las mediciones de potenciales de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad eléctrica del concreto desde el periodo de estabilización (día 950) en el cual las traves de CR permanecieron sin agresión del ambiente. Las traves sin corrosión (CN) con AR de 10 mm de diámetro fueron representadas con la nomenclatura T3 y T4; y para las traves con AR de 13 mm con T11 y T12. Las traves con corrosión (CS) con AR de 10 mm de diámetro con la nomenclatura T7 y T8; para las traves con AR de 13 mm con T15 y T16.

3.1 Potencial de corrosión

En la Figura 6 se presentan las gráficas de potencial de corrosión (E_{corr}) – Tiempo medidos al centro del claro de las traves con y sin corrosión. Se presentan los potenciales obtenidos, calculados como el promedio de las dos caras laterales de cada trave. Se observó que hasta el comienzo del proceso de corrosión acelerada (día 1100) la probabilidad de corrosión fue del 10 % (-125 mV) NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016). A partir del día 1230 se observó en las traves bajo corrosión acelerada un incremento en el potencial de corrosión (-225 mV). Este desfase de 130 días está relacionado con el proceso requerido para despasivar al AR. Esto está asociado al incremento de la humedad en las zonas agrietadas, facilitando la intrusión de cloruros hacia la capa pasiva que protege al AR, la cual es destruida de manera paulatina hasta dejar al AR desprotegido permitiendo que inicie el proceso de corrosión. Para el caso de las traves de referencia la probabilidad de corrosión permaneció en un 10 % (-115 mV). Esto se debe a la falta de interacción de algún agente agresivo que active el proceso de corrosión. Para el final del periodo de investigación (día 1450) la probabilidad de corrosión en traves bajo corrosión acelerada se incrementó al 95 % (-525 mV). Por otro lado, las traves de referencia permanecieron con una probabilidad de corrosión del 10% (-105 mV). Para traves bajo corrosión acelerada no se observaron diferencias entre las probabilidades de corrosión medidas en AR de 10 y 13 mm de diámetro. Esto puede estar asociado al proceso de inducción de corrosión, el cual fue aplicado de manera uniforme en todas las traves, lo cual implica que debe existir una cantidad similar de humedad sobre la superficie del concreto provocando lecturas similares en el potencial de corrosión. Se observó que para traves de referencia con AR de 13 mm de diámetro la probabilidad de corrosión fue mayor. Esto está asociado a que en traves con AR de 13mm existe un mayor volumen inicial de grietas. Dicha diferencia entre volumen de grietas está asociado a la cantidad de AR longitudinal a tensión en las traves, ya que si se aumenta dicha cantidad de AR y se mantiene un mismo nivel de carga sostenida (60 % del esfuerzo de fluencia del AR), se producirá una mayor fuerza de tensión en el AR. Lo anterior genera que la posición del eje neutro se aleje del AR longitudinal a tensión. Por lo tanto, la longitud de las grietas será mayor.

En la figura 7 se observa un comportamiento similar para los promedios de potenciales de corrosión medidos en los extremos. En general se observó que la mayor probabilidad de corrosión se encuentra en los centros de los claros de las trabes. Esto está asociado a que en los centros de los claros de las trabes se encuentra el mayor volumen de grietas, las cuales facilitan la intrusión de agentes externos. Por lo que la presencia de estas tiene el efecto de incrementar la probabilidad de corrosión en trabes de CR.

3.2 Velocidad de corrosión

En la figura 8 se presentan los promedios de velocidades de corrosión – Tiempo medidos al centro del claro de las trabes para trabes con y sin corrosión. El proceso de corrosión acelerada se comenzó al día 1100. Se observó que hasta antes del comienzo del proceso de corrosión acelerada (día 1100) la velocidad de corrosión permaneció en un nivel bajo ($0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Esto se debe a la falta de interacción de algún agente agre-

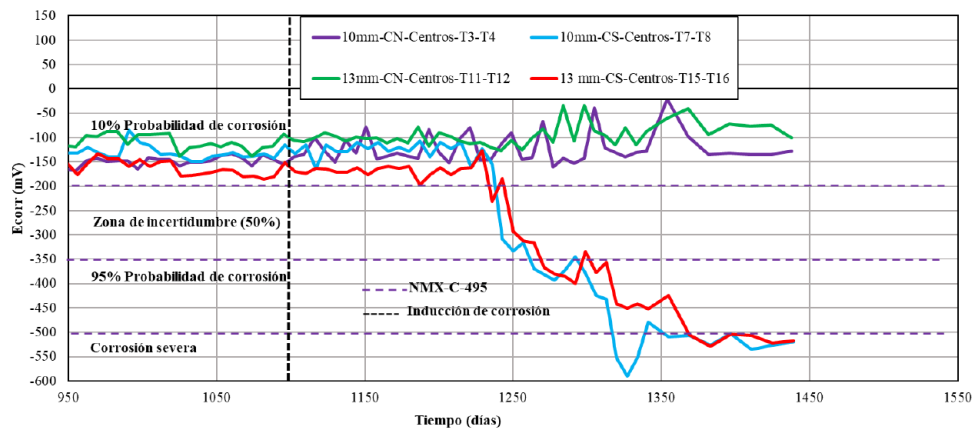


Figura 6. Promedios de potenciales de corrosión medidos a los centros de las trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

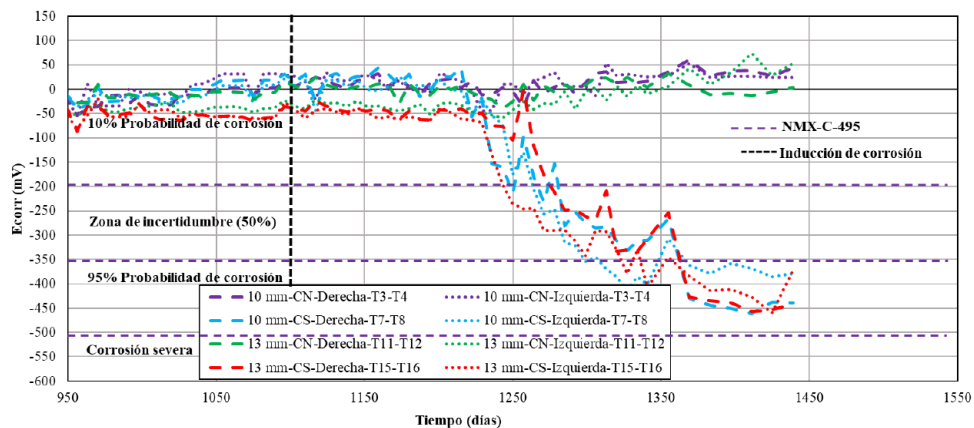


Figura 7. Promedios de potenciales de corrosión medidos a los extremos de las trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

sivo, el cual es requerido para activar el proceso de corrosión en el AR. Nuevamente se observó el desfase de 130 días asociado al proceso de despasivación del AR. A partir del día 1230 se observó en las traves bajo corrosión acelerada el incremento en la velocidad de corrosión hasta un nivel alto ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). El incremento en el nivel de corrosión de las traves puede estar asociado a la intrusión de cloruros en la interface del concreto y en los agrietamientos, lo cual favorece la corrosión del AR. Nuevamente esto se asocia a la falta de interacción de algún agente agresivo. Para el final del periodo de investigación (día 1450) para traves bajo corrosión acelerada la velocidad de corrosión se mantuvo en un nivel alto de corrosión ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Por otro lado, para las traves de referencia permanecieron con una velocidad de corrosión baja.

En la figura 9 se observa un comportamiento similar para los promedios de velocidades de corrosión medidos en los extremos. En general no se observó diferencia entre los niveles de corrosión reportados con diferentes diámetros de AR longitudinal a tensión, ni entre los centros y extremos. En traves bajo corrosión acelerada esto se debe al proceso de inducción de corrosión el cual se aplica de manera uniforme en todas las traves estudiadas, lo cual indica que debe existir una concentración de cloruros similar en las traves lo cual no permite determinar con exactitud el nivel de corrosión en el AR. En traves de referencia esto se debe a que no existe un proceso de inducción de corrosión.

En la figura 10 se presentan los acumulados de velocidad de corrosión ($i_{\text{corr}} \cdot \text{días}$) – Tiempo (días) medidos al centro y extremos de las traves con y sin corrosión. El acumulado se calculó como el área bajo la curva del promedio de las velocidades medidas más el área bajo la curva anterior. A partir del día 1230 se observó en traves bajo corrosión acelerada un cambio en la pendiente de los acumulados. El cambio en dicha pendiente indica que el proceso de corrosión está activo. Posteriormente para los días 1270, 1340 y 1410 se observaron incrementos en la pendiente de acumulados de velocidad de corrosión. Dichos incrementos pueden estar asociados a la evolución de nuevos agrietamientos, los cuales facilitan el ingreso de los agentes agresivos al AR. Para el caso de las traves de referencia no se observó cambios significativos en la pendiente

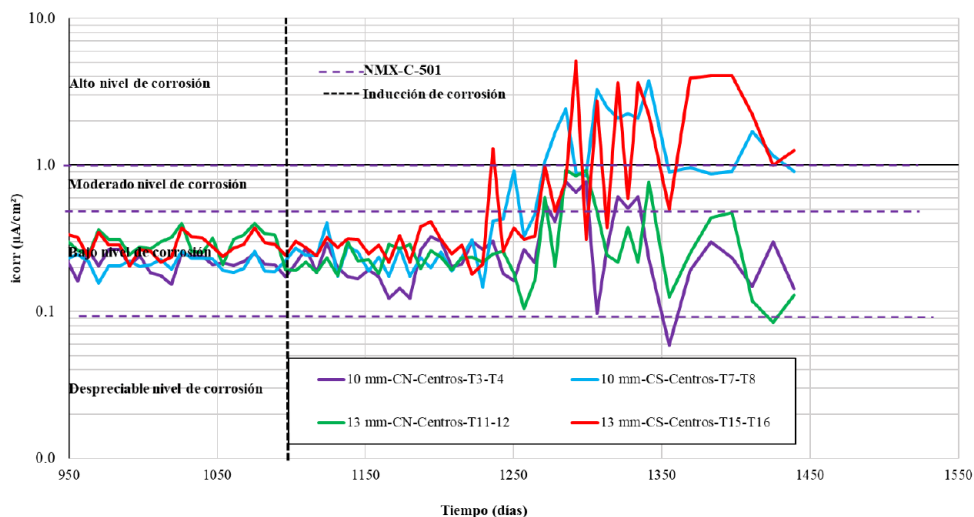


Figura 8. Promedios de velocidades de corrosión medidos a los centros de las traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

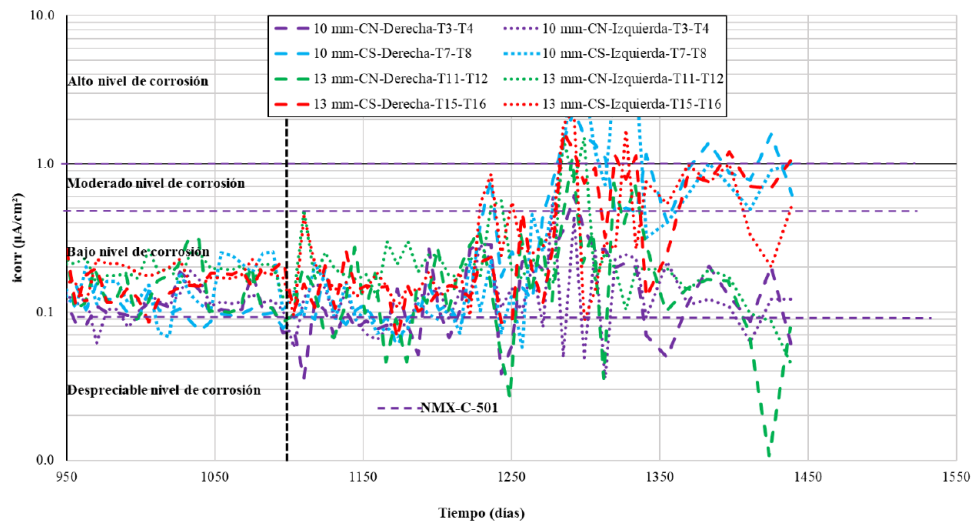


Figura 9. Promedios de velocidades de corrosión medidos a los extremos de las traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

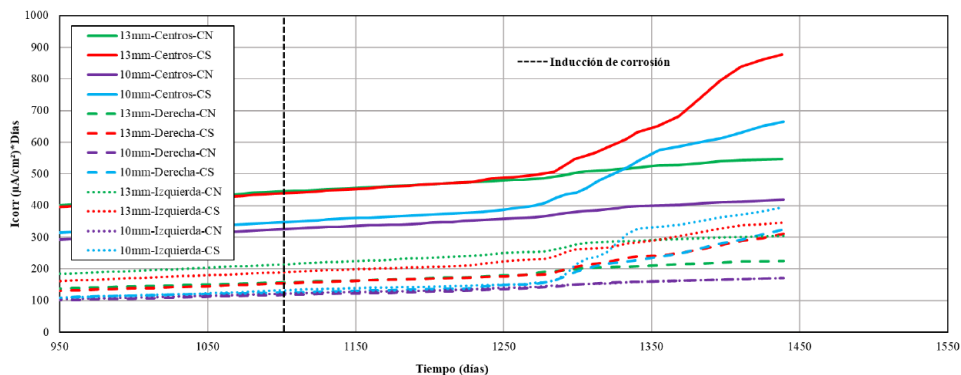


Figura 10. Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

de los acumulados de velocidades de corrosión. Esto se debe a que dichas traves no están siendo afectadas por algún agente agresivo. Se observa que los mayores acumulados de velocidad de corrosión se presentaron en traves con AR de 13 mm de diámetro. Esto se debe a que las traves con AR de 13 mm tuvieron mayor cantidad de grietas iniciales, las cuales facilitan la intrusión de agentes agresivos y aceleran el proceso de corrosión. A su vez se puede observar que en todos los casos los mayores acumulados se presentaron en las mediciones a los centros de los claros de las traves. Nuevamente esto está asociado a que dichas zonas contienen el mayor volumen de grietas. Para el caso de las mediciones tomadas en los extremos, se observa que las mediciones de la izquierda fueron superiores. Esto puede estar asociado a que para realizar las mediciones se requiere conectar eléctricamente al AR a estudiar, para ello se dejó una sección de 15cm de acero expuesto en el extremo izquierdo, por lo tanto, la presencia de esta barra expuesta tiende a incrementar las lecturas de velocidad de corrosión.

3.3 Resistividad eléctrica del concreto

En la figura 11 se presenta los promedios de resistividad eléctrica del concreto – Tiempo (días) medidos al centro del claro de las trabes con y sin corrosión. Se observa que hasta el inicio del proceso de corrosión acelerada (día 1100), el nivel de riesgo de corrosión fue moderado (17.5 k*cm) NMX-C-514-ONNCCE-2016. Nuevamente esto se asocia a la presencia de agrietamientos, los cuales aumentan la interacción con el medio ambiente. A partir del día 1230 se observó en trabes bajo corrosión acelerada una disminución en la resistividad eléctrica del concreto (13.4 k*cm). Nuevamente este desfase de 130 días está relacionado al proceso requerido para destruir la capa protectora del AR. Para el caso de las trabes de referencia se conservó la resistividad eléctrica del concreto. Asociado a que dichas trabes no fueron afectadas por algún agente agresivo, lo cual impide la activación de la corrosión en el AR. Para el final del periodo de investigación (día 1450) en trabes bajo corrosión acelerada el riesgo de corrosión aumentó a un nivel alto (5.9 k*cm). Dicho aumento está asociado al incremento de humedad en las trabes, lo cual facilita el transporte de agentes agresivos a través de los poros y de los agrietamientos, aumentando su riesgo a corroerse.

En la figura 12 se observa un comportamiento similar para los promedios de resistividad eléctrica del concreto medido en los extremos de las trabes. En general se observó que el mayor riesgo de corrosión se encuentra en los centros de los claros de las trabes. Nuevamente esto se asocia a que en dichas secciones se encuentra el mayor volumen de grietas, las cuales facilitan la intrusión de agentes agresivos, aumentando el riesgo de corroerse.

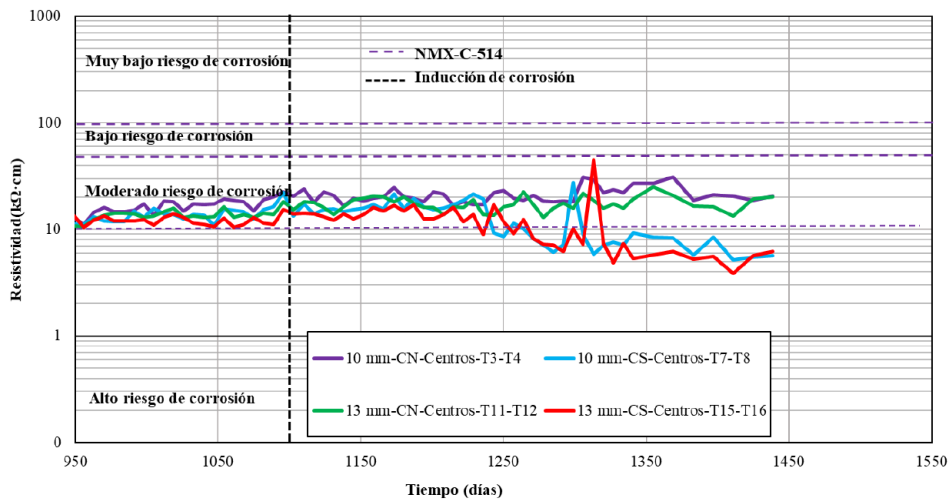


Figura 11. Promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

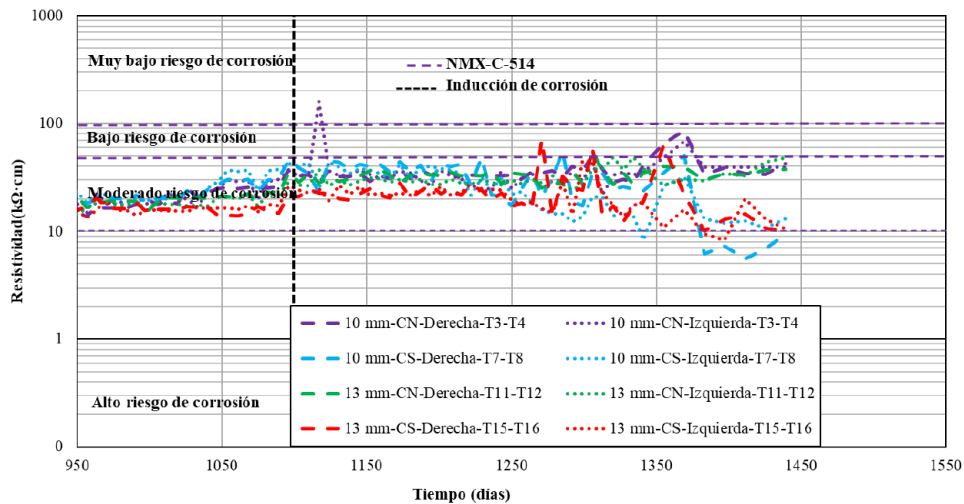


Figura 12. Promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de travesaños de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

4. Conclusiones

En este trabajo se evaluó la evolución de la corrosión en travesaños de CR sometidas a cargas sostenidas. Se consideraron 4 travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 4 con 13 mm de diámetro, respectivamente. Se seleccionaron cuatro travesaños dos con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm, respectivamente para ser sometidas a un proceso de corrosión acelerada. Todas las travesaños fueron sometidas a cargas sostenidas que generaran el 60 % del esfuerzo de fluencia en el AR. Se midieron parámetros electroquímicos asociados a la evolución de la corrosión. Con base en los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

- La mayor probabilidad de corrosión se encuentra en los centros de los claros de las travesaños. Esto estaría asociado a que en los centros de los claros de las travesaños se encuentra el mayor volumen de grietas, lo que favorece la intrusión de la humedad en la grieta y facilita la intrusión de agentes agresivos al AR, aumentando su probabilidad de corroerse.
- Los mayores acumulados de velocidad de corrosión se presentaron en travesaños con AR de mayor diámetro. Esto se debe a que dichas travesaños presentaron un mayor volumen inicial de grietas, por lo que su exposición fue mayor. Por lo tanto, el incremento en la cantidad de AR está asociado a la reducción de la durabilidad de la estructura.
- Los acumulados de velocidad de corrosión fueron superiores en los centros de los claros de las travesaños. Esto se debe a que se tuvieron mayores agrietamientos, lo cual facilita la intrusión de agentes agresivos que aceleran el proceso de corrosión.

- Los valores de resistividad eléctrica del concreto fueron menores para traveses con AR longitudinal a tensión de mayor diámetro. Esto se debe a que existe una mayor cantidad de grietas en traveses con AR longitudinal de mayor diámetro, lo que crea un conducto ideal para el transporte de agentes agresivos y por lo tanto mayor riesgo de corroerse.

5. Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de sus estudios de Maestría en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

6. Referencias

- Ballim, Y., & Reid, J. (2003). Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods. *Cement & Concrete Composites*, 25, 625-632.
- C. Arya; F.K. Ofori-Darko (1996). Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, 345-353.
- Ceballos, M. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. Centro de Innovación Tecnológica para la Construcción, pp. 24-25.
- Chávez Ulloa, E. (2010). Análisis del proceso de corrosión del concreto reforzado elaborado con agregados calizos expuesto en un medio natural y cámara de carbonatación acelerada. Tesis de Doctorado. Campeche, Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigación en Corrosión.
- Faiz Uddin Ahmed Shaikh (2018). Effect of cracking on corrosion of steel in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal, (2004) “Normas Técnicas Complementarias para diseño y Construcción de estructuras de concreto para RCDF” México.
- Hailong, Y.; Chuanqing, F.; Nanguo, J.; Xianyu, J. (2018). Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques. *Construction and Building Materials*, 162, pp. 286-297.
- Jimenez, V.; Montes, P. (2017). Influence of concrete cracking on the corrosion of steel reinforcement. *Concrete under Severe Conditions-Castro Borges et al. (eds) Taylor*, pp. 383-389.
- Kent, D; Park R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 97(7).
- León Chablé, F. (2017). Estudios preliminares de la corrosión en traveses de concreto con barras de 10 mm y 13 mm de diámetro. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la edificación, S. (03 de Febrero de 2016). Industria de la construcción - Durabilidad de estructuras de concreto reforzado - Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto - especificaciones y método de ensayo. NMX-C-495-ONNCCE-2015.
- ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (s.f.). Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de velocidad de corrosión en campo especificaciones y método de ensayo. NMX-C-501-ONNCCE-2016 - 2016, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

- ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2001). Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo. NMX-C-514-ONNCCE-2016 - 2016, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
- Ponce Galera, M. (2018). Efecto del agrietamiento y de las condiciones climáticas en la evolución de los parámetros de corrosión en traveses de concreto reforzado sujetas a flexión. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Rodríguez, M.; Botero, J. (1996). Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México. "Publicación Series Instituto de Ingeniería-UNAM", 575.
- Shamsad Ahmad (2017). Prediction of residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 64/1, pp. 69-74.
- Suvash, P.; Gideon, P. (2017). Corrosion Deterioration of Steel in Cracked SHCC. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 557-572.
- Visairo Méndez, R. (2016). *Efecto de la carga de servicio y contaminación por cloruros en el comportamiento mecánico y electroquímico de traveses de concreto reforzado sujetas a flexión. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.*
- X. L. Gu; W. P. Zhang; D. F. Shang; X. G. Wa. (2010). Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments*, 3545-3552.
- Yingshu Yuan; Yonhsheng Ji; Surendra P. Shah. (2007). Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, Title no. 104-S34, pp. 344-347.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Extensión empírica a 100 años de la vida de servicio de un edificio de concreto reforzado con valor histórico

P. Castro Borges¹, T. Pérez López², J.A. Briceño Mena¹,
M.G. Balancán Zapata¹

¹ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida

² Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

Resumen

Se realizó la evaluación, diagnóstico y reparación de un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años) para rescatarlo ante un cambio de uso, ya que fue comprado por una cadena comercial para convertirlo en tienda departamental. Se hizo una predicción empírica para extender por 100 años su vida de servicio con base en los resultados de la evaluación, el cambio de uso, los materiales y las técnicas de protección usados en aquella época. Se mimetizó la parte antigua con la parte nueva, la cual fue diseñada con criterios de durabilidad. Se presenta y discute en este trabajo el caso de la intervención en las columnas.

Palabras clave: Vida de servicio; Inspección; Diagnóstico; Reparación; Carbonatación.

Abstract

The evaluation, diagnosis and repair of a reinforced concrete building with historical value (almost 70 years) were carried out to rescue it before a change of use since it was purchased by a retail chain to convert it into a department store. Empirical predictions were made to extend its service life by 100 years based on the results of the evaluation, change of use, materials and protection techniques used at that time. The old part was mixed with the new section, which was designed with durability criteria. The case of the intervention in the columns is presented in this work.

Keywords: Service life; Inspection; Diagnosis; Repair; Carbonation.

Resumo

Veja a avaliação, diagnóstico e reparação de um edifício de concreto reforçado com valor histórico (casi 70 años), para rescatar antes de una mudana de uso, voc  que fue comprado por um cadena comercial para convertirlo en tienda departamental. Se hicieron predicciones empíricas para extender por 100 años su vida de servicio com base nos resultados da avalia o, el c mbio de uso, los materiales e as técnicas de prote o usados en aquella época. Se mimetizó a parte antiga com a parte nova, a última revela o com cr terios de durabilidade. Veja a apresenta o neste trabalho o caso de interven o nas columnas.

Palavras-chave: Vida  til; Inspe o; Diagnóstico; Repara o; Carbonata o.

1. Introducción

Una cadena comercial mexicana compr  el excine Selem de la ciudad de San Francisco de Campeche para convertirlo en su tienda departamental más grande del país. El excine Selem fue inaugurado el 27 de enero de 1951, tiene una edad cercana a los 70 años y está construido a base de concreto reforzado (figura 1). Por su antigüedad, el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) lo consideraron como un edificio de valor histórico. Por esa razón, el predio no podía ser demolido sino restaurado. Esto planteaba un reto a la empresa propietaria dado que el proyecto ejecutivo inicial contemplaba una demolición total y una construcción totalmente nueva. El edificio, que se encontraba en el abandono desde hacía más de 15 años, presentaba daños evidentes de deterioro, causados principalmente por la carbonata n del concreto y la corrosión del acero de refuerzo, como se aprecia parcialmente en una de sus columnas (figura 2). Rescatar el inmueble dependía entonces de una estrategia que incluyera una evaluación detallada, diagnóstico y reparación/rehabilitación que permitiera un rescate mayor al 80 % de la estructura antigua y mimetización con una nueva estructura interior hecha con concreto durable. La durabilidad de este inmueble una vez reparado y mimetizado con la parte nueva podría ser de 100 años, siguiendo un plan de mantenimiento preventivo. El objetivo de este trabajo es presentar los criterios seguidos para la evaluación, diagnóstico y reparación, discutiendo el caso de las columnas, con la finalidad de controlar el agrietamiento y aplicar un criterio para extender por 100 años la vida de servicio de la estructura antigua restaurada, una vez mimetizada con la estructura nueva.



Figura 1. Foto del Cine Selem en 1958 y en 2019.

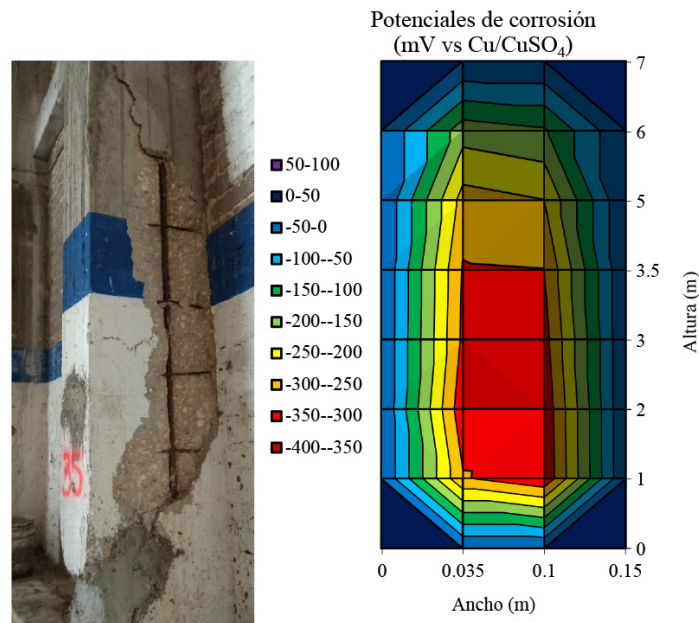


Figura 2. Estado visual y mapa de potencial de corrosión de una columna tipo.

La estructura funcionó como cine durante 40 años, aproximadamente, después de los cuales fue abandonada, para posteriormente ser reabierta en su parte trasera, como un estacionamiento de automóviles, hasta que en 2016 fue totalmente abandonada. El CO₂ de ese microambiente, junto con pequeñas fugas de agua, reunieron las condiciones óptimas para carbonatación, corrosión y desprendimiento del recubrimiento del concreto en grandes extensiones. Por su apariencia (daños severos en partes bajas que disminuían a daños insignificantes a gran altura) y por su cinética (bajas tasas de carbonatación anuales), se ubicó el problema como de baja intensidad, pero acelerado y aparatoso a partir de 2016. Los resultados de la tabla 1 comprobarían en parte estas hipótesis. Esto daría oportunidad de hacer cálculos para la reparación, la mimetización con la nueva estructura y la extensión de su vida de servicio.

2. Estrategia de evaluación, diagnóstico y reparación

Al ser una estructura de aproximadamente 1000 m², se hizo una medición de potenciales de corrosión (E_{corr}) (NMX-C-495-ONNCCE-2015) en los elementos estructurales (vigas y columnas) después de la cual se seleccionaron elementos específicos para hacer mediciones de velocidad de corrosión (i_{corr}) (NMX-C-501-ONNCCE-2015) y resistividad eléctrica (R_s) (NMX-C-514-ONNCCE-2016). Con los datos de las mediciones se elaboraron esquemas de fácil entendimiento para los trabajadores, de tal forma que tuviesen claramente ubicadas las zonas de intervención.

2.1 Diagnóstico

La distancia al mar (500 m), el coeficiente máximo de carbonatación obtenido, 11.35 mm / año^{1/2}, (NMX-C-515-ONNCCE-2016) y la cantidad máxima de cloruros, 0.06% Cl⁻ pp de cemento, (NMX-C-523-ONNCCE-2016) confirmaron la atmósfera C3 de Campeche (ISO 9223:2012; Corvo *et al.*, 2008; Cook *et al.*,

2000). En la tabla 1, los resultados de i_{corr} , E_{corr} , carbonatación y cloruros de una columna representativa, indican una cinética lenta de daño de abajo hacia arriba. Esta cinética se aceleró durante la función de estacionamiento cuando también había algunas fuentes de humedad. Por lo tanto, a 3 m de altura, el daño fue insignificante en varias áreas. Esto coincide con la tendencia observada en la carbonatación. De acuerdo con el diagnóstico, se propuso la reparación de acuerdo con mecanismos ya conocidos (Emmons, 1994; Vaysburd y Emmons, 2000 Helene y Pereira, 2003).

2.2 Reparación

Una vez evaluadas, las zonas eran clasificadas según el tipo de reparación a realizar ⁹⁻¹¹ (Emmons, 1994; Vaysburd y Emmons, 2000 Helene y Pereira, 2003).

- Reparación superficial (profundidad máxima de 2 cm, antes del refuerzo), localizada
- Reparación superficial y uniforme (en todo el elemento)
- Reparación profunda (profundidad mayor de 2 cm o que atraviese la zona del refuerzo), localizada
- Reparación profunda, uniforme.

El caso ilustrado esquemáticamente en la figura 3, y en sitio en la figura 4, correspondía a una reparación profunda y uniforme. Para este caso habría que apoyarse en el dictamen de pruebas para garantizar que la reparación ayudara a controlar la aparición de más grietas y además que su diseño permitiese una extensión de vida de servicio hasta 100 años. Por cada elemento se construyeron figuras equivalentes a la de la Figura 3 y se registraron fotos equivalentes a la de la figura 4, con recomendaciones específicas para proceder con la reparación y la demolición (si se requiriera).

Tomando en cuenta que la valoración estructural de la resistencia a la compresión y el monolitismo de la estructura entre vigas, losas, muros y columnas permitía una intervención sin apuntalamiento, se siguió la estrategia de reparación ilustrada esquemáticamente en la Figura 3 (Emmons, 1994; Vaysburd y Emmons, 2000; Helene y Pereira, 2003) que consistió en demoler secciones de 1.50 m de altura comenzando desde la parte baja de la columna, y hasta donde se requería. La reparación con sustitución ortogonal de concreto coadyuva para redistribuir las cargas de la columna en forma homogénea sobre el plano horizontal de la unión de concreto nuevo con viejo, controlando de esta forma el agrietamiento al también asegurar que la resistencia mecánica del concreto nuevo fuese igual a la del concreto viejo

Tabla 1. Valores de i_{corr} , E_{corr} , profundidad de carbonatación y contenido de cloruros de una columna representativa.

Altura (m)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)	Carbonatación (mm)	%Cl pp de concreto (Perfil de 5 profundidades en mm)				
				10	20	30	40	50
3	0.11	-382	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.08	-328	60	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06
1	1.77	-363	70	0.15	0.23	0.27	0.16	0.13

Nota 1: Resistencia a la compresión de 26 MPa (269 Kg/cm²)

Nota 2: El acero se encontraba a 35 mm de profundidad

Nota 3: El umbral de cloruros para producir corrosión con este tipo de concreto es 0.65-1.10 %Cl pp de cemento¹² (Castro-Borges *et al.*, 2013).

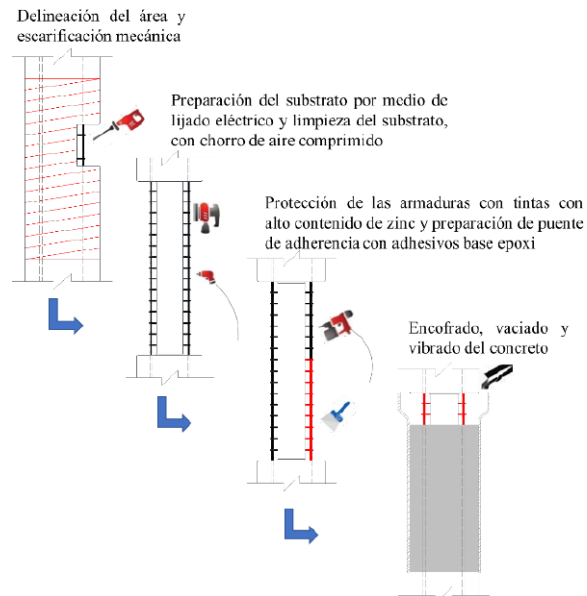


Figura 3. Estrategia de reparación de las columnas.



Figura 4. Fotos representativas de la reparación terminada.

2.3 Demolición y mimetización

Por el daño severo observado y las restricciones de INBA e INAH para la restauración, no se podía emprender una demolición convencional pues se corría el riesgo de que, al hacerlo, se agrietaran y/o desprendieran partes que requerían ser conservadas. Entonces se optó por realizar la reparación de toda la estructura, y después demoler las partes que requería el proyecto aprobado, con la seguridad de que se mantendría en pie lo ya reparado que no debía demolerse. Para lograrlo, las reparaciones fueron realizadas en tramos de 1.50 m sin necesidad de apuntalamiento, comenzando desde las partes bajas hacia arriba. Hacer la reparación y después la demolición, daba oportunidad de empotrar las anclas que servirían para la mimetización del edificio nuevo con el edificio antiguo. Esto es una práctica común en este tipo de intervenciones, pero en

este caso estábamos hablando de un edificio antiguo con un concreto de 26 MPa y un edificio nuevo con un concreto de 32 MPa. Parte de esta estrategia se ilustra en la figura 5.

3. Extensión de vida de servicio

De acuerdo con la información previa, la extensión de la vida de servicio de la parte original del excine Selem estaría en función principalmente de la carbonatación del concreto, que para su nueva extensión de vida de servicio sería la posible y única afección principal. Se procedió entonces a calcular los coeficientes de carbonatación. Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de carbonatación del concreto es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición como se expresa en la ecuación (1):

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde:

X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación, en milímetros, con aproximación a una décima.

K_{CO_2} = Constante de carbonatación en mm/año^{1/2}, con aproximación a una décima.

t = Tiempo de exposición del concreto al ambiente, en años.

Las Tablas 2 y 3, según la norma NMX-C-515-ONNCCE-2015, muestran los criterios de calidad de un concreto carbonatado en función de su constante de carbonatación y los valores de esta constante a partir de la profundidad máxima en zonas representativas de las columnas. Bajo estos criterios y con base en la evaluación realizada, se pudo constatar un mayor ingreso de CO₂ en los niveles inferiores de las columnas, (figura 6).

Esto se debió principalmente al cambio de uso que tuvo la estructura, y a que después de ser un cine funcionó como estacionamiento donde el mantenimiento fue escaso o nulo y se concentraban altas emisiones de CO₂ provocando que el K_{CO₂} máximo fuese de 11.35 mm/año^{1/2}.

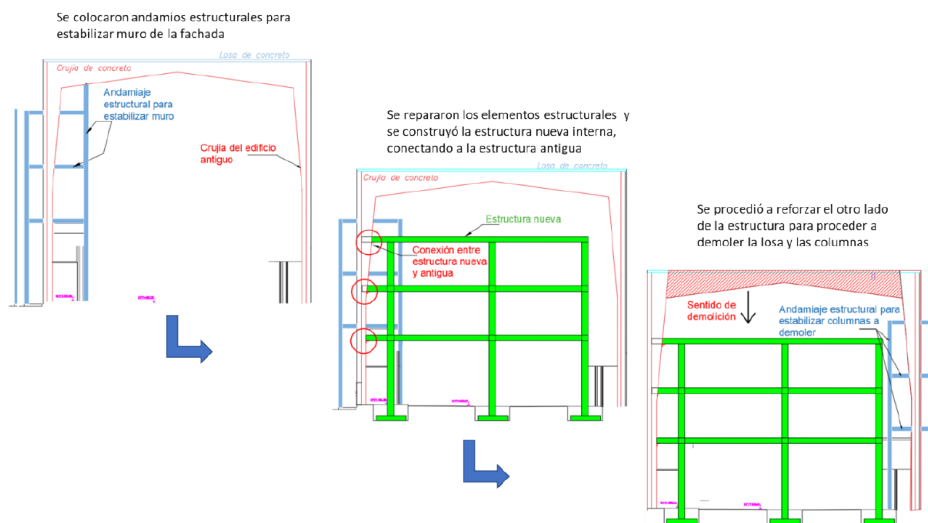


Figura 5. Esquema para mostrar la estrategia de demolición y mimetización.

Tabla 2. Criterios de evaluación de la velocidad (constante) de carbonatación de acuerdo con la norma NMX-C-515-ONNCCE-2015¹.

Constante de carbonatación K_{co_2} (mm/año ^{1/2})	Calidad del concreto y nivel de resistencia a la carbonatación
< 3	Concreto bueno con elevada resistencia a la carbonatación
$3 \leq K_{co_2} \leq 6$	Concreto de calidad media y con inicio en la carbonatación
> 6	Concreto malo de baja resistencia a la carbonatación

Tabla 3. Coeficiente de carbonatación obtenido a partir de la máxima profundidad.

Zona	Profundidad máxima de carbonatación (mm)	Coefficiente K máximo K_{co_2} (mm/año ^{1/2})
Sur	70	8.14
Oeste	40	4.93
Norte	43	5.29
Este	95	11.70

Los valores de la figura 6 muestran el comportamiento de las K, de las columnas evaluadas en los diferentes recubrimientos de concreto, según el microambiente para el mismo tiempo de exposición. Aquellos valores de K cercanos a 4 mm/año^{1/2} correspondían en general a elementos ubicados en lugares alejados del área que funcionaba como estacionamiento, a lugares que comenzaban a 3 m de altura, incluso donde algunos elementos tenían recubrimiento de material tipo granito sobre el concreto. El granito fue removido y se midió la carbonatación obteniendo $K_{co_2} = 3.59$ mm/año^{1/2}, por lo que estimándose nuevamente la vida de servicio con este valor de K_{co_2} se obtuvo que en un lapso de 124 años la carbonatación alcanzará al acero. Por lo tanto, con base en esta experiencia y de que el uso de la estructura sería de uso comercial, se recomendó la utilización de un recubrimiento primario convertidor de óxido y anticorrosivo aplicado sobre el acero de refuerzo y la aplicación de un revestimiento cristalizante sobre el concreto terminado. Esto ayudará a crear una barrera contra la penetración de los agentes agresivos. Además, para verificar el estado de la estructura, y que la proyección se esté cumpliendo, se hizo un plan de mantenimiento preventivo, el cual no se discute en este trabajo. El punto decisivo aquí fue descubrir como los parámetros de la altura, el recubrimiento de granito, la poca variación de temperatura y baja humedad habían producido una constante de carbonatación capaz de proveer 124 años de protección antes que la barra estuviese en riesgo de despasivarse, situación que pudiese replicarse en el diseño de la reparación, y lo cual se hizo. Y esto se logró después de reunir toda la información que se presenta en la figura 6. Por lo tanto, replicar ese tipo de protección y ambiente estaría dando las condiciones para extender la vida de servicio de la estructura por 100 años, acompañado desde luego de un plan de mantenimiento correctivo preventivo. Las demás condiciones evaluadas fueron adversas en forma relativa en función de las características mecánicas de las columnas, de los materiales de protección (pinturas, revestimientos, etc.), de exposición ambiental en los microambientes y de uso.

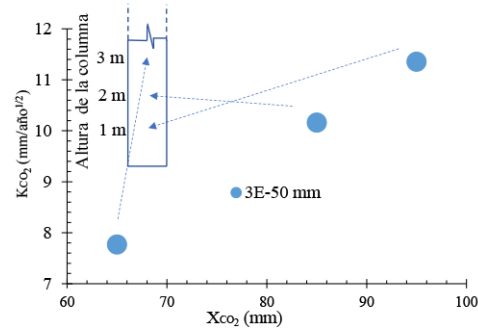
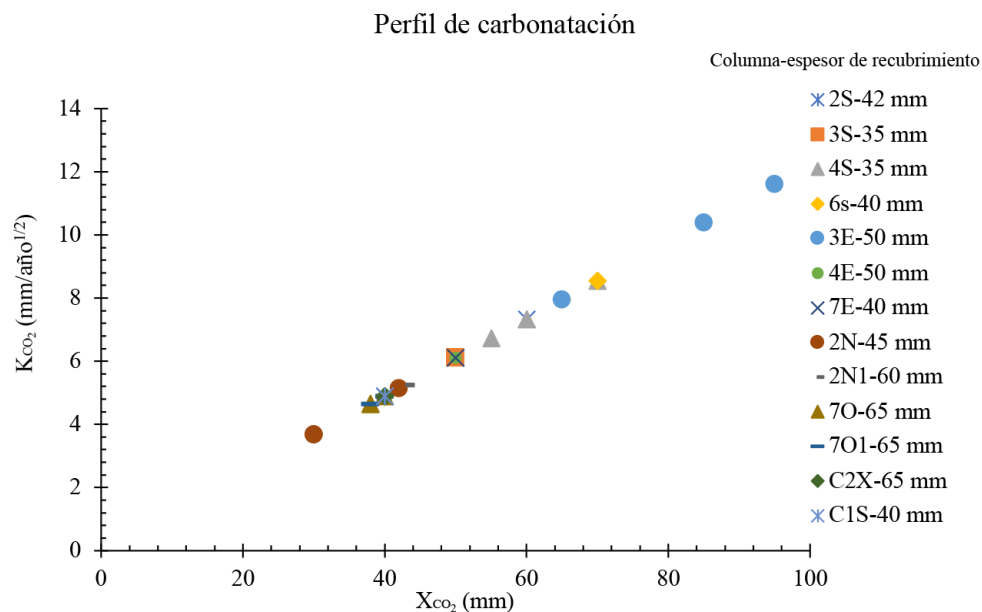


Figura 6. Análisis de profundidad de carbonatación de las columnas evaluadas.

4. Conclusión

Se evaluó y diagnosticó un edificio de concreto reforzado con valor histórico (casi 70 años). Con base en los resultados se diseñó la reparación con una predicción de 100 años de extensión de vida de servicio. Esto se logró considerando un revestimiento al acero y un recubrimiento al concreto (efecto barrera) que produjeran un efecto protector similar o mejor al que se registró durante la evaluación, y que arrojó un coeficiente de carbonatación cuya predicción sobrepasaba los 100 años. La combinación de una reparación ortogonal con concreto de similar calidad a la del sustrato, protegiendo el sustrato con un agente de unión, revistiendo al acero de refuerzo y colocando cristalizantes al concreto replicó el efecto visualizado. Hace falta verificar en sitio el coeficiente de carbonatación obtenido bajo estas condiciones, lo cual se realizará con forme al diseño de un plan de mantenimiento preventivo para coadyuvar al logro de la extensión de la vida de servicio.



5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de Coppel SA de CV, la UACAM, Cinvestav, INAH e INBA. A la M Josefa de los Ángeles por su apoyo técnico. J.A. Briceño-Mena agradece la beca de doctorado de Conacyt.

6. Referencias

- Castro-Borges P., Balancán-Zapata M., López-González A. (2013), “*Analysis of tools to evaluated chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México*”. Journal of Chemistry, 2013 (208619) 1-9, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/208619>
- Cook D.C., Van Orden A.C., Reyes J., Oh S.J., Balasubramanian R., Carpio J.J., Townsend H.E., “*Atmospheric Corrosion in Marine Environments along the Gulf of México*,” in Marine Corrosion in Tropical Environments, eds. S. W. Dean, G. Hernandez-Duque Delgadillo, J. B. Bushman, STP 1399 (West Conshohocken, PA: ASTM, 2000), 75-97.
- Corvo F., Perez T., Dzib L.R., Martin Y., Castañeda A., Gonzalez E., Perez J (2008), “*Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres*”, Corrosion Science, 50(1), 220-230.
- Emmons P., *Concrete Repair and Maintenance Illustrated*, (R.S. Means Company, Inc., 1994)
- ISO 9223:2012, “*Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification, Determination and Estimation*” (EUROPEAN STANDARD, 2012)
- Helene P., Pereira F. (2003), “*Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón (Reparación, Refuerzo y Protección)*”, Red Rehabilitar, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- NMX-C-495-ONNCCE-2015, “*Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Potenciales de Corrosión del Acero de Refuerzo sin Revestir, Embebido en Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo*” (Ciudad de México: ONNCCE, 2016)
- NMX-C-501-ONNCCE-2015, “*Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo*” (Ciudad de México: ONNCCE, 2015)
- NMX-C-514-ONNCCE-2016, “*Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*” (Ciudad de México: ONNCCE, 2016)
- NMX-C-515-ONNCCE-2016, “*Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico - Especificaciones y Método de Ensayo*” (Ciudad de México: ONNCCE, 2016)
- NMX-C-523-ONNCCE-2016, “*Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Concentración de Cloruros Solubles en Agua y Ácido - Determinación en Concreto Hidráulico - Método de Extracción y Método de Determinación por Ión Selectivo*” (Ciudad de México: ONNCCE, 2016)
- Vaysburd A.M., Emmons P.H. (2000), “*How to make today's repairs durable for tomorrow — corrosion protection in concrete repair*” Construction and Building Materials 14(4), 189-197.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Comportamiento electroquímico de traveses a escala real con carga sostenida variable, contaminadas con cloruros

R. Visairo-Méndez¹, J. Varela-Rivera¹, P. Castro-Borges²

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados IPN, Unidad Mérida

Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo es mostrar que el comportamiento electroquímico de vigas con carga sostenida variable a escala real se mantiene estable. Se consideraron ocho traveses de concreto reforzado a escala natural y bajo condiciones de carga típicas. Las dimensiones de las traveses fueron de 15 x 30 x 350 cm (ancho x altura x longitud). Se determinó como factor de variación el porcentaje de esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo longitudinal en tensión. Se determinó una relación agua/cemento (a/c) de 0.62 para la mezcla del concreto. La corrosión se indujo de manera acelerada contaminando el concreto con una solución salina durante su elaboración y posteriormente aplicando ciclos de mojado y secado. Entre los resultados se observó poca variación en los potenciales de corrosión correspondientes a traveses sujetas a 40 % y al 80 % del esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo longitudinal.

Palabras clave: traveses; corrosión; potenciales.

Abstract

The objective of this work is to show that the electrochemical behavior of beams with variable sustained load on a real scale remains stable. Eight full-scale reinforced concrete beams were considered under typical load conditions. The dimensions of the beams were 15 x 30 x 350 cm (width x height x length). The percentage of yield stress of the longitudinal reinforcing steel in tension was determined as a main factor. A water / cement ratio (w/c) of 0.62 was determined for the concrete mix. Corrosion was induced in an accelerated manner by contaminating the concrete with a saline solution during its preparation and subsequently applying wet and dry cycles. With the results it was observed a little variation in the corrosion potentials corresponding to beams subject to 40% and 80% of the yield stress of the longitudinal reinforcing steel.

Keywords: beams; corrosion; potentials.

1. Introducción

El fenómeno de la corrosión existe porque los materiales metálicos que utiliza el hombre son producidos (ya que no se encuentran puros en la naturaleza) e inician su periodo de retorno a su estado mineral (Ávila y Genescá, 1986).

El daño en elementos estructurales debido a la corrosión es un fenómeno que se da en todo lugar pero que se puede prevenir. En caso de no prevenirse, el costo por reparación de daños generados por la corrosión es un poco menor que el costo total anual debido a inundaciones, huracanes, tornados, incendios y terremotos (Fontana, 1986).

Sin embargo, las mayores pérdidas por corrosión se deben a gastos por trabajos de reparación, pero los estudios basados en la prevención de daños resultan menos costosos que éstos (Castañeda y Rodríguez, 2014).

Existen también diversos proyectos de investigación que se han realizado enfocando su estudio en traveses de concreto reforzado (CR) y su afectación debido a los daños generados por la corrosión. En dichos proyectos (Rodríguez *et al.*, 1997; Yoon *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2003; Torres *et al.*, 2007; Guevara *et al.*, 2009; Malumbela *et al.*, 2010; Oyado *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2015) se encontró que el estudio de las traveses de CR se ha realizado, en general, sin considerar cargas sostenidas lo cual es un factor importante ya que un elemento estructural está sujeto a distintos tipos de cargas durante su vida útil, como son las cargas gravitacionales de servicio. También se encontró que los métodos más utilizados para acelerar la corrosión han sido: la contaminación del concreto con cloruros junto con la aplicación de corriente eléctrica y la aplicación de ciclos de mojado y secado, combinado con corriente eléctrica.

Lo anterior justifica la importancia de estudiar traveses de CR considerando cargas sostenidas variables. El objetivo de este trabajo es mostrar que el comportamiento electroquímico de vigas con carga sostenida variable a escala real se mantiene estable aún con contaminación por cloruros durante la fabricación y posterior a ella, y bajo diferentes niveles de esfuerzo de tensión.

2. Metodología

Para el cumplimiento del objetivo de este trabajo se realizaron actividades que se presentan en las siguientes secciones.

2.1 Diseño de las traveses

Se consideraron ocho traveses de CR, cuatro traveses patrón (TP) y cuatro traveses con corrosión (TCC). Se seleccionó como variable de estudio el porcentaje del esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo longitudinal de las traveses. Se seleccionaron esfuerzos de tensión del 40 y 80 % del valor que corresponde a la resistencia a la fluencia (f_y) del acero. Los valores anteriores se seleccionaron considerando que, bajo cargas gravitacionales de servicio, el acero de tensión de las traveses tiene un esfuerzo promedio del 60 % de la resistencia a la fluencia. Las traveses fueron sujetas a cargas sostenidas para inducir los esfuerzos de tensión en el acero longitudinal indicados en la tabla 1.

Se consideró una sección transversal de 15 x 30 cm (ancho x altura) y una longitud (L) de 350 cm.

Se realizó el diseño estructural por flexión y cortante de las traveses. Se seleccionó la cantidad de acero de refuerzo por flexión (longitudinal) y por cortante (transversal) para inducir la falla por flexión en las traveses; es decir, evitar la falla por cortante. Para el diseño se consideraron los modelos y lineamientos de Rodríguez y Botero (1994), Kent y Park (1971) y norma mexicana NTC-RCDF 2004.

En la figura 1 se presenta el resultado final de los diseños y especificaciones consideradas para las traves de CR.

2.2 Técnicas para aceleración de la corrosión

Se seleccionaron dos técnicas para inducir la corrosión acelerada en el acero de refuerzo longitudinal: contaminación del concreto fresco y aplicación de ciclos de mojado y secado. La primera consistió en colocar en el concreto fresco sal de mar sintética en una proporción del 1.5 % del peso del cemento utilizado en el diseño de la mezcla. La segunda consistió en humedecer las traves todos los días dos veces al día; el primer día con agua potable, el segundo con una solución salina, y así sucesivamente. La solución salina se fijó en un 3.5 % del peso del agua.

Tabla 1. Traves de concreto reforzado.

Trabe	f_s	Tipo
1	0.4 f_y	TCC
2	0.4 f_y	TP
3	0.4 f_y	TCC
4	0.4 f_y	TP
5	0.8 f_y	TCC
6	0.8 f_y	TP
7	0.8 f_y	TCC
8	0.8 f_y	TP

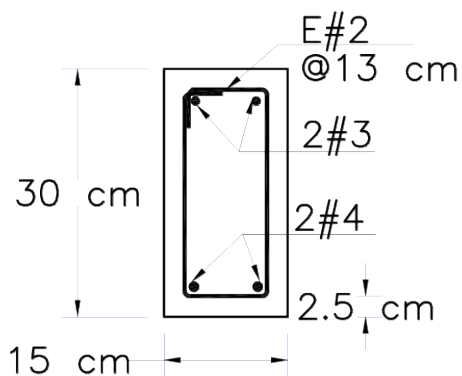


Figura 1. Sección transversal y armado de las traves.

2.3 Materiales y diseño de mezcla de concreto

Se realizó la caracterización de los agregados pétreos para conocer sus propiedades y proceder con el diseño de la mezcla de concreto con base en los siguientes lineamientos:

- Muestreo NMX-C-030-ONNCCE-2004 (2004).
- Reducción de muestra NMX-C-170-1997-ONNCCE (1998).
- Análisis granulométrico ASTM C 33-03 (2003).
- Módulo de finura ASTM C 136-01 (2001).
- Peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico seco compacto ASTM C 29 / C 29M (2003).
- Gravedad específica y absorción ASTM C 128-01 (2001).
- Desgaste por abrasión ASTM C 131-03 (2003).

Se realizó el diseño de la mezcla de concreto con base en el manual de Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal del Instituto Americano del Concreto ACI Committe 211 (2004). Se utilizaron las propiedades obtenidas de los agregados pétreos y se consideraron los siguientes parámetros: revenimiento de 10 cm, Tamaño Máximo de Agregado (TMA) de 19 mm y una relación agua/cemento (a/c) de 0.62.

2.4 Construcción de las trabes

La construcción de las trabes se llevó a cabo considerando el recubrimiento del acero transversal con esmalte alquidálico anticorrosivo. Adicionalmente, se colocaron galgas extensométricas en el acero de refuerzo a tensión para determinar la deformación unitaria del mismo.

Se elaboró el concreto en una revolvedora de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010 (2010). En las trabes patrón (TP) el concreto se colocó y vibró de manera tradicional, en las trabes con corrosión (TCC) el concreto se colocó en dos capas longitudinales de 15 cm de altura, la primera con el concreto contaminado y la segunda con concreto normal.

Del concreto fresco se obtuvieron muestras para cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto para pruebas de resistencia a compresión axial del concreto de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002 (2002). Adicionalmente, se obtuvieron muestras para cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto para pruebas de densidad aparente y volumen de vacíos de acuerdo con la norma ASTM C 642-06 (2006).

El curado de las trabes se realizó humedeciéndolas y cubriéndolas con periódico, paños y polietileno.

2.5 Sistema de carga e instrumentación

Se utilizaron diferentes sistemas de carga los cuales consistieron en un marco de acero de reacción, una viga de acero de repartición de carga, dos bloques de concreto utilizados como apoyos y dos barras roscadas para aplicar la carga sostenida. En la figura 2 se ejemplifica uno de ellos.

Se midieron los desplazamientos en diferentes puntos durante las pruebas de las trabes, utilizando instrumentación como potenciómetros lineales y para medir las deformaciones unitarias en el acero de refuerzo en tensión se utilizaron galgas extensométricas previamente colocadas en dicho acero (figura 3).

Para la obtención de las cargas, desplazamientos y deformaciones unitarias se utilizó un sistema de adquisición de datos.

2.6 Monitoreo de corrosión en las trabes

Aunque se llevó a cabo un control electroquímico completo (resistividad, velocidad de corrosión y potencial de corrosión), en este trabajo únicamente se presenta y se discute el valor del potencial de corrosión en estudios de este tipo. Se tomaron lecturas de potenciales de corrosión utilizando una celda de cobre – sulfato de cobre de acuerdo con la norma ASTM C876-91 (1999) “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”.

Las lecturas de potenciales de corrosión se comenzaron después del curado del concreto, a los 28 días cumplidos. A los 166 días se comenzaron los ciclos de mojado y secado en las trabes.

A los 205 días se comenzó a tomar lecturas de potenciales de corrosión con ayuda de un corrosímetro comercial (figura 4).



Figura 2. Sistema de carga principal.

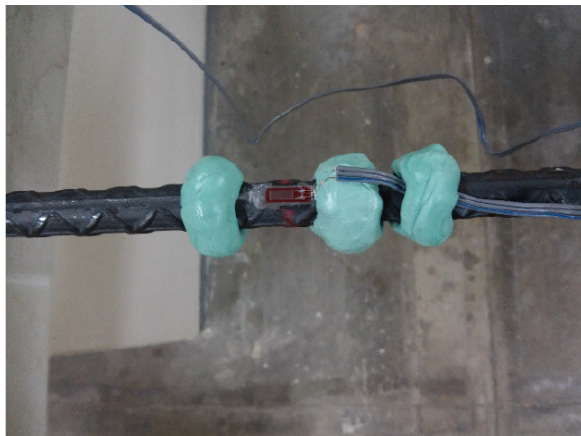


Figura 3. Instalación de una galga extensiométrica.



Figura 4. Lecturas con corrosímetro comercial.

3. Resultados y discusión

En la figura 5 se presentan las curvas de potencial de corrosión – tiempo de las traves TCC-1, TCC-3, TP-2 y TP-4. Similarmente, en la figura 6 se presentan para las traves TCC-5, TCC-7, TP-6 y TP-8. Se tomaron lecturas con la celda de cobre – sulfato de cobre a partir de los 28 días de la colocación del concreto de las traves y hasta los 204 días. Se tomaron lecturas con el corrosímetro comercial a partir de los 205 días y hasta los 303 días. Las cargas sostenidas se aplicaron a partir del día 154. Los ciclos de mojado y secado comenzaron a partir del día 166. Estos días se representan con líneas verticales en dichas figuras.

En la figura 7 se presentan las curvas promedio de potenciales de corrosión – tiempo de las traves TCC y TP correspondientes al mismo nivel de esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo longitudinal.

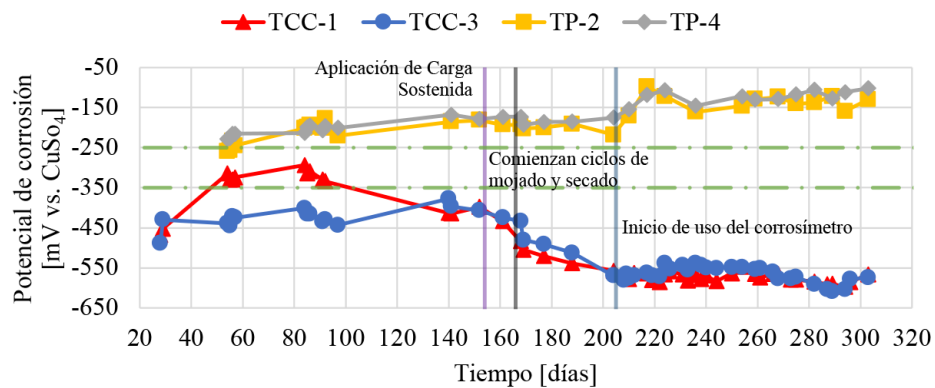


Figura 5. Potenciales de corrosión de traves TCC-1, TCC-3, TP-2 y TP-4.

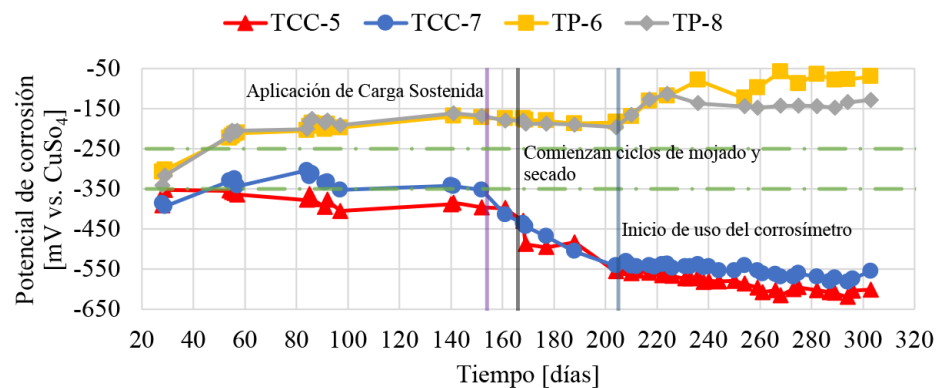


Figura 6. Potenciales de corrosión de traves TCC-5, TCC-7, TP-6 y TP-8.

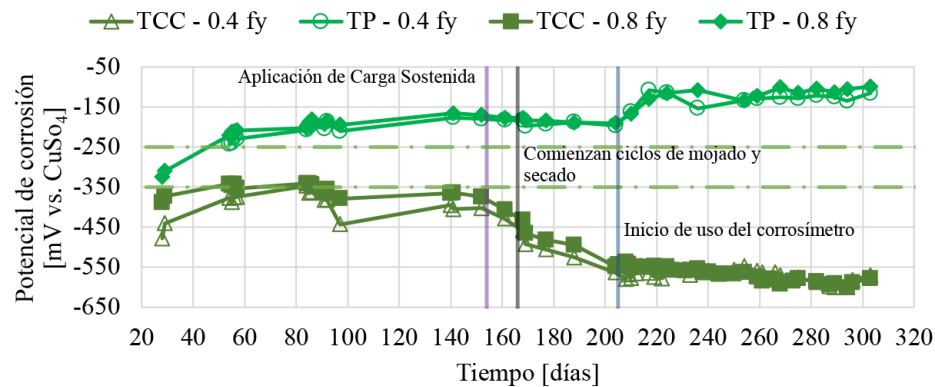


Figura 7. Promedios de potenciales de corrosión de las travesaños.

En la figura 7 se observa que las travesaños con corrosión (TCC) presentan un valor de potencial de corrosión de -0.550 V a partir del día 200 independientemente del nivel de esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo longitudinal. Este valor de -0.550 V indica que las travesaños presentan una corrosión severa al mismo tiempo.

Para las condiciones de exposición y tomando en cuenta las cargas sostenidas, la medición del potencial de corrosión de la figura 5 a la figura 7, presenta con claridad que durante la primera etapa (antes de iniciar los ciclos de secado y mojado), las condiciones fueron estables entre el día 28 y el 150 con las TP en zonas mayores a -250 mV vs. CuSO_4 . Por su parte, se cumplió lo mismo en este período para las TCC con valores menores a -350 mV vs. CuSO_4 . De igual manera, pudo detectarse con claridad la transición a un comportamiento más activo de las TCC cuando iniciaron los ciclos de mojado y secado mientras que las TP se mantuvieron con su misma tendencia previa. Al cesar los ciclos de mojado y secado, la cantidad de cloruros presente y la higroscopía de éstos, mantuvieron al potencial de corrosión estable en la zona alrededor de los -550 mV vs. CuSO_4 mientras que las TP, al volverse más seco su ambiente se estabilizaron en valores más positivos que -150 mV vs. CuSO_4 . El potencial de corrosión tuvo el comportamiento esperado de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2015) y a reserva de una mejor confirmación de su validez, que se hizo con otras técnicas, permitió concluir que no importa que la carga sostenida a 0.4 fy o a 0.8 fy, el comportamiento electroquímico es igual entre una y otra condición. Esto, por supuesto, aún considerando que en ambas condiciones, era de esperarse que no hubiese una pasivación inicial en las TCC, que sí se obtuvo en las TP, debido al cloruro añadido en la mezcla. La aportación más importante aquí con únicamente la aplicación del potencial de corrosión, si solo se hubiese dispuesto de esa técnica, es que, para condiciones reales de travesaños con carga sostenida, el comportamiento estructural no se ve influenciado ni por la contaminación previa ni por los ciclos de mojado y secado, cuando se pasa de una condición de carga de 0.4 fy a 0.8 fy.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo se presenta a continuación la siguiente conclusión:

- Por sí mismo, el potencial de corrosión permitió valorar que, sin importar el cambio de una condición de carga de 0.4 fy a otra de 0.8 fy, el comportamiento electroquímico se mantiene parecido tanto en las TP como en las TCC. Esto, por supuesto, considerando que en ambas condiciones era de esperarse que

no hubiese una pasivación inicial en las TCC, lo cual sí se obtuvo en las TP, debido al cloruro añadido en la mezcla.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) y a la ingeniera Mercedes Balancán Zapata del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida, por las facilidades que otorgaron para la elaboración de este proyecto. Rebeca Visairo Méndez, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada en el periodo 2013-2015 durante su programa de Maestría en Ingeniería opción Estructuras en la FIUADY.

Se tiene un agradecimiento especial al Dr. Eric Iván Moreno (D.E.P.) quien impulsó a realizar este proyecto de investigación e inspiró a los autores a la culminación del mismo.

6. Referencias

- ACI Committee 211. (2004). *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto Normal, Pesado y Masivo*. IMCYC, 29-34. México, D.F.: IMCYC.
- ASTM C 29 / C 29M . (2003). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C876-91. (1999). *Método Estándar de Ensayo para Potenciales de Media Celda para Acero de Refuerzo no Revestido en Concreto*.
- ASTM C 128-01. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 131-03. (2003). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 136-01. (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 33-03. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 642-97. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. U.S.A.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Ávila M., J., & Genescá, J. (1986). Más allá de la herrumbre (Vol. 9). D. F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Castañeda Valdéz, A., & Rodríguez Rodríguez, M. (2014). *Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado*. CENIC, Ciencias Químicas, 45, 52-59.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering* (2da ed.). United States of America: Mc Graw Hill.
- Guevara, B., Juárez, C., Fajardo, G., & Castro Borges, P. (2009). *Comportamiento a cortante en vigas de concreto reforzado con deterioro por corrosión en los estribos*. Ingeniería de Construcción, 24(3), 259-270.
- Kent, D., & Park, R. (July de 1971). *Flexural Members with Confined Concrete*. ASCE, Journal of the Structural Division, 97(7), 1969-1990.
- Malumbela, G., Alexander, M., & Moyo, P. (2010). *Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load*. Construction and Building Materials(24), 1051-1059.

- NMX-C-030-ONNCCE-2004. (2004). Industria de la construcción - Agregados - *Muestreo*. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002. (2002). Industria de la Construcción - Concreto - *Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto - Método de Prueba*. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-170-1997-ONNCCE. (1998). Industria de la Construcción - Agregados - *Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-414-ONNCCE-2010. (2010). Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - *Especificaciones y Métodos de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-495-2015-ONNCCE. (2015). Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - *Medición de Potenciales de Corrosión del Acero de Refuerzo sin Revestir, Embebido en Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NTC-RCDF. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Órgano del Gobierno del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno. México, D.F.: Administración Pública del Distrito Federal.
- Oyado, M., Kanakubo, T., Sato, T., & Yamamoto, Y. (2011). *Bending performance of reinforced concrete member deteriorated by corrosion*. Structure and Infrastructure Engineering, 7(1-2), 121-130.
- Rodríguez, J., Ortega, L., & Casal, J. (1997). *Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement*. Construction and building materials, 11(4), 239-248.
- Rodríguez, M., & Botero, J. (1994). *Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 1, págs. 302-311. Zacatecas, México.
- Torres Acosta, A., Martínez Madrid, M., & Muñoz Noval, A. (2003). *Capacidad remanente en vigas de hormigón que presentan corrosión localizada en el acero de refuerzo*. Mater Construcc, 53(271-172), 125-133.
- Torres Acosta, A., Navarra Gutiérrez, S., & Terán, C. (2007). *Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams*. Engineering Structures, 1145-1152.
- Wang, L., Li, C., & Yi, J. (2015). *An experiment study on behavior of corrosion RC beams with different concrete strength*. Journal of Coastal Research (73), 259-264.
- Yoon, S., Wang, K., Weiss, W., & Shah, S. P. (2000). *Interaction between Loading, Corrosión, and Serviceability of Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal, 637-644.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Comparación de potenciales de corrosión a 10 años en especímenes de concreto armado expuestos en las costas de Campeche

T. Pérez López¹, M. Sosa Baz¹, A. Y. Gómez Pérez^{*1}, J. A. Paat Estrella, A. Torres-Acosta, O. Troconis de Rincón

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

¹ Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana

Autor de Contacto: al044005@uacam.mx

Resumen

El medio marino se conoce por ser un entorno muy agresivo debido a que las sales transportadas por el viento son depositadas sobre la superficie del material metálico provocando su corrosión. Especímenes de concreto reforzados fueron elaborados con relaciones agua/cemento 0.45 y 0.65; y estas fueron expuestas en 3 diferentes sitios, uno de estos sitios se encuentra a un costado de la planta termoeléctrica, que libera dióxido de azufre, este contaminante reacciona con la humedad y genera deposiciones ácidas. Las variables meteorológicas como: la temperatura, precipitación y humedad relativa fueron medidas durante 10 años para relacionar su contribución al deterioro del hormigón. Además, se midió el potencial de media celda. Y por último fue medida la velocidad de desposición de cloruros y sulfatos, esto para la caracterización de los microclimas según la ISO 9223:2012-4. Los resultados muestran que el proceso de corrosión no fue iniciado a pesar de una alta humedad relativa, temperatura, tiempo de humectación, concentración de cloruro y de dióxido de azufre. La buena propiedad de los especímenes se atribuye a la excelente calidad de los materiales, a la dosis correcta que se utilizó y el procedimiento adecuado y controlado de colado para la su elaboración, lo que les proporcionó mayor durabilidad.

Palabras Clave: Corrosión, cloruros, dióxido de azufre.

Abstract

The marine environment is known to be a very aggressive environment because the salts carried by the wind are deposited on the surface of the metallic material causing its corrosion. Reinforced concrete specimens were made with water/cement ratios of 0.45 and 0.65; and these were exposed in 3 different sites, one of these sites is located at the side of the thermoelectric plant, which releases sulfur dioxide, this contaminant reacts with moisture and generates acid depositions. Meteorological variables such as:

temperature, precipitation and relative humidity were measured during 10 years to relate their contribution to the deterioration of the concrete. In addition, the potential of half a cell was measured. And finally, the speed of chloride and sulfate deposition was measured for the characterization of microclimates according to ISO 9223:20122-4. The results show that the corrosion process was not initiated despite high relative humidity, temperature, wetting time, chloride and sulfur dioxide concentration. The good property of the specimens is attributed to the excellent quality of the materials, to the correct dose that was utilized and the adequate and controlled procedure of casting for the elaboration, which provided them with greater durability.

Keywords: Corrosion, chlorides, sulfure dioxide.

1. Introducción

La corrosión en pocas palabras es el deterioro del metal debido a los efectos del entorno, puede clasificarse de diferentes maneras y se presenta en casi todos los tipos de metal y/o aleaciones de estas. El metal contenido en las estructuras de concreto es protegido del medio exterior gracias a la alcalinidad que posee el concreto sin embargo puede llegar a corroerse cuándo los iones cloruros y el dióxido de azufre ingresan al concreto por medio de los poros (Johannesson, 2001). Diversos factores de contaminación pueden acelerar el proceso de corrosión, junto con los factores meteorológicos (humedad, lluvia, niebla y rocío) son determinantes para la intensidad de los procesos corrosivos, a menudo llegando a potenciar estos efectos actuando de manera simultánea.

La carbonatación es un proceso de reacción entre el dióxido de carbono (CO₂), en la atmósfera y las sustancias alcalinas presentes en la solución del poro en el concreto, y con las diferentes fases en la pasta de cemento hidratada, dando como resultado reacciones de neutralización del material (Troconis de Rincón, 1997). Este estudio se centró en evaluar los potenciales de media celda obtenidos durante 10 años. Todo esto se llevó a cabo en 3 sitios de la Ciudad de Campeche, Campeche. La ciudad de Campeche se encuentra ubicada en costa, colindando con los municipios de Tenabo, Champotón y Hopelchen. Se encuentra en el golfo de México. A causa de la ubicación geográfica de esta ciudad y su tipo de clima se cree que los materiales podrían tener una degradación más rápida de lo usual. La corrosión atmosférica no es dependiente solamente de la temperatura, la cual el promedio anual en la ciudad de Campeche es de 27° C, y la máxima histórica de 47° C (Inegi, 2008), sino es dependiente de otros factores. La primera probeta de concreto reforzado fue expuesta en un medio marino tropical en Campeche, México, a 300 m de la costa (figura 1a) el segundo sitio de exposición fue el CRIP ubicado en Carretera Costera del Golfo 56 (figura 1b) y la tercera se posicionó en el centro Metereológico de la Cd. de Campeche (figura 1c).

2. Procedimiento

2.1 Elaboración de especímenes.

En el año 2003 se realizó la elaboración de especímenes de concreto armado, siendo su relación agua/cemento del 0.65, y la varilla a estudiar se colocó a 15 cm de la superficie como se muestra en la figura 2.

En cada sitio de exposición se colocaron tres probetas de concreto armado, 15×15×30 cm, por cada mezcla. Los prismas fueron reforzados con seis barras (9,5 mm en diámetro), las cuales se colocaron a diferentes profundidades (15, 20 y 30 mm), tres de ellas en la cara expuesta a los vientos preferenciales y las otras tres en la cara resguardada de los mismos.

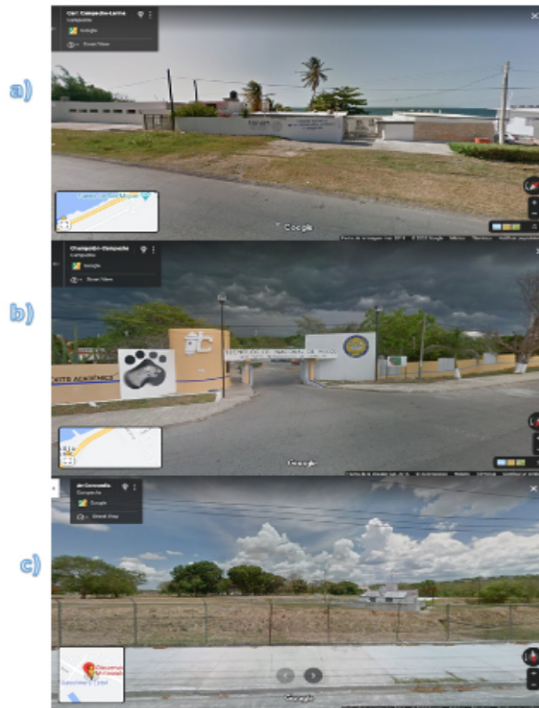


Figura 1. Ubicación de las probetas en tres diferentes sitios, a) CRIP, b) TECNM, c) SMN.



Figura 2. Estructura interna de las probetas de concreto reforzado.

2.2 Ensayos electroquímicos

Se realizaron pruebas de potencial de corrosión usando las siguientes medidas, $E_{corr} < -250$ mV vs. Cu/CuSO₄ e $i_{corr} > 0,1$ μ A/cm²), Los primeros años la evaluación electroquímica se hizo de manera mensual, y después su evaluación fue cada 3 meses, cada abril, agosto y diciembre.

Se midió el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión de acuerdo con el manual del DURAR, utilizando el equipo Gcorr 6. El criterio de análisis de la técnica mencionada se indica en la tabla 1.

2.3-Parámetros climáticos medioambientales

Los parámetros medioambientales tomados en cuenta fueron la temperatura, el grado de precipitación, estos datos fueron obtenidos a través de la página de la conagua y del SMN.

La atmosfera fue caracterizada en relación a su agresividad, basado principalmente en las normas de la “International Organization for Standardization (ISO), utilizando en este estudio la norma ISO 9223:2012-4 Los principales factores que se consideran para la caracterización de una atmósfera son los siguientes:

- Tiempo de humectación.
- Velocidad de deposición de SO₂ y
- Velocidad de deposición de iones cloruro.

En la tabla se puede tabular la corrosividad de la atmósfera se divide en cinco categorías:

Tabla 1. Criterio del potencial de corrosión del acero de refuerzo en concreto.

Ecorr vs Cu/CuSO₄ (mV)	Probabilidad de corrosión
Mayor a -200	10% que se presente (pasivo)
-200 ~ -350	Zona incierta (Pasiva o activa)
Menor a -350	90% que se presente (Activa)

Tabla 2. Categorías de la corrosividad atmosférica.

Categoría	Corrosividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta
CX	Extrema

3. Resultados

3.1 Pruebas electroquímicas

Se realizaron pruebas de potencial de corrosión a las probetas ubicadas en tre sitios diferentes, se esperaba que la ubicada en el TECNM fuese la primera en corroerse ya que en donde se encuentra existe una concentración de sulfuros mayor que en los otros dos lugares (Sosa, 2015), sin embargo si analizamos su grafica de potencial vs Tiempo, se puede observar que durante los años de exposición los valores rodaron entre 140mV y -110mV, lo cual son muy buenos valores, ya que pasando los -200mV significa que las varillas estan activas o en un momento incierto. En la figura 3 se observa solo las mediciones realizadas a 15mm de recubrimiento. Las medidas de potencial de corrosión no cambiaron significativamente, de igual forma nos muestra evidencia de los años en que la varilla estuvo y está pasiva. Si hubo picos prominentes, pero esto se debió a que en estas épocas de año hubo altas precipitaciones y una temperatura usualmente elevada lo que aceleraría el proceso de corrosión en ese lapso.

3.2 Datos climatológicos

En la figura 3 se puede observar que los meses con mayor precipitación son agosto, septiembre octubre. Fechas en las cuales se pueden observar picos en los gráficos de potencial electroquímico. (figura 3, 4 y 5)

La temperatura sigue una tendencia, en el último año se registró un incremento de la temperatura del mes de abril, siendo esta de 30 °C.

Investigaciones acerca de la agresividad de la atmósfera han sido desarrolladas en la región, mostrando las particularidades de cada sitio. Corvo et al. presentan información muy valiosa en la región, mostrando la importancia de este tipo de investigación. La variación de la temperatura en el transcurso del tiempo. El intervalo de variación va de 10 °C a 38 °C, mostrando máximos de 40 °C, teniendo un promedio de 27 °C. Es notorio el descenso de la temperatura durante el invierno y el incremento en primavera y verano.

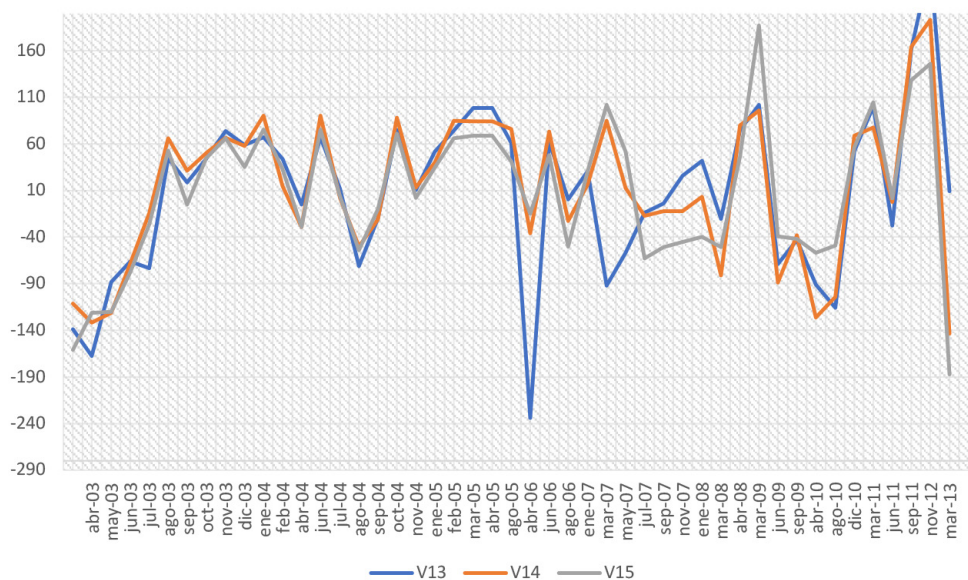


Figura 3. Potencial de corrosión en varillas de 15mm de recubrimiento de la relación a/c 0.65 ubicado en el tecnologico de Campeche (TECNM).

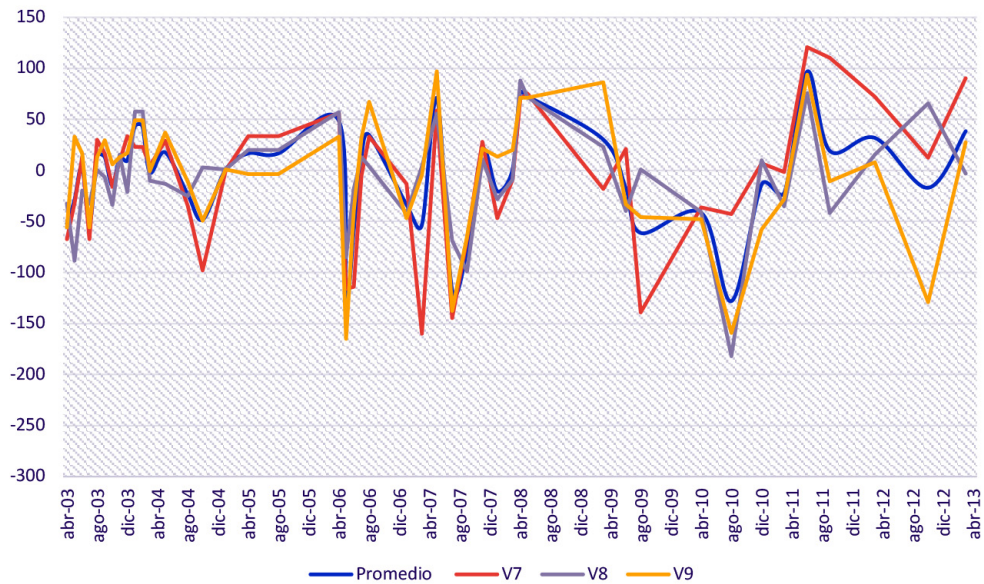


Figura 4. Potencial de corrosión en varillas de 15mm de recubrimiento de la relación a/c 0.65 ubicado en el CRIP.

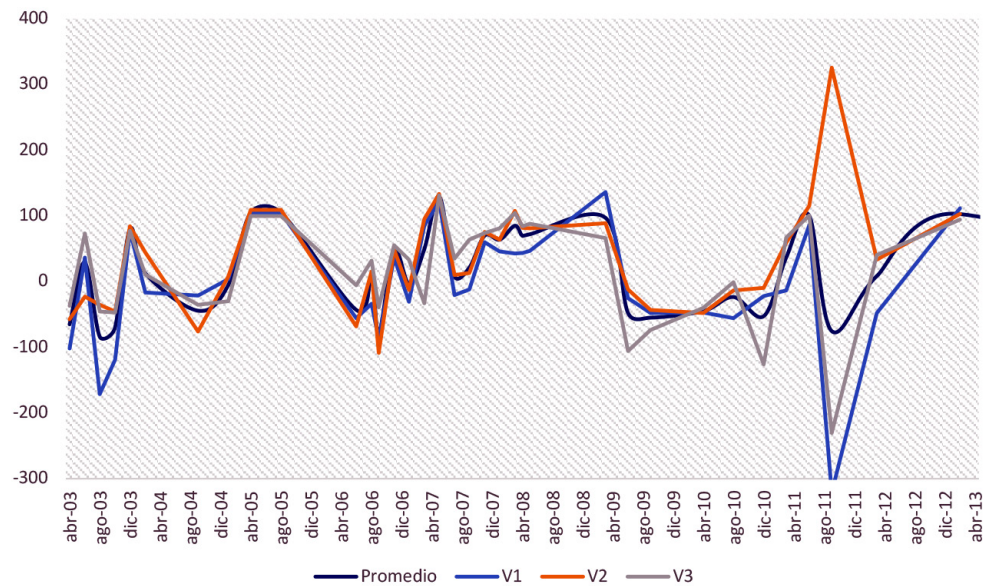


Figura 5. Potencial de corrosión en varillas de 15mm de recubrimiento de la relación a/c 0.65 ubicado en el SMN.

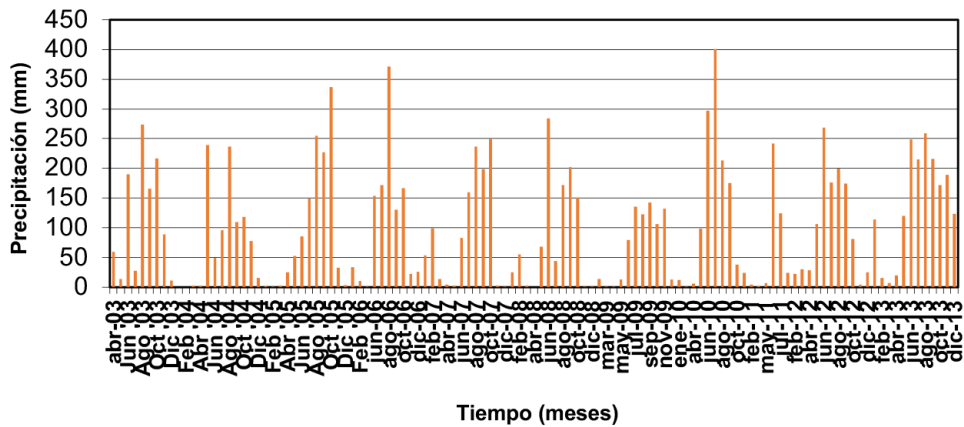


Figura 6. Gráfico de precipitación en mm., a través de los meses.

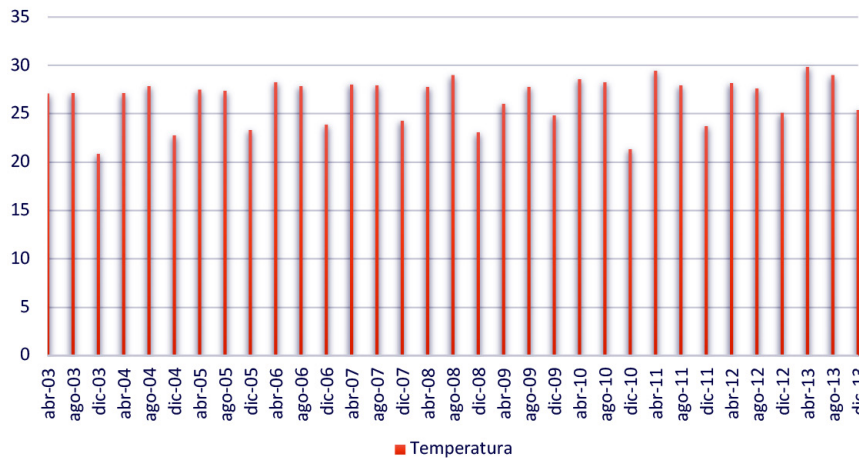


Figura 7. Temperatura promedio mensual durante 10 años.

Por medio de estudios anteriores se sabe que los vientos dominantes son del este y sureste. En este trayecto, parte de la humedad que adquieren del Mar Caribe se retiene en su recorrido terrestre. Para la ciudad de Campeche, es clave en la agresividad de la atmosfera, ya que la brisa marina va preferencialmente de tierra a mar, lo que reduce la cantidad de iones cloruros depositados sobre la superficie de los materiales de construcción. (Sosa, 2015).

3.3 Caracterización de la agresividad de los microclimas

Al sacarse un promedio de la velocidad de deposición de cloruros en SMN el resultado obtenido fue de 13mg(m²*día), lo cual lo posiciona como nivel moderado de Corrosividad ambiental según la ISO9223. (figura 8)

En el segundo sitio el cual es el CRIP de igual forma se sacó un promedio de la velocidad de deposición de cloruros el resultado obtenido fue de 69.140 mg(m²*día), lo cual lo posiciona como nivel Alto de Corrosividad ambiental según la ISO9223. (figura 10)

En el tercer sitio el cual es el ITCNM de igual forma se sacó un promedio de la velocidad de deposición de cloruros el resultado obtenido fue de 33.51 mg(m²*día), lo cual lo posiciona como nivel Moderado de Corrosividad ambiental según la ISO9223.(figura 12)

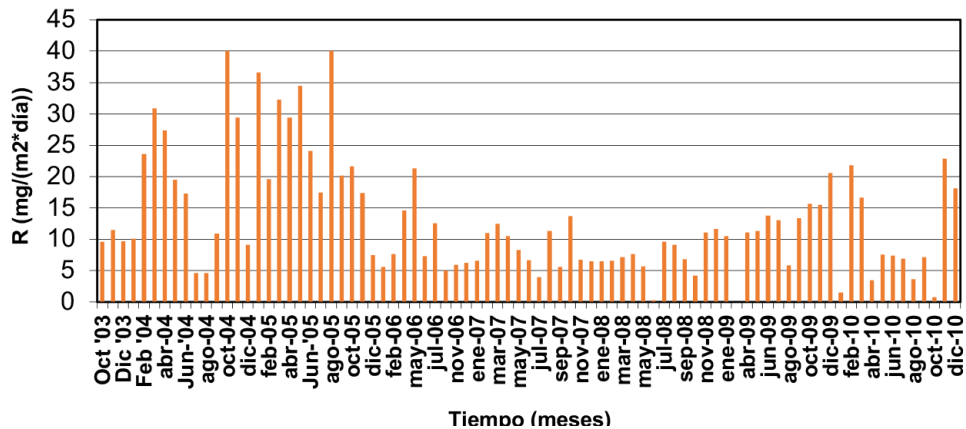


Figura 8. Velocidad de deposición de cloruros mensualmente en SMN.

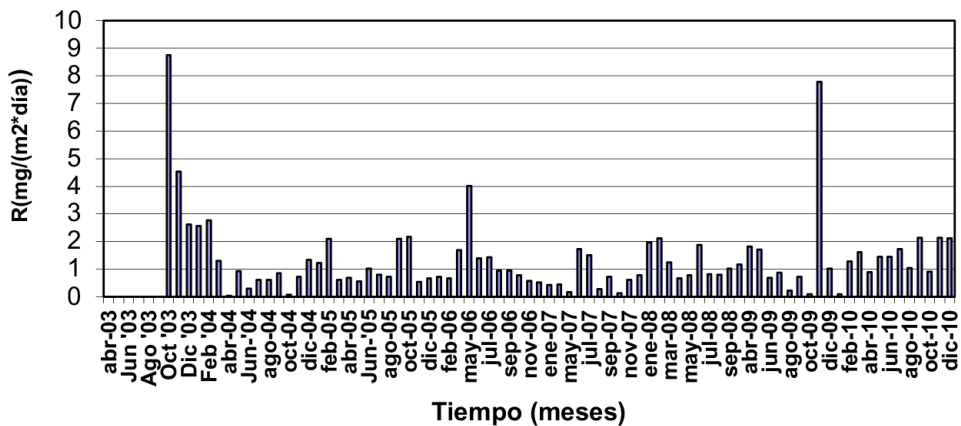


Figura 9. Velocidad de deposición de SO₂.

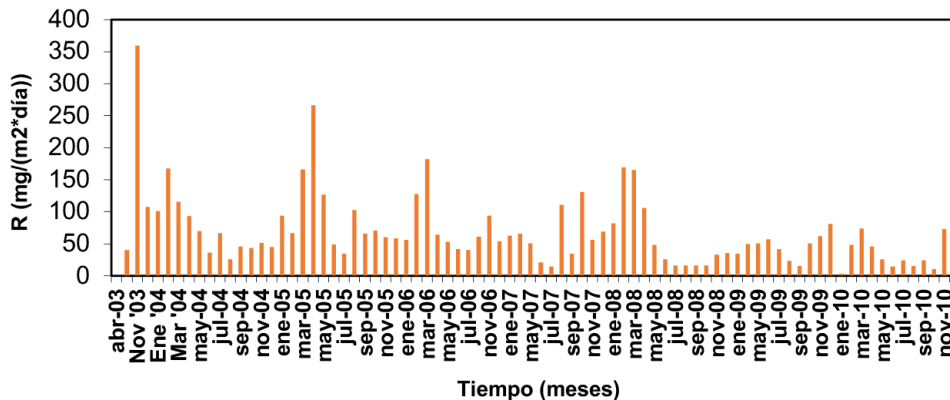


Figura 10. Velocidad de deposición de cloruros mensualmente en CRIP.

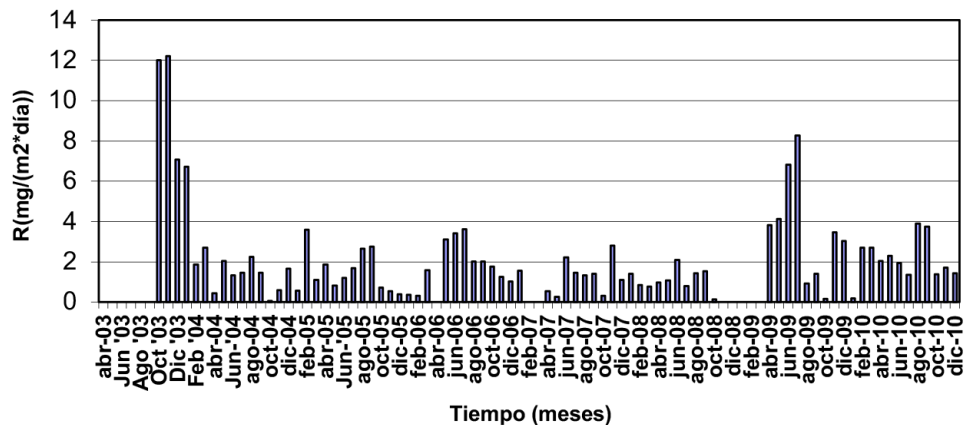


Figura 11. Velocidad de deposición de SO₂.

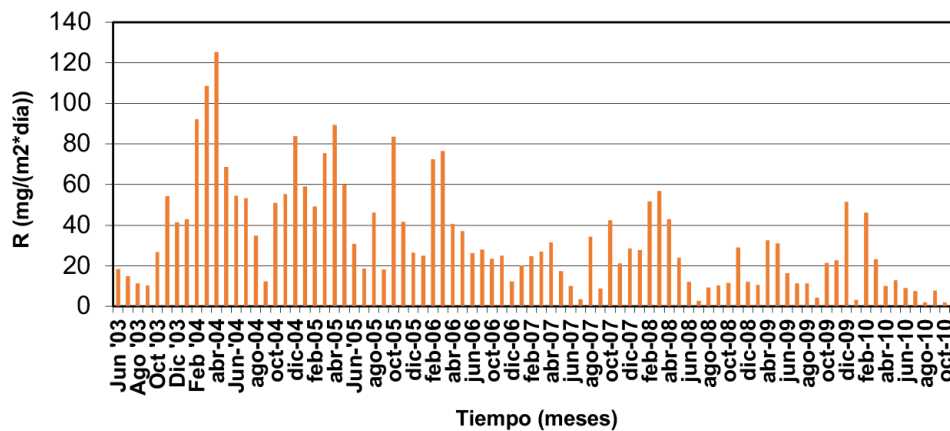


Figura 12. Velocidad de deposición de cloruros mensualmente en ITC.

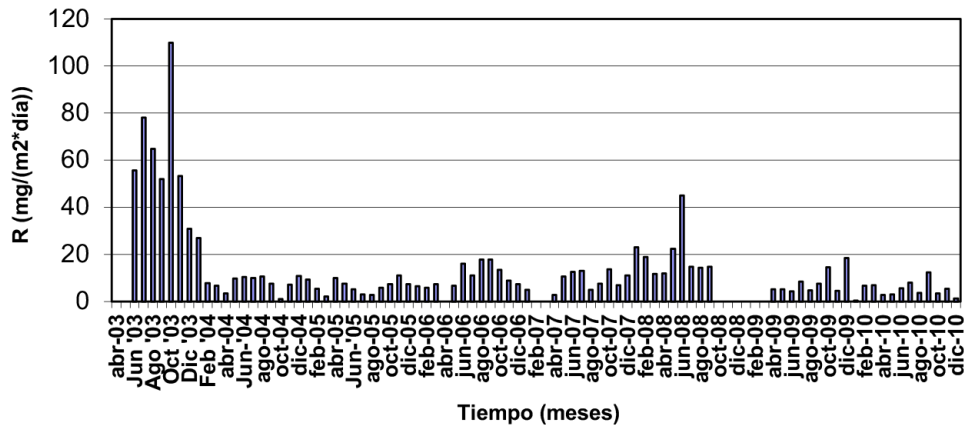


Figura 13. Velocidad de deposición de SO₂.

4. Conclusiones

A pesar de haber transcurrido 10 años desde la elaboración y exposición de las probetas de concreto reforzado, estas no han mostrado indicios de carbonatación y corrosión de la varilla interna a 15cm, la cual al estar más cercana a la superficie se espera que sea la primera en ser afectada. Se obtuvieron los datos de potencial de corrosión en el TECNM y CRIP, el cual se esperaría que fueran sitios con un microclima más perjudicial, a pesar de serlo, gracias a la dirección del viento (Sosa, 2015) que se da de tierra a mar, los cloruros y sulfatos no afectan al concreto, las varillas continúan en muy buenas condiciones, esto se podría relacionar a la muy buena calidad que posee el concreto, y al buen procedimiento de elaboración, incluso a una relación a/c del 0.65 (Menor calidad).

5. Agradecimientos

Se les agradece a los directivos del Instituto tecnológico de Campeche, CRIP y SNM por las facilidades que ofrecieron para la correcta instalación de las probetas de concreto armado. Al SMN por el acceso a la información climatológica. Al proyecto DURACON encabezado por la Dra. O. Troconis de Rincón. Y al Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad autónoma de Campeche.

6. Referencias

- Sosa Baz, M. R., T. Pérez López, F. E. Corvo Pérez, A. Torres Acosta y O. Trocónis de Rincón, “Estudio del deterioro de especímenes de concreto armado expuestas a 300 m de la costa de Campeche, México”, CENIC. Ciencias Químicas, vol. 46, pp. 81-89, 2015.
- Johannesson B., Utgenannt P.,”Microstructural Changes caused by carbonation of cement mortar”. Cement and concrete Research. Vol. 31. 2001. pp. 925-931.
- Troconis de Rincón, O. y Miembros de la Red DURAR. (1997). Manual de Inspección, Diagnóstico y Reparación de Estructuras de Hormigón Armado. Maracaibo, Venezuela. 1era. Edición.
- ISO/DIS 9226. “Corrosion of metals and alloys, Corrosivity of atmospheres, Methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity “.
- Manual de Inspección. “Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XV.B DURAR, 2a. Ed., ISBN 980-296-541-3, Julio 1998.
- Reyes, T. J. “Influencia de los Principales Factores Climáticos y de la Calidad del Aire Sobre la Corrosión Atmosférica de los Metales en la Costa Sureste del Golfo de México”. Tesis de Maestría, U.V., 1998.
- Corvo, F., Haces, C., Betancourt, N., Maldonado, L., Veleza, L., Echeverria, M. “Atmospheric corrosivity in the Caribbean area”, Corrosion Science 39 (5), 823-833.
- Pérez, T., Castro, P., Genescá, J. “Influence of meteorological parameters over the chloride ingress to concrete exposed to marine environment”, II Congreso Nacional ALCONPAT México 2006, Tampico, México, 2006. ISBN 968-9031-14-7.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Evaluación de la corrosión de aceros AISI 1018 y galvanizados embebidos en concretos ternarios

A.Y. López-López¹, A.E. Landa-Gómez², G. Fajardo-San Miguel³,
R. Orozco-Cruz¹, R. Galván-Martínez¹

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana

² Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana

³ Facultad de ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL)

Autor de Contacto: ari_lopez11@hotmail.com

Resumen

En esta investigación se llevó a cabo la evaluación de la corrosión del acero al carbono (AISI 1018) y acero galvanizado embebido en concretos ternarios con las técnicas electroquímicas de Resistencia la polarización (R_p) y Ruido electroquímico (RE). Se elaboraron concretos con relación $a/c = 0.45$, y se realizó la sustitución parcial del cemento portland ordinario (CPO 40) en 10, 20 y 30 % por ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y ceniza volante (CV). De acuerdo con el análisis de RE, se obtiene la velocidad de corrosión (V_{corr}) como indicador de la degradación de los aceros AISI 1018 y galvanizado, donde se observa que los aceros embebidos en el concreto 15CBCA15CV presentan en promedio un decremento de V_{corr} del 19 y 90 % respectivamente, con respecto a los aceros embebidos en el concreto REF.

Palabras Clave: Corrosión, Concreto Reforzado, Concreto Ternario, Acero Galvanizado.

Abstract

In this research, the corrosion evaluation of carbon steel (AISI 1018) and galvanized steel embedded in ternary concretes was carried out with the electrochemical techniques of Linear Polarization Resistance (LPR) and Electrochemical Noise (EN). Concretes were elaborated with relation to $a/c = 0.45$, and it was carried out the partial substitution of the ordinary portland cement (OPC) in 10, 20 and 30% by sugar cane bagasse ash (SCBA) and fly ash (FA). According to the EN analysis, the corrosion rate (V_{corr}) is obtained as an indicator of the degradation of AISI 1018 and galvanized steels, where it is observed that the steels embedded in 15CBCA15CV concrete present an average decrease of V_{corr} of 19 and 90% respectively, with respect to the steels embedded in REF concrete.

Keywords: Corrosion, Reinforced Concrete, Ternary Concrete, Galvanized Steel

Resumo

Nesta investigação, a avaliação da corrosão do aço carbono (AISI 1018) e do aço galvanizado embutido em concreto ternário foi realizada com as técnicas eletroquímicas de Resistência à Polarização (R_p) e Ruído Eletroquímico (RE). O concreto foi desenvolvido em relação a $a/c = 0,45$, e a substituição parcial do cimento portland comum (CPO 40) por 10, 20 e 30% por cinzas de bagaço (CBCA) e cinzas volantes (CV) foi realizada. De acordo com a análise da RE, a taxa de corrosão (V_{corr}) é obtida como um indicador da degradação dos aços AISI 1018 e galvanizados, onde se observa que os aços embutidos no concreto 15CBCA15CV apresentam uma diminuição média no V_{corr} de 19 e 90% respectivamente, com respeito aos aços embutidos no concreto REF.

Palavras-chave: Corrosão, Betão Armado, Betão Ternário, Aço Galvanizado

1. Introducción

El concreto en combinación con el acero de refuerzo constituyen el sistema de construcción más utilizado en esta industria, con el cual se construyen estructuras como edificios, presas, puentes, aparcamientos, etc. debido a que desarrolla propiedades mecánicas y de durabilidad como ningún otro material. Sin embargo, las estructuras de concreto reforzado (ECR) pueden presentar diferentes problemas de deterioro, y uno de los principales es la corrosión de las barras de acero embebidas en el concreto endurecido, en consecuencia, esos daños reducen la vida útil de la estructura y aumenta los costos de mantenimiento y reparación (Lee *et al.*, 2018; Cramer *et al.*, 2002).

Inicialmente, el concreto promueve la formación de una película pasiva en el acero de refuerzo, debido al calor de hidratación originado por las reacciones exotérmicas entre el agua y los compuestos químicos del cemento. La capa pasiva es compacta y adherente, lo cual genera una barrera protectora del acero cuando la fase acuosa del concreto mantiene un $pH=12$. La destrucción de esta se puede lograr cuando agentes nocivos externos entran a la matriz cementante y ocasionan la despasivación, es decir, se fractura dicha película. Los principales agentes externos son los iones despasivantes tales como: cloruros (Cl^{-1}) y sulfatos (SO_4^{-2}), y por otra parte la carbonatación del concreto con el ingreso de CO_2 en la matriz cementante. (Rivera-Corral *et al.*, 2017; Fajardo *et al.*, 2009).

Un estudio realizado por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE) en 2013, estimó un costo por corrosión de 2.5 Billones de dólares, lo que equivale a un 3.4 % del PIB mundial, lo que revela que las pérdidas monetarias por el fenómeno de corrosión son alarmantes (NACE, 2013).

Hoy en día, existen varias investigaciones acerca de alternativas para disminuir el problema de corrosión en las estructuras de concretos reforzados, de acuerdo con esto, se ha implementado la reutilización de materiales suplementarios productos de desechos industriales y agroindustriales, que pueden modificar las propiedades físicas y mecánicas del concreto, como su porosidad total y la distribución del tamaño de poro, interfiriendo así en el transporte de iones agresivos hacia el refuerzo metálico (Sujavanich *et al.*, 2017; Ba-bae y Castel, 2016). Además, existe la utilización de barras de acero galvanizado en reemplazo por el acero AISI 1018, de igual manera para contrarrestar el fenómeno de corrosión en el concreto reforzado (Roventi *et al.*, 2014; Padilla y Alfantazi, 2014).

En base a lo anterior, en el presente trabajo se evaluó el fenómeno de corrosión mediante el seguimiento de los potenciales de corrosión (E_{corr}) y la aplicación de las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal (RPL) y ruido electroquímico (RE) a los aceros AISI 1018 y galvanizado en un periodo de 120 días. Con la aplicación de las técnicas electroquímicas se busca demostrar la contribución de la ceniza

de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y ceniza volante (CV) en la disminución del fenómeno de corrosión en los aceros de refuerzo.

2. Procedimiento

2.1 Materiales

Para la elaboración de los especímenes de concreto hidráulico se empleó cemento portland ordinario (CPO 40), el cual cumple con las especificaciones de la normativa ASTM C150/C150M. La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y la ceniza volante (CV) cumplen con las especificaciones de la norma ASTM C618, para ser utilizadas como puzolanas naturales. Los agregados pétreos (grava y arena) son de tipo calizo, productos de trituración y cumplen con la normativa ASTM C33/C33M. Por último, se añadió un aditivo líquido reductor de agua de alto rango y superplastificante de alto desempeño libre de cloruros.

2.1 Diseño de mezclas de concreto

El diseño de las mezclas de concreto se realizó conforme a lo especificado en el método del ACI 211.1, se utilizó una relación agua cemento de 0.45. En la tabla 1, se presenta la dosificación de los concretos ternarios para la elaboración un metro cúbico de concreto.

La tabla 2 muestra la nomenclatura de los aceros y de las mezclas de concreto evaluados en la presente investigación.

Tabla 1. Dosificación de las mezclas de concreto.

Mezclas	Materiales (kg/m ³)						
	Cemento	Grava	Arena	Agua	CBCA	CV	Aditivo
REF	481	859	746	212	0	0	4.4
05CBCA05CV	432.9	859	746	212	24.05	24.05	4.4
10CBCA10CV	384.8	859	746	212	48.1	48.1	4.4
15CBCA15CV	336.7	859	746	212	72.15	72.15	4.4

Tabla 2. Nomenclatura de los aceros y concretos.

Aceros		Concretos	
Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
AC	AISI 1018	REF	Referencia (100% CPO 40)
		05CB05CV	Concreto Ternario I (90%CPO-05%CBCA-05%CV)
AG	Galvanizado	10CB10CV	Concreto Ternario II (80%CPO-10%CBCA-10%CV)
		15CB15CV	Concreto Ternario III (70%CPO-15%CBCA-15%CV)

2.3 Preparación de electrodos de trabajo.

Se utilizaron barras corrugadas de acero AISI 1018 y acero galvanizado de 3/8" de diámetro y 12 cm de longitud como electrodos de trabajo. Se determinó un área total expuesta de 14.9 cm², que se delimitó con pintura epóxica. Así mismo, los electrodos de trabajo se introdujeron en un tubo de CPVC de 1/2", que fue rellenado con resina epóxica encapsulando el electrodo y dejando libre solo el área de exposición, esto con el objetivo de proteger los electrodos. Posteriormente, se embebieron en especímenes de concreto con dimensiones de 15 x 7 x 15 cm. Las muestras de concreto se curaron en agua potable a una temperatura de 23°C ± 2, durante el periodo de evaluación.

2.4 Celda electroquímica

Se utilizó una celda electroquímica con arreglo típico de tres electrodos, un electrodo de trabajo (acero AISI 1018 y acero galvanizado), un electrodo de referencia (electrodo de calomel saturado) y un electrodo auxiliar (barra de grafito sinterizado). Se realizó el monitoreo de los potenciales de corrosión (E_{corr}) de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C876. Así mismo, se implementó la técnica electroquímica de resistencia a la polarización (R_p) de acuerdo con la designación ASTM G59, para determinar la densidad de corrosión (i_{corr}). Los parámetros de prueba fueron los siguientes: una polarización de ± 0.020 V con respecto a E_{corr} y una velocidad de barrido de 1.67 E⁻⁴ V/s.

Por otra parte, para la prueba de ruido electroquímico se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM G199, se empleó una celda electroquímica con arreglo de dos electrodos de trabajo nominalmente idénticos y un electrodo de referencia (electrodo de calomel saturado). El seguimiento de potencial y corriente se llevó a cabo durante 1200 segundos con un intervalo de muestreo de datos de 1 segundo (1 Hz).

3. Resultados y discusión

3.1 Potenciales de corrosión, E_{corr}

En la figura 1 se muestra el comportamiento de los potenciales de corrosión de los aceros embebidos en los concretos ternarios, estos potenciales fueron interpretados con base en la norma ASTM C876 (ASTM C 876-15, 2015).

De acuerdo con la figura 1, se observa que los aceros AISI 1018 presentaron valores en el rango de -150 y -350 mV a partir del día 1 hasta el día 75, por lo que se encuentran en las zonas de 10 % probabilidad de corrosión e incertidumbre, lo que indica una baja probabilidad de corrosión, este comportamiento es atribuido principalmente a la formación de una capa pasiva de productos de corrosión, formada en la superficie del acero de refuerzo debido a la alcalinidad presente en el concreto (Liu *et al.*, 2016). Posterior a estos 75 días, el acero embebido en los concretos con sustituciones puzolánicas se encuentra en valores más nobles que el acero AISI 1018 del concreto de referencia.

Por otro lado, los aceros galvanizados en el tiempo de evaluación presentaron valores por debajo de -500 mV, lo que indica que se encuentran en la zona de corrosión severa. Este comportamiento es atribuido principalmente a la disolución de la capa de zinc, debido a que el concreto contiene un pH > 12.5. (Tan y Hansson, 2018). Es importante mencionar, que los aceros galvanizados embebidos en los concretos con sustituciones puzolánicas presentaron valores menos electronegativos que el acero galvanizado embebido en el concreto de referencia.

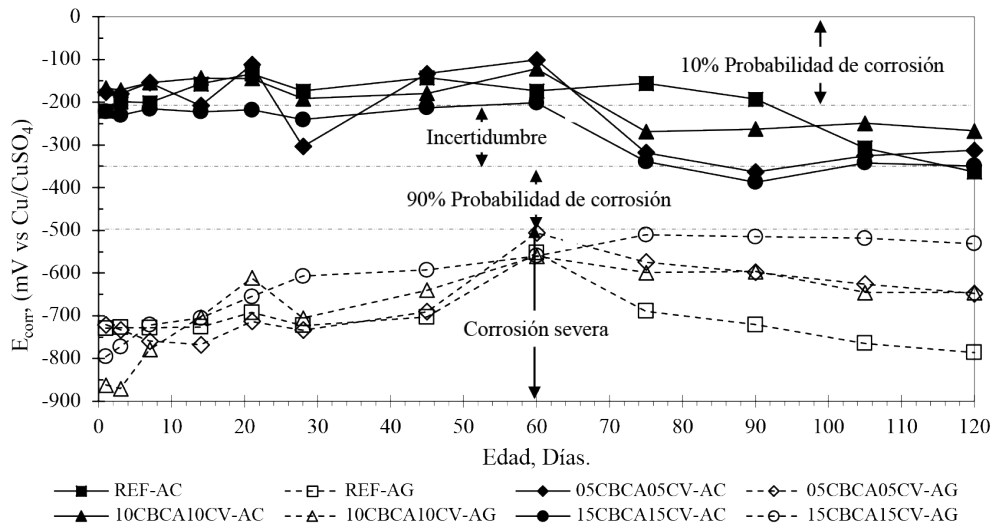


Figura 1. E_{corr} en función del tiempo de exposición de los aceros AISI 1018 y galvanizado.

3.2 Densidad de corriente de corrosión, i_{corr}

En la figura 2 se presentan los resultados de densidad de corriente de corrosión de los aceros AISI 1018 y galvanizado embebidos en los concretos ternarios. Estos resultados fueron interpretados de acuerdo con los criterios del manual de la Red Durar (Trocónis *et al.*, 1997).

Los aceros AISI 1018 presentaron valores de densidad de corrosión en un rango de 0.333 a 0.041 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, por lo que estos se encuentran posicionados dentro de las zonas de nivel de corrosión moderada y despreciable. A partir del día 45, el acero AISI 1018 embebido en los concretos ternarios presentan valores de densidad de corrosión menores al de referencia, esto se aprecia en la figura 2, donde el acero embebido en el concreto de referencia a partir del día 1 al 21 y posterior al día 45 se mantiene en la zona de corrosión moderada permaneciendo generalmente por encima de los concretos ternarios. Cabe mencionar que el acero embebido en el concreto 15CBCA15CV-AC mostró el mejor comportamiento en el último periodo de evaluación, ya que presentó una densidad de corrosión de 0.074 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este comportamiento del concreto ternario es atribuido a la reacción puzolánica de la CBCA y CV con el hidróxido de calcio, lo que generan nuevos silicatos de calcio hidratados (SCH), por lo que modifican la matriz de concreto (Franco-Luján *et al.*, 2019).

Por su parte, los aceros galvanizados presentan valores de densidad de corrosión en un rango de 1.312 a 0.113 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, por lo que se encuentran dentro de las zonas de muy elevada, elevada y moderado nivel de corrosión. El acero galvanizado embebido en el concreto de referencia presenta valores de i_{corr} más elevados que los aceros galvanizados embebidos en los concretos ternarios, lo cuales se relacionan con los resultados mencionados de E_{corr} . Así mismo, y de la misma manera que el acero AISI 1018, el acero galvanizado embebido en el concreto 15CBCA15CV-AG presenta el mejor comportamiento frente a la corrosión, debido a que muestra los valores más bajos de i_{corr} .

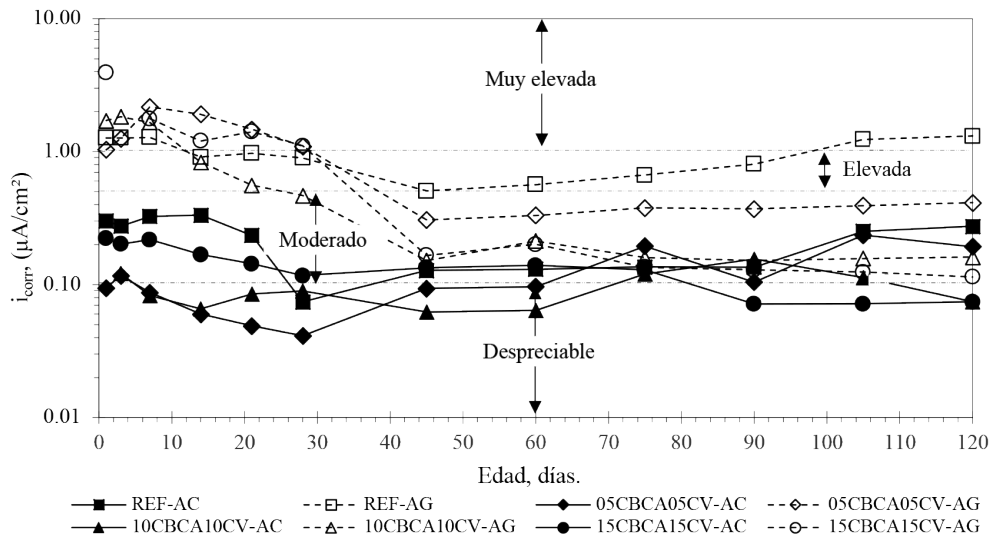


Figura 2. i_{corr} en función del tiempo de exposición de los aceros AISI 1018 y galvanizado.

3.3 Índice de localización (IL)

Este se obtiene mediante parámetros estadísticos, para lo cual se utiliza la desviación estándar de la corriente dividida entre la raíz cuadrada media de la corriente. Existe una clasificación del índice de localización que se divide en 3 secciones en base al carácter localizado (corrosión generalizada, mixta o localizada) (Won Song y Saraswathy, 2007). Esta clasificación se muestra en la tabla 3.

El índice de localización para los aceros se muestra en la figura 3, en donde los aceros AISI 1018 presentan valores correspondientes a las zonas de corrosión mixta y localizada, durante la mayoría del tiempo de evaluación.

Cabe destacar que los aceros AISI 1018 embebidos en los concretos ternarios se encuentran en un tipo de corrosión localizada, esto atribuido principalmente a las celdas de aireación que se desarrollan debido a la formación de la película pasiva en la superficie de estos aceros. En particular la sustitución 15CBCA-15CV-AC se mantuvo la mayor parte del estudio posicionado en la zona de corrosión localizada, esto puede ser atribuido a las reacciones puzolánicas de la CBCA y CV con el hidróxido de calcio, lo que produce más silicatos de calcio hidratados, los cuales desarrollan una matriz de concreto más densificada, es decir, con menor porosidad y permeabilidad, por lo que el acero mantuvo la capa pasiva adsorbida en su superficie, lo cual es característico de estos aceros en el medio alcalino del concreto.

Por su parte los aceros galvanizados se mantuvieron principalmente en la zona de corrosión mixta durante todo el tiempo de estudio, esto decir, presentaron corrosión general y localizada, se atribuye principalmente a la disolución del zinc, lo que genera productos de corrosión como óxido de zinc (ZnO) e hidróxidos de zinc (Zn(OH)) sobre la superficie metálica, y que estos al no ser de carácter protector se desprenden de la misma, generando este tipo de corrosión.

Tabla 3. Tipo de corrosión de acuerdo con el índice de localización.

Tipo de corrosión	IL
Localizada	1 - 0.1
Mixta	0.1 - 0.01
Generalizada	0.01 - 0.001

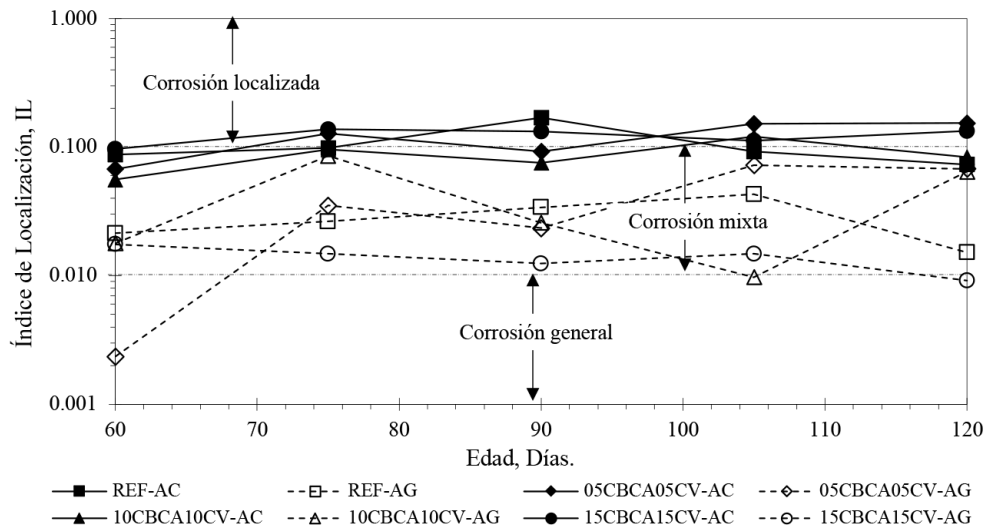


Figura 3. Índice de localización en función del tiempo de exposición para los aceros AISI 1018 y galvanizado.

3. 4 Resistencia de ruido (Rn)

La resistencia de ruido se obtiene mediante métodos estadísticos utilizando el cociente de la desviación estándar del potencial del RE y la desviación estándar de la corriente del RE, posteriormente se multiplica por el área total expuesta. Después de obtener los valores de Rn de cada espécimen de estudio, se llevó a cabo el cálculo para obtener la velocidad de corrosión (V_{corr}) en unidades de penetración (mm/año). En la figura 4 se muestra el gráfico de la V_{corr} para los aceros AISI 1018 y galvanizados estudiados.

Los aceros AISI 1018 presentan valores de V_{corr} en un rango de 0.000112 mm/año a 0.000047 mm/año, se observa que a partir de los 90 días de estudio los aceros embebidos en los concretos ternarios 10CBCA-10CV-AC y 15CBCA15CV-AC presentan valores más bajos de V_{corr} que los demás aceros, al igual que en el análisis de densidad de corrosión, este comportamiento se atribuye al efecto que tienen las adiciones puzolánicas al densificar el concreto y por lo tanto disminuir la permeabilidad de este.

Así mismo, los aceros galvanizados presentan valores de V_{corr} mayores que los aceros AISI 1018, estos están en un rango de 0.0005720 mm/año a 0.0000094 mm/año, los resultados muestran que el concreto de referencia se mantuvo en todo el tiempo del estudio con valores de V_{corr} mayores que todos los concretos ternarios. Destacando al igual que en los aceros AISI 1018, el buen comportamiento ante la corrosión del concreto 15CBCA15CV-AG.

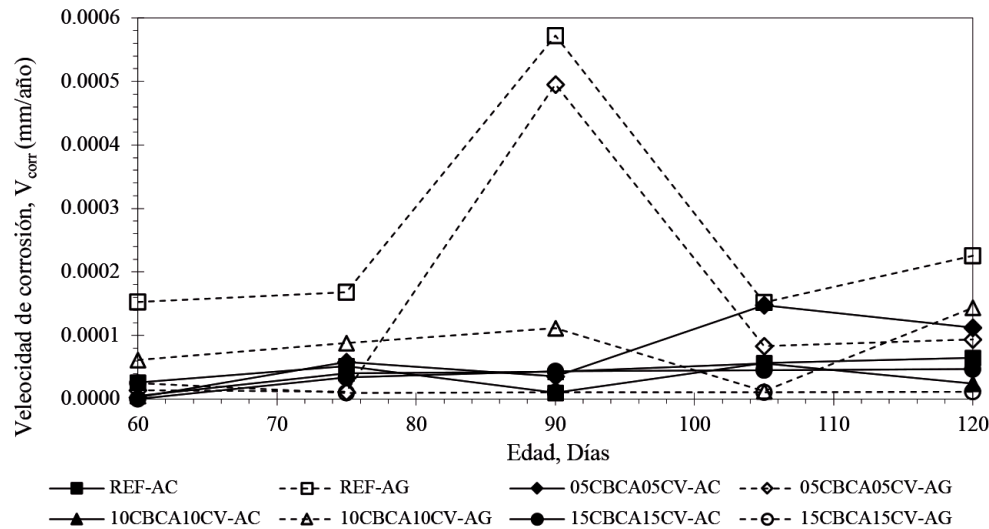


Figura 4. V_{corr} obtenida por R_n , en función del tiempo de exposición de los aceros AISI 1018 y galvanizado.

Finalmente es importante mencionar que los resultados obtenidos con la técnica de ruido electroquímico presentaron buena correlación con los resultados de i_{corr} y E_{corr} .

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación electroquímica de los aceros AISI 1018 y galvanizado con las técnicas de R_p y R_E , se puede concluir lo siguiente:

- Se confirma la contribución de la CBCA y CV a la matriz cementante al promover la disminución el E_{corr} e i_{corr} de los AC y AG. Esto debido a la nucleación de poros por la generación de SCH secundario.
- Los aceros AISI 1018 presentan un tipo de corrosión localizada, esto atribuido a la formación de la película pasiva sobre la superficie del acero lo que produce celdas de aireación diferencial, propiciando la corrosión localizada.
- Los Aceros galvanizados obtuvieron un tipo de corrosión mixta, lo cual es indicativo de una disolución del zinc, lo que genera productos de corrosión como óxido de zinc (ZnO) e hidróxidos de zinc (Zn(OH)) sobre la superficie metálica, y que estos al no ser de carácter protector genera este tipo de corrosión.
- El concreto ternario 15CBCA15CV (15% sustitución de ceniza de bagazo de caña de azúcar y 15% de ceniza volante), desarrolló la matriz cementante más resistente lo que contribuyó a los AC y AG a un decremento de V_{corr} del 19 y 90% respectivamente, con respecto a los aceros embebidos en el concreto REF.

5. Agradecimientos

Los autores A. Y. López-López y A. E. Landa-Gómez externalan su agradecimiento al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción (LIIMC) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, al Instituto de Ingeniería de la universidad veracruzana, al Programa de Doctorado en Materiales y Nanociencia del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología de la

Universidad Veracruzana y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para la realización del presente trabajo de investigación.

6. Referencias

- Lee, H. S., Yang, H. M., Singh, J. K., Prasad, S. K., & Yoo, B. (2018). Corrosion mitigation of steel rebars in chloride contaminated concrete pore solution using inhibitor: An electrochemical investigation. *Construction and Building Materials*, 173, 443–451.
- Rivera-Corral, J. O., Fajardo, G., Arliguie, G., Orozco-Cruz, R., Deby, F., & Valdez, P. (2017). Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish. *Construction and Building Materials*, 147, 815–826.
- ASTM C 876-15. (2015). Standard Test Method for Corrosion Potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *ASTM*.
- Babae, M., & Castel, A. (2016). Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 88, 96–107.
- Cramer, S. D., Covino Jr., B. S., Bullard, S. J., Holcomb, G. R., Russell, J. H., Nelson, F. J., Soltesz, S. M. (2002). Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cement & Concrete Composites*, 24, 101–117.
- Fajardo, G., Valdez, P., & Pacheco, J. (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23, 768–774.
- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, 608–618.
- Liu, G., Zhang, Y., Ni, Z., & Huang, R. (2016). Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 15, 1–5.
- NACE. (2013). Estudio internacional de medidas de prevención, aplicación y economía de tecnologías de corrosión. HOUSTON: NACE.
- Padilla, V., & Alfantazi, A. (2014). Corrosion film breakdown of galvanized steel in sulphate–chloride Solutions. *Construction and Building Materials*, 66, 447–457
- Roventi, G., Bellezze, T., Giuliani, G., & Conti, C. (2014). Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet–dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. *Cement and Concrete Research*, 65, 76–84.
- Sujavanich, S., Suwanvitaya, P., Chaysuwan, D., & Heness, G. (2017). Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 830–837.
- Tan, Z. Q., & Hansson, C. M. (2018). Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete. *Corrosion Science*, 50, 2512–2522.
- Trocónis et al., O. (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. *Red DURAR. CYTED. Venezuela*.
- Won Song, H., & Saraswathy, V. (2007). Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2, 1-28

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Análisis del proceso de corrosión mediante el uso de la técnica de ruido electroquímico en probetas de concreto reforzado fabricadas con agregados calcáreos y expuestas en un medio marino

C. A. Balan-Ortiz¹, M. Luna-Brito¹, T. Pérez López², R. J. Camacho-Chab

¹ Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche

² Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

³ Instituto Tecnológico de Lerma, Tecnológico Nacional de México

Autor de Contacto: tezperez@uacam.mx

Resumen

En este trabajo se analizó el proceso de corrosión en probetas de concreto reforzado, fabricadas con cloruros y Benzotriazol-1-yloxy, a través de la técnica de ruido electroquímico. Se evaluó el comportamiento del acero a diferentes profundidades. Los especímenes de prueba fueron expuestos durante 8 meses en la zona costera de la ciudad de San Francisco de Campeche, México. Se realizó la caracterización del sitio de exposición y la medición de los potenciales de corrosión y frente de carbonatación. Al finalizar el periodo de exposición las probetas con inhibidor presentaron el menor avance del frente de carbonatación. Las velocidades de corrosión obtenidas son consideradas como bajas y su comportamiento no se relaciona con los parámetros ambientales del sitio de exposición.

Palabras clave: Corrosión; Ruido electroquímico; Medio marino.

Abstract

In this work, the corrosion process was analyzed in reinforced concrete samples, manufactured with chlorides and Benzotriazol-1-yloxy, through the electrochemical noise technique. The behavior of the steel at different depths was evaluated. The test specimens were exposed during 8 months in the coastal zone of the city of San Francisco de Campeche, Mexico. It was carried out the characterization of the exposure site and the measurement of the corrosion and carbonation front potentials. At the end of the exposure period, the specimens with inhibitor presented the lowest advance of the carbonation front. The obtained corrosion speeds are considered as low and their behavior is not related to the environmental parameters of the exposure site.

Keywords: Corrosion; Electrochemical noise; Marine environment.

1. Introducción

El concreto es un material ampliamente usado en la industria de la construcción debido a sus propiedades: durabilidad, resistencia a la contracción, resistencia a la compresión, fuerza y elasticidad. Sin embargo, este material sufre un deterioro significativo en ambientes agresivos como las zonas costeras debido a las condiciones climáticas (Carrillo, Pulido, y Chaparro, 2015). Los principales factores que afectan la durabilidad del concreto son las condiciones de elaboración (relaciones agua-cemento, tiempo de hidratación y temperatura) y el tiempo de exposición durante su vida útil, relacionado con ciclos de congelación-descongelación, secado, carbonatación, humedad y presencia de sales (Ahmad, 2006; Carrillo *et al.*, 2015). Por la naturaleza de sus constituyentes, el concreto es un material altamente alcalino ($\text{pH}=14$) que provee protección al acero de refuerzo a través de su pasivación, y actuando como barrera protectora que evita la penetración de agentes agresivos como sales, oxígeno, contaminantes, CO_2 y agua (Ahmad, 2006). A pesar de estos mecanismos de autoprotección, el concreto puede perder sus propiedades por la reducción de la alcalinidad ($\text{pH}<9$) y favorecer el inicio del proceso de corrosión. La pérdida de alcalinidad se traduce en la destrucción de la capa pasiva debido al proceso de carbonatación y a la presencia de iones cloruro (Chávez-Ulloa *et al.*, 2010)

El proceso de corrosión es un fenómeno electroquímico complejo, resultado de la formación de magnetita (Fe_3O_4) en la interface acero-concreto y su transformación a hematita (Fe_2O_3) (Elsener y Rossi, 2018). Este fenómeno puede ser monitoreado a través de diferentes técnicas electroquímicas: resistencia a la polarización, pulso galvanostático, espectroscopía de impedancia, gráficos de Nyquist, mediciones de potencial y ruido electroquímico (Ahmad, 2006). La técnica de ruido electroquímico (RE) describe las fluctuaciones en corriente y potencial causadas por la corrosión de un electrodo sin la influencia de agentes externos. Por este motivo, es una técnica que permite obtener información directa del proceso de corrosión que tiene lugar en los sistemas bajo estudio (Legat, Leban y Bajt, 2004). El análisis directo de los registros temporales de corriente y potencial proporciona información relacionada al tipo de corrosión: generalizada o localizada (Legat *et al.*, 2004). De igual forma, las señales de RE pueden ser analizadas a través de métodos estadísticos como la media en corriente y potencial, desviación estándar, sesgo, curtosis y resistencia en ruido; parámetros que brindan información sobre la probabilidad de que ocurra el proceso, la amplitud de las fluctuaciones, la presencia de picaduras y la resistencia del electrolito (Cottis, 2008).

A nivel mundial, se estima que los costos asociados al proceso de corrosión se encuentran entre 2.5 y 3 trillones de dólares, lo cual equivale al 3.4% del producto interno bruto global (Koch, 2017; Stewart & Bastidas-arteaga, 2019). Además del impacto económico, la corrosión del acero de refuerzo impacta negativamente a la sociedad y al medio ambiente, debido a los problemas de contaminación que pueden derivar del proceso y a la demanda de recursos naturales y uso de combustibles fósiles para la elaboración de las materias primas del cemento (Ghoshal, 2010; Hansson, 2016; Valencia-Villegas *et al.*, 2020). De hecho, la agencia internacional de energía (IEA), estima que la industria del cemento liberó 1.8 Gt de CO_2 en 2006; cifra que para este año incrementaría a 2.9 Gt y a casi 5 Gt para el año 2050 (Ghoshal, 2010).

Una de las medidas para reducir los costos económicos y efectos ambientales de la corrosión consiste en el uso de inhibidores, sustancias que al ser añadidas durante la etapa de fabricación reducen significativamente la tasa de corrosión (Quraishi, Chauhan, y Saji, 2020). Recientemente, el desarrollo de nuevos inhibidores se ha dirigido a la síntesis de sustancias que sean amigables con el medio ambiente para evitar problemas de toxicidad y contaminación (Quraishi, Chauhan, y Saji, 2020c). Para que un inhibidor sea considerado como amigable debe presentar una dosis letal media (LD50) mayor a 500 mg/kg, presentar tasas de biodegradabilidad del 60 % en 28 días y presentar un coeficiente de partición octanol-agua (Kow) menor a 3

(Quraishi *et al.*, 2020c). Entre los inhibidores que cumplen con estos criterios y que han sido evaluados podemos encontrar líquidos iónicos, compuestos heterocíclicos, medicamentos, extractos provenientes de plantas, carbohidratos, biopolímeros y nanomateriales modificados (Quraishi *et al.*, 2020c). De todas estas sustancias los compuestos heterocíclicos juegan un papel muy importante, ya que pueden encontrarse como constituyentes de muchas de ellas (Quraishi *et al.*, 2020a). La familia de los Triazoles son un conjunto de compuestos heterocíclicos empleados con éxito como inhibidores de la corrosión del cobre, su eficacia es atribuida a la formación de un complejo organometálico estable en la superficie del metal en presencia de soluciones corrosivas (Quraishi, Chauhan y Saji, 2020b). El efecto de estos inhibidores sobre la corrosión del acero de bajo carbono C15 ha sido evaluado por Finšgar, Matjaž y colaboradores en 2016, sus resultados indican un efecto inhibitorio por parte de los azoles evaluados en soluciones de cloruro de sodio al 3% en peso (Finšgar *et al.*, 2016). A pesar de los resultados positivos que se han obtenido, se requiere mayor investigación para evaluar el desempeño de esta familia de compuestos sobre la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto, para determinar su eficiencia como aditivo en el agua de amasado durante la fabricación de estructuras de concreto armado.

En base a lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en analizar el proceso de corrosión mediante el uso de la técnica de ruido electroquímico en probetas de concreto reforzado (con cloruros (C), sin cloruros (S) y con BTA como inhibidor (I) a diferentes profundidades: 10, 20 y 30 mm. Las probetas se fabricaron con agregados calcáreos y se expusieron en la zona costera de la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche, México. Se realizó la medición de los potenciales de corrosión para estimar la probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación mediante la técnica de vía húmeda y la caracterización del sitio de exposición a través de datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para relacionar estas variables con el comportamiento electroquímico de los especímenes de prueba.

2. Procedimiento

El desarrollo experimental se dividió en 5 etapas como se presenta en la figura 1. Cada una es descrita en los siguientes apartados.

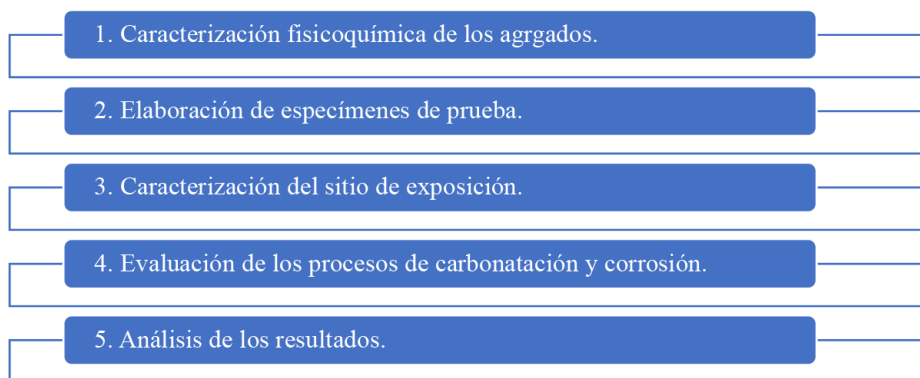


Figura 1. Etapas del proceso experimental.

2.1. Caracterización fisicoquímica de los agregados

La caracterización de los agregados se realizó atendiendo la normativa en materia de construcción de estructuras de concreto para ambientes marinos (tabla 1). La adición del fluidizante y del inhibidor Benzotriazol-1-yloxy se llevó a cabo en base a la norma ASTM-C-1017/1017M, que aborda las especificaciones de los aditivos químicos para uso en la fabricación de concreto fluido.

En base a los resultados de la caracterización de los agregados se diseñó la dosificación de materiales presentado en la tabla 2.

El cemento que se empleó fue de tipo Portland ordinario (CPO) tipo I utilizado principalmente en la construcción de casas, edificios, puentes, cimentaciones, trabajos de mampostería, entre otros. La grava y el polvo utilizados como agregado grueso y fino, respectivamente, se obtuvieron de la trituración de roca caliza de un banco de trituración y aprovechamiento de material pétreo debidamente autorizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Aprovechamiento Sustentable (SMAAS).

Tabla 1. Normas empleadas para la caracterización fisicoquímica de los agregados.

Normas	Ámbito de aplicación
NMX-C-030-ONNCCE-2004	Industria de la construcción-Agregados-Muestreo.
NMX-C-077-ONNCCE-1997	Industria de la construcción-Agregados para concreto- Análisis granulométrico-Método de prueba.
NMX-C-088-ONNCCE-1997	Industria de la construcción-Agregados-Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino.
NMX-C-164-ONNCCE-2002	Industria de la construcción-Agregados-Determinación de la masa específica y absorción de los agregados gruesos.
NOM-C-165-ONNCCE-2002	Industria de la construcción-Agregados-Determinación de la masa específica y absorción de los agregados finos.
NOM-C-111-ONNCCE-2004	Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba.

Tabla 2. Dosificación de materiales para la elaboración de los especímenes de prueba.

Probetas	Cemento (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (L)	NaCl (g/L)	Inhibidor	Fluidizante (mL)
5	51.52	118	188	25.76	0	-	440
5	51.52	118	188	25.76	35	-	440
5	51.52	118	188	25.76	34	BTA	440

BTA: (Benzotriazol-1-yloxy) tripirrolldinophonium hexafluorophosphato.

2.2. Elaboración de los especímenes de concreto

Para la elaboración de los especímenes de concreto reforzado se empleó varilla corrugada número 3, de acuerdo con el código de clasificación de la NMX-C-407. Las varillas de acero de refuerzo contaban con una longitud de 45 cm, y cada una fue dividida en 3 secciones. La sección central fue seleccionada como área de estudio, mientras que los extremos fueron cubiertos con un recubrimiento anticorrosivo (figura 2).

Una vez preparadas, las varillas de acero fueron coladas en los moldes como se ilustra en la figura 3a. Posteriormente, se procedió a la elaboración de la mezcla y colado de los especímenes de concreto, figura 3b. De manera análoga, se elaboraron bajo las mismas condiciones de fabricación, probetas sin acero de refuerzo con una configuración prismática de 15 cm de sección transversal por 60 cm de largo, para ser empleadas en las pruebas de carbonatación.

El acero de refuerzo fue colocado de forma simétrica a 10, 20 y 30 mm de profundidad, con la finalidad de valuar el comportamiento del acero a diferentes profundidades, (figura 4).

2.3 Caracterización del área de exposición

Los especímenes de concreto fabricados fueron colocados cerca de la línea de costa, en el Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP), ubicado sobre la carretera Campeche-Lerma en el kilómetro 5 (figura 5). Los datos meteorológicos de Humedad relativa, Precipitación y Temperatura fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional y se emplearon para enmarcar las condiciones climatológicas durante el periodo de exposición de los especímenes de prueba.

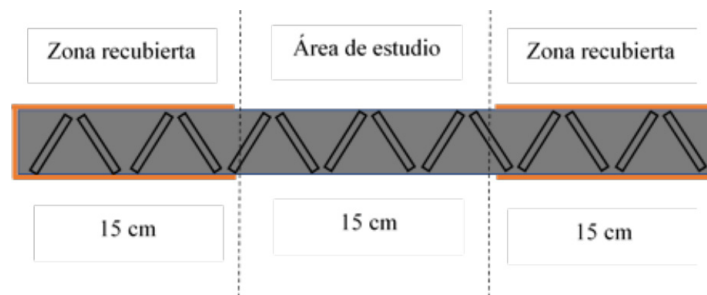


Figura 2. Área de estudio de las varillas embebidas en concreto.

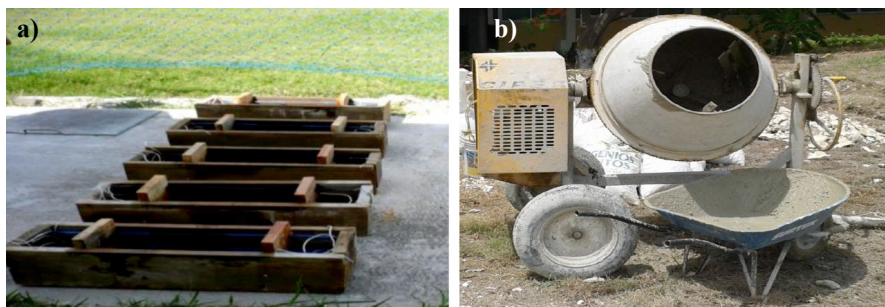


Figura 3. Preparación de los moldes y colado de los especímenes con acero de refuerzo.

2.4 Evaluación de los procesos de carbonatación y corrosión

2.4.1. Método de vía húmeda

Se realizó un corte transversal de 5 cm de grosor a una probeta de cada serie: con cloruros, sin cloruros y con inhibidor (figura 6a), y se procedió a la aplicación de los indicadores ácido-base de manera uniforme. Luego de la aplicación se efectuó la medición de la longitud de la zona incolora (profundidad de carbonatación), determinándose la media aritmética de un mínimo de 3 mediciones por lado (figura 6b).

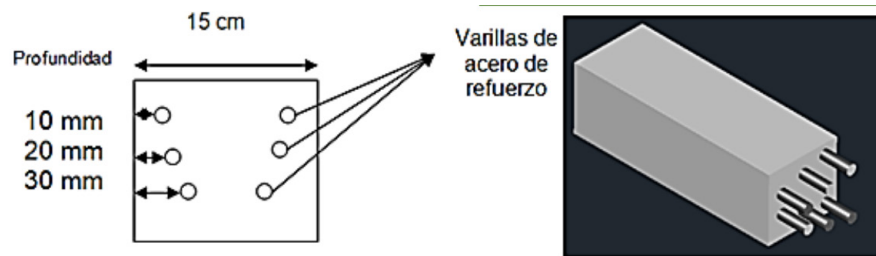


Figura 4. Distribución del acero de refuerzo en la matriz cementante.



Figura 5. Centro Regional de Investigaciones Pesqueras, Campeche, México.

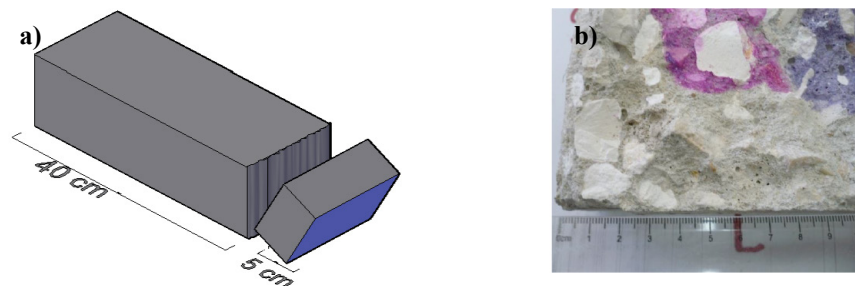


Figura 6. Corte de sección transversal y medición del frente de carbonatación.

2.4.2. Medición de potencial de media celda

Las mediciones de los potenciales de corrosión se realizaron con un voltímetro de alta impedancia en base a la norma ASTM C-876.

2.4.3. Ruido electroquímico

Para las mediciones de ruido electroquímico se utilizó una configuración de tres electrodos, dos electrodos de trabajo, siendo en este caso las varillas de acero, y un electrodo de Calomel saturado como referencia. La celda electroquímica se conformó tal y como se muestra en la figura 7.

El equipo utilizado para la medición de ruido electroquímico es el potenciostato ACM Field Machine Serial 914, el cual se configuró para tomar un total de 1024 puntos, cada uno en intervalos de 0.5 segundos. Una vez obtenidos los registros temporales de ruido electroquímico en corriente y potencial, se analizaron de manera directa para identificar procesos de corrosión localizada o generalizada. Posteriormente, los datos se sometieron a un proceso de remoción de tendencias a través del programa MatLab para la determinación de la resistencia en ruido y velocidad de corrosión.

3. Resultados

3.1. Caracterización climática del sitio de exposición

En la figura 8 se presentan los datos correspondientes a la humedad relativa (%), precipitación (mm) y Temperatura (°C) registrados por el SMN para la ciudad de San Francisco de Campeche. La exposición de los especímenes se llevó a cabo principalmente durante el periodo de estiaje y abarcó el inicio de la temporada de lluvias, Figura 8a. A pesar de las bajas tasas de precipitación registradas en el periodo diciembre-mayo, la humedad relativa del ambiente permanece por arriba del 60 % debido a la temporada de frentes fríos que inicia en septiembre de cada año y termina en el mes de mayo del siguiente año, de acuerdo con el SMN. El efecto de estos fenómenos puede apreciarse en la figura 8c con las variaciones de temperaturas presentadas durante el periodo de exposición. Conforme se acerca el fin de la temporada de frentes fríos, la temperatura registrada en la ciudad incrementa de forma gradual hasta alcanzar un máximo en el mes de mayo. El descenso observado en el mes de junio se debe al inicio de la temporada de lluvias.

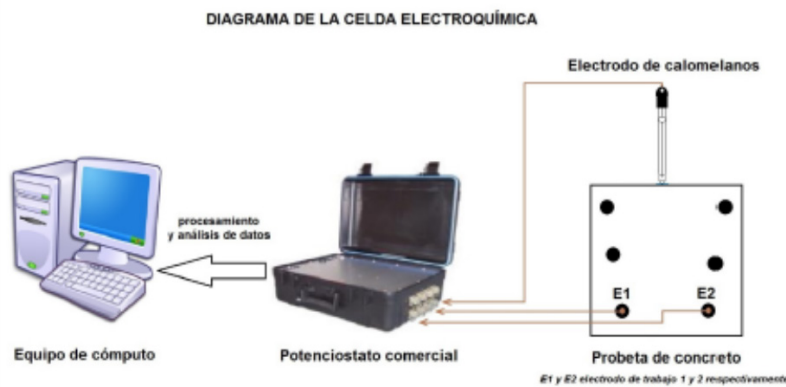


Figura 7. Disposición de la celda electroquímica para el monitoreo de ruido electroquímico.

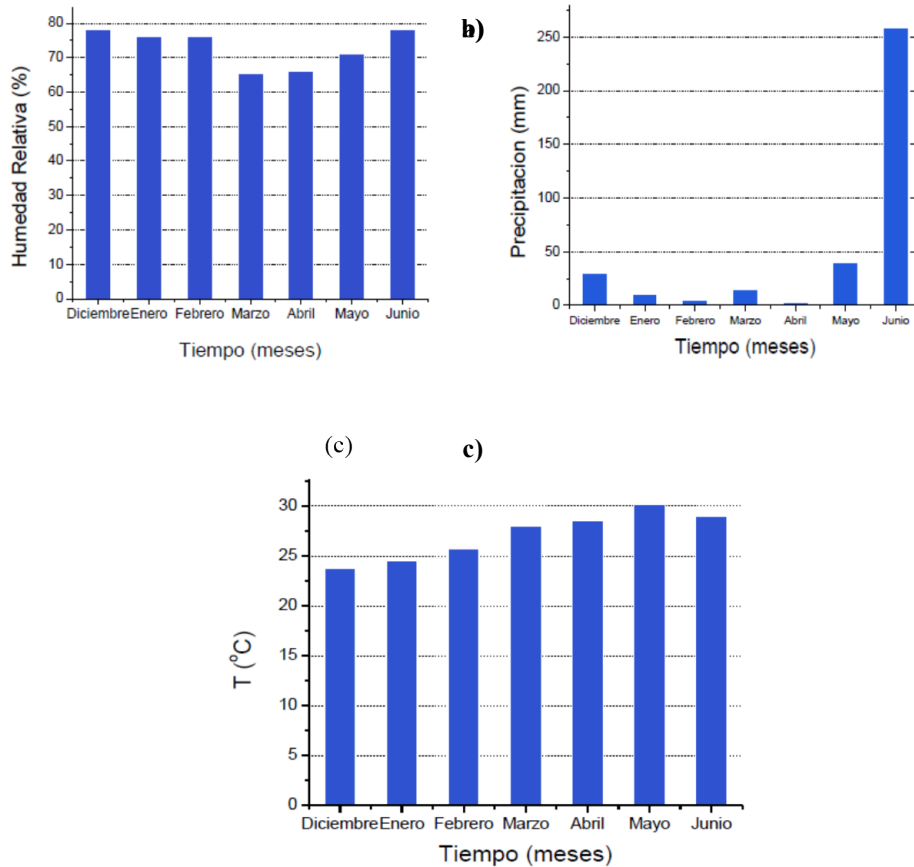


Figura 8. Registros de precipitación, humedad relativa y temperatura durante el periodo de exposición de los especímenes de concreto.

En base al comportamiento de estos parámetros, en particular de la humedad relativa del ambiente (>50%), la ciudad de San Francisco de Campeche presenta condiciones óptimas para el desarrollo de fenómenos corrosivos. Se sabe que por arriba del 50 % de humedad relativa los procesos de carbonatación alcanzan valores máximos y, por lo tanto, la probabilidad de corrosión en sistemas expuestos bajo estas condiciones incrementa significativamente.

3.2. Frente de carbonatación

En la figura 9, se presenta el avance del frente de carbonatación registrado para las tres series de probetas: S, C e I. Lo primero que podemos notar de este gráfico es que a 8 meses de exposición el frente de carbonatación no ha logrado llegar a la primer varilla; colocada a 10 mm de profundidad con respecto a la superficie de concreto para los tres casos bajo estudio. Podemos notar también, que no hay una diferencia significativa en los comportamientos exhibidos por los sistemas sin cloruro y con cloruros, ya que los avances en los frentes de carbonatación al final del periodo de evaluación son muy similares. Sin embargo, en el caso de los sistemas con I, se aprecia un perfil de profundidad más bajo, lo cual es indicativo que el inhibidor puede estar originando algún efecto que reduzca los fenómenos de transporte en los capilares del concreto.

3.3. Potencial de corrosión

Los resultados que se presentan en la figura 10, corresponden a los valores medios de potencial de corrosión (E_{corr}) para cada sistema a 10 mm de profundidad (figura 10a) y 30 mm de profundidad (figura 10b). Las diferencias de potencial (<-270 mV vs ESC) que se observan para ambas profundidades indican que los tres sistemas bajo estudio se encuentran activos con respecto al proceso de corrosión en base a lo establecido en la norma ASTM-C-876-09.- *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (tabla 3). A pesar de que ambos sistemas se encuentran activos, se puede observar un ligero desplazamiento de los potenciales de corrosión hacia zonas más electronegativas, en las varillas ubicadas a 10 mm de profundidad. Esta ligera diferencia puede estar relacionada con los tiempos de humectación de las matrices de concreto, procesos de absorción, ciclos de secado y ciclos día-noche que no permiten que la humedad alcance las varillas ubicadas a una mayor profundidad (Del Angel-Meraz, Veleza y Acosta-Alejandro, 2009). La presencia de agua en los poros capilares reduce la resistencia del medio a los fenómenos

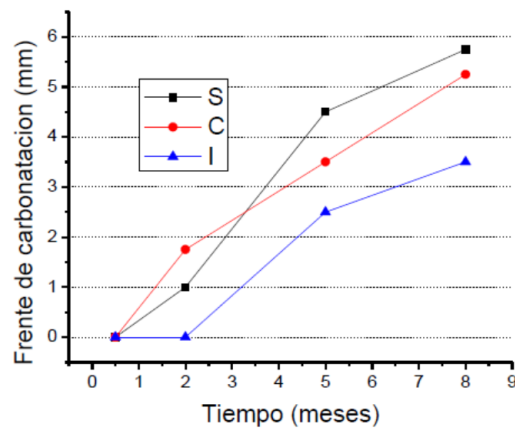


Figura 9. Frente de carbonatación a 8 meses de exposición.

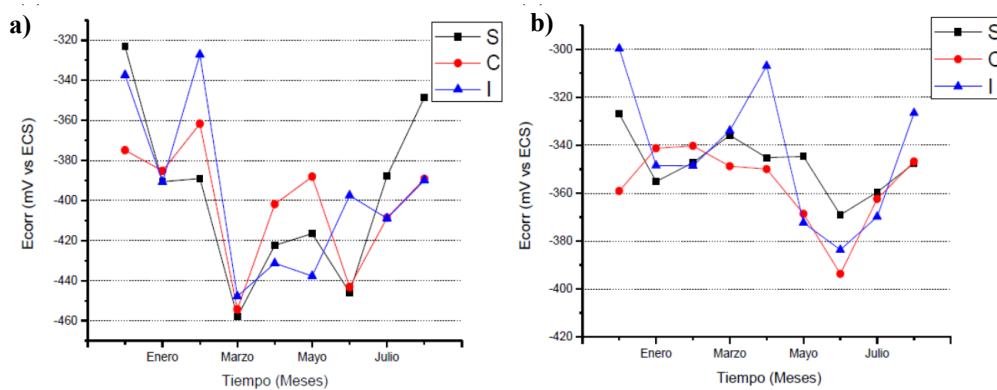


Figura 10. Potencial de corrosión a 10 y 30 mm de profundidad.

Tabla 3. Criterios para interpretar las mediciones de potencial de corrosión.

Ecorr (mV) vs (Cu/CuSO4)	Ecorr (mV) vs ESC	Ecorr (mV) vs AgCl	Condición de la varilla
<-350	<-270	<-250	Activa
>-200	>-220	>-200	Pasiva
-200 a -350	-220 a -270	-200 a -250	Incierta

de transferencia de carga, lo que incrementa la actividad de corrosión observada. Sin embargo, debido a que el frente de carbonatación no ha alcanzado los 10 mm, los potenciales observados en ambas profundidades son muy similares, debido a la integridad de la capa pasiva. De manera general, la actividad de los sistemas para ambas profundidades se atribuye a la naturaleza espontánea del proceso de corrosión al generarse las condiciones para el desarrollo de este fenómeno electroquímico de manera uniforme durante el proceso de fabricación de los especímenes de prueba.

3.4. Ruido electroquímico

Debido a que el frente de carbonatación se encuentra próximo al acero de refuerzo ubicado a los 10 mm, los resultados que se presentan en esta sección y en la siguiente, corresponden al comportamiento electroquímico de las tres series de probetas S, C e I a dicha profundidad.

La figura 11 presenta los resultados de RE en corriente y potencial correspondientes al primer mes de exposición y una profundidad de 10 mm para los tres sistemas en estudio. En la gráfica correspondiente a ruido en potencial (figura 11b), se puede observar que los valores de los sistemas C, I y S se mantienen en una zona preferentemente activa con respecto a la corrosión, de acuerdo con los criterios del valor de potencial tomados con referencia a un electrodo de calomel saturado. Sin embargo, la información que presentan las gráficas de la señal de ruido en corriente (figura 11a), muestran clara diferencia entre los sistemas bajo estudio ya que en el resultado correspondiente a la serie fabricada con inhibidor, añadido durante el proceso de amasado del concreto, se observa la formación de un transitorio que conjuga en el período de tiempo mostrado en la gráfica respectiva con los resultados de ruido en potencial, lo que estaría denotando corrosión localizada en base a lo establecido en los criterios específicos aplicables a la técnica de RE. Caso contrario a lo observado en la serie C, cuya gráfica presenta fluctuaciones rápidas correspondientes a corrosión uniforme. En el caso de la serie testigo, la baja amplitud de las fluctuaciones representan un sistema pasivo con respecto a la corrosión. Cabe señalar que, durante el primer mes de exposición, la heterogeneidad de los sistemas bajo estudio aunado a los factores ambientales que imperan en el sitio de exposición generan las condiciones para que los sistemas fabricados con inhibidor y cloruros se encuentren termodinámicamente activos como resultado de las múltiples reacciones de carácter electroquímico que se dan en la interfase acero-concreto.

La figura 12 presenta los resultados de RE en corriente y potencial correspondientes al cuarto mes de exposición y una profundidad de 10 mm para los tres sistemas en estudio. En la gráfica correspondiente a RE en potencial (figura 12b), se puede observar que los sistemas bajo estudio (C, I y S) se encuentran en una zona de actividad con respecto al proceso de corrosión, de acuerdo con los valores de potencial tomados con referencia a un electrodo de calomel saturado. En el caso de los registros de ruido electroquímico en corriente (figura 12a), se puede observar para las probetas fabricadas con inhibidor una señal distintiva de un

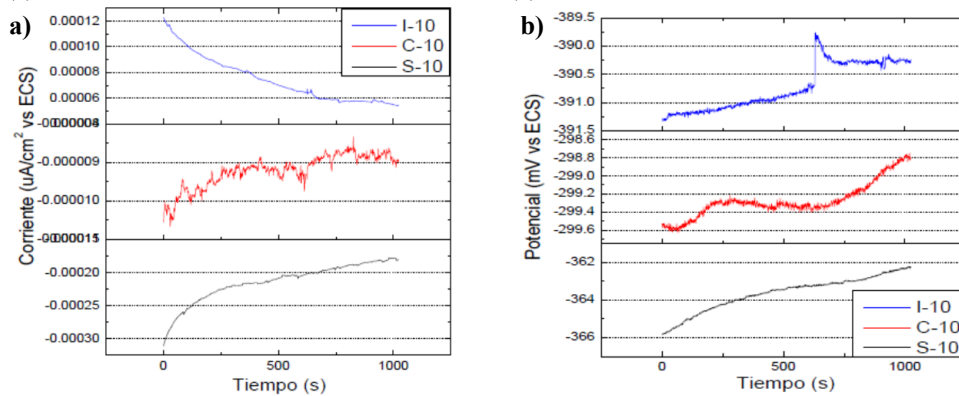


Figura 11. Ruido electroquímico en corriente y potencial- mes 1 de exposición-10 mm de profundidad.

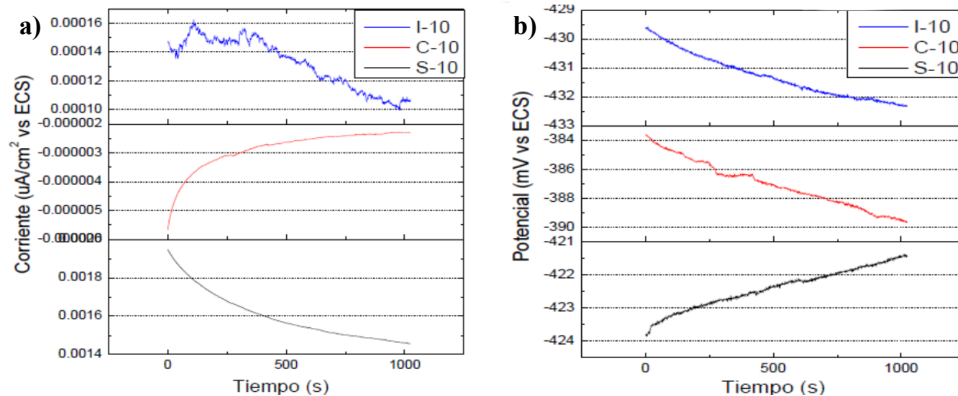


Figura 12. Ruido electroquímico en corriente y potencial- mes 4 de exposición-10 mm de profundidad.

proceso de corrosión uniforme caracterizada por fluctuaciones rápidas de baja amplitud que concuerdan con los resultados de potencial. Este comportamiento hace referencia a las reacciones químicas que se dan en la interfase acero-concreto, probablemente debido a la acción del BTA, el cual dados los resultados y el tiempo de exposición no presenta clara evidencia del mecanismo inhibitorio en la interfase acero-concreto. En el caso de las serie C y S, la baja amplitud de las fluctuaciones en corriente y potencial representan sistemas pasivos con respecto a la corrosión.

La figura 13 presenta los resultados del octavo mes de exposición de RE en corriente y potencial para cada sistema a 10 mm de profundidad. En la gráfica correspondiente a RE en potencial (figura 13b), se puede observar que los tres sistemas bajo estudio (C, I y S) se encuentran en una zona de actividad con respecto al proceso de corrosión. Por otra parte, en el caso de los registros de ruido electroquímico en corriente, los tres sistemas estudiados presentan fluctuaciones de baja amplitud, características del estado de pasividad en el que se encuentra el acero de refuerzo embebido en concreto, con respecto al proceso de corrosión.

3.5. Resistencia en ruido y velocidad de corrosión

Los resultados que se obtuvieron de resistencia en ruido indican que los especímenes elaborados con inhibidor presentan los valores más elevados de este parámetro durante los primeros meses de exposición para las profundidades de 10 y 30 mm (figura 14). Este comportamiento es inversamente proporcional al presentado por las velocidades de corrosión como se puede apreciar en la figura 15. Las tasas de corrosión que exhiben los especímenes de prueba concuerdan con las altas resistencias presentadas para cada sistema; resultado del estado pasivo en el que se encuentra el acero de refuerzo como indican los resultados del avance del frente de carbonatación y el comportamiento de las señales de ruido electroquímico. Con base a los criterios establecidos en la tabla 4 las velocidades de corrosión observadas pueden ser consideradas como bajas para los tres sistemas analizados. Durante el periodo de estudio no se aprecia una diferencia clara del comportamiento exhibido por cada serie, por lo que se requiere un mayor lapso para observar cambios inducidos por la adición de los iones cloruro y determinar el efecto del inhibidor.

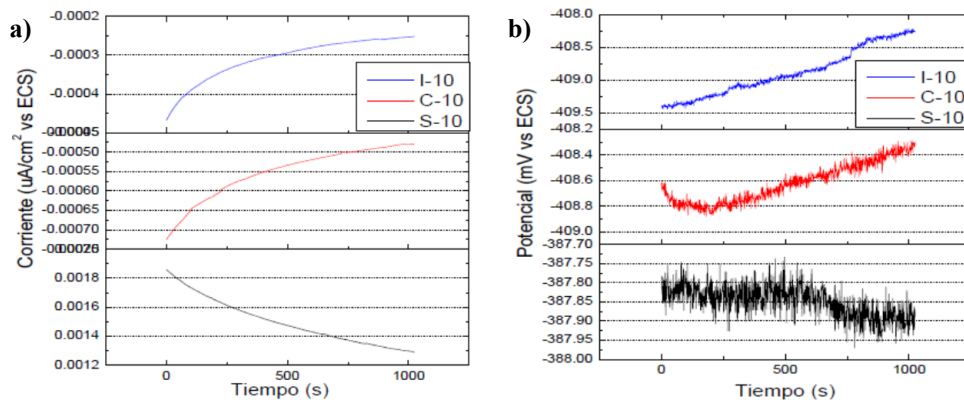


Figura 13. Ruido electroquímico en corriente y potencial- mes 8 de exposición-10 mm de profundidad.

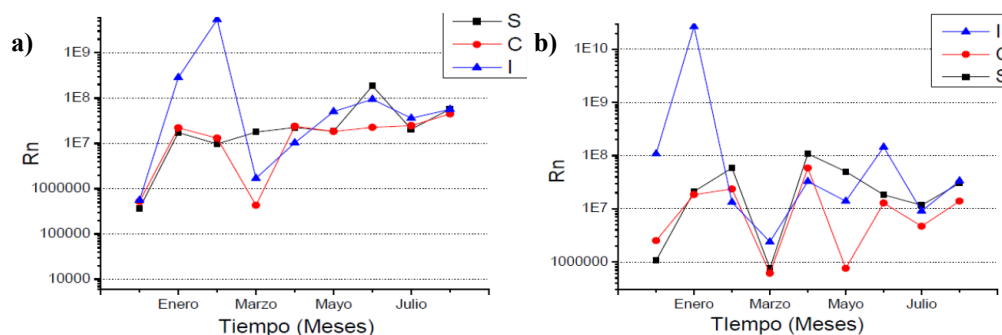


Figura 14. Resistencia en ruido a 10 mm de profundidad (a) y 30 mm de profundidad (b).

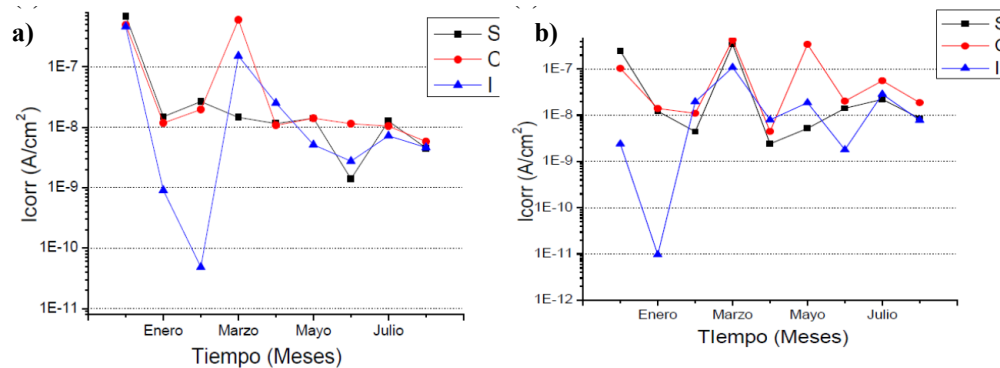


Figura 15. Velocidad de corrosión a 10 mm de profundidad (a) y 30 mm de profundidad (b).

Tabla 4. Criterios de evaluación de velocidad de corrosión.

Nivel de corrosión	Velocidad de corrosión (i_{corr}) $\mu A/cm^2$
>1	Alta
0.5-1	Moderada
0.1-0.5	Baja
<0.1	Despreciable

4. Conclusiones

A 8 meses de exposición la profundidad del frente de carbonatación no ha alcanzado la primera varilla de refuerzo embebida en concreto. Por lo tanto, aún no se puede establecer una relación clara de este parámetro con el comportamiento de los potenciales exhibidos por los especímenes estudiados; pero si con las bajas tasas de corrosión obtenidas para cada sistema.

Las variables ambientales como la Temperatura, Humedad relativa y Precipitación no presentan relación aparente en el comportamiento cinético del acero de refuerzo embebido en concreto, a pesar de que a lo largo del periodo de estudio las condiciones ambientales eran favorables para que se desarrolle el proceso de corrosión.

5. Agradecimientos

Al proyecto CONACyT “Estudio del proceso de corrosión de concreto reforzado elaborado con agregados calcáreos en ambiente marino tropical y ensayo acelerado de carbonatación” CB-2008-01101891 por su apoyo para la realización del presente trabajo.

Al Centro de Investigación en Corrosión por el espacio asignado para la realización experimental.

5. Referencias

- Ahmad, Z. (2006). Concrete corrosion. In Z. Ahmad (Ed.), *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control* (pp. 609–646). <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5924-6.50013-1>
- ASTM-C-1017/1017M-Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete.
- Carrillo, J., Pulido, J. C., & Chaparro, W. A. (2015). Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN. *Ingeniería y Desarrollo*, 3461.
- Chávez-Ulloa, E., Pérez López, T., Reyes Trujeque, J., Corvo Pérez, F., & Osorno Carrillo, J. B. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada. *Carbonation of Concrete in Natural Atmosphere and Accelerated Carbonation Chamber*, 41, 1–12.
- Cottis, R. A. (2008). Electrochemical noise for corrosion monitoring. *Techniques for Corrosion Monitoring*, 86–110. <https://doi.org/10.1533/9781845694050.1.86>
- Del Angel-Meraz, E., Veleza, L., & Acosta-Alejandro, M. (2009). *AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA BASADA EN EL TIEMPO DE HUMECTACIÓN DEL CLIMA TROPICAL HÚMEDO DEL ESTADO DE TABASCO Atmospheric aggressiveness based on the time of wetness of the tropical humid climate of the state of Tabasco*. 25(2), 111–120.
- Elsener, B., & Rossi, A. (2018). Passivation of steel and stainless steel in alkaline media simulating concrete. In *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13772-2>
- Finšgar, M., Petovar, B., Xhanari, K., & Maver, U. (2016). The corrosion inhibition of certain azoles on steel in chloride media: Electrochemistry and surface analysis. *Corrosion Science*, 111, 370–381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.028>
- Ghoshal, S. (2010). *Carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology in the cement and concrete industry*. <https://doi.org/10.1533/9781845699574.5.469>
- Hansson, C. M. (2016). *An introduction to corrosion of engineering materials I. I*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00001-8>
- Koch, G. (2017). 1 - Cost of corrosion. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Legat, A., Leban, M., & Bajt, Ž. (2004). Corrosion processes of steel in concrete characterized by means of electrochemical noise. *Electrochimica Acta*, 49(17–18), 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.036>
- NMX-C-407-ONNCCE-2001-Industria de La Construcción-Varilla Corrugada de Acero Proveniente de Lingote y Palanquilla Para Refuerzo de Concreto-Especificaciones y Métodos de Prueba.
- NMX-C-077-1997-ONNCCE -Industria de La Construcción – Agregados Para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Prueba.
- NMX-C-088-ONNCCE-1997-Industria de La Construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas En El Agregado Fino.
- NMX-C-164-ONNCCE-2002-Industria de La Construcción-Agregados-Determinación de La Masa Específica y Absorción de Los Agregados Gruesos.
- NMX-C-030-ONNCCE-2004-Industria de La Construcción – Agregados – Muestreo.
- NOM-C-111-ONNCCE-2004-Industria de La Construcción-Agregados Para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Prueba.
- NOM-C-165-ONNCCE-2002-Industria de La Construcción-Agregados-Determinación de La Masa Específica y Absorción de Los Agregados Finos.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



Quraishi, M. A., Chauhan, D. S., & Saji, V. S. (2020a). *1 - Heterocyclic corrosion inhibitors* (M. A. Quraishi, D. S. Chauhan, & V. S. B. T.-H. O. C. I. Saji, eds.). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00001-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00001-1)

Quraishi, M. A., Chauhan, D. S., & Saji, V. S. (2020b). *6 - Heterocyclic corrosion inhibitors for neutral environments* (M. A. Quraishi, D. S. Chauhan, & V. S. B. T.-H. O. C. I. Saji, eds.). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00006-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00006-0)

Quraishi, M. A., Chauhan, D. S., & Saji, V. S. (2020c). *9 - Environmentally benign heterocyclic corrosion inhibitors* (M. A. Quraishi, D. S. Chauhan, & V. S. B. T.-H. O. C. I. Saji, eds.). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00009-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00009-6)

Stewart, M. G., & Bastidas-arteaga, E. (2019). Corrosion of Concrete and Steel Structures in a Changing Climate. In *Climate Adaptation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816782-3.00004-8>

Valencia-Villegas, J. P., González Mesa, A. M., & Arbeláez-Pérez, O. F. (2020). Properties of modified concrete with crumb rubber: Effect of the incorporation of hollow glass microspheres. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (98), 59–68. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200473>

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC

Universidad Autónoma
de Campeche

"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Efecto de la condición superficial de la varilla en el proceso de corrosión de estructuras de concreto reforzado con y sin la adición de iones cloruro

D. G. Reyes Chan¹, T. Pérez López¹, J. D. Sáenz López¹

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

² Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: duina_r@yahoo.com.mx

Resumen

Muestras de acero de refuerzo embebido en concreto fueron elaboradas con agua purificada, relación agua/cemento de 0.45, con y sin iones cloruro, utilizando varillas de acero de llegada, decapadas y oxidadas, fueron sometidas a proceso de curado durante 28 días y expuestas a condiciones de laboratorio. Durante 10 meses, se realizaron mediciones de resistividad eléctrica, potenciales de corrosión y resistencia a la polarización, las cuales fueron analizadas por comparación con normas A.S.T.M y mexicanas NMX-ONNCCE. Las técnicas utilizadas muestran que es posible relacionar los parámetros resistivos y electroquímicos, haciendo posible evaluar el deterioro de estructuras de concreto reforzado en tiempos de exposición cortos, tomando en cuenta la presencia de iones cloruro y el tipo de varilla embebida en el concreto.

Palabras clave: concreto; acero; cloruro; resistividad.

Abstract

Reinforcing steel samples embedded in concrete were made with purified water, a water / cement ratio of 0.45, with and without chloride ions, using arrival steel rods, pickled and oxidized, they were subjected to a curing process for 28 days and exposed to laboratory conditions. During 10 months, measurements of electrical resistivity, corrosion potentials and resistance to polarization were carried out, which were analyzed by comparison with A.S.T.M and Mexican NMX-ONNCCE standards. The techniques used show that it is possible to relate the resistive and electrochemical parameters, making it possible to evaluate the deterioration of reinforced concrete structures in short exposure times, taking into account the presence of chloride ions and the type of rebar embedded in the concrete.

Keywords: concrete, steel, chloride, resistivity.

1. Introducción

La corrosión es una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción de la eficacia de los procesos, mantenimientos y costos elevados, como afirma H.H. Uhlig, (2000). Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión presentan entre el 3 y el 5 % del producto interno bruto de los países industrializados. Cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto es un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión (Cortés y Ortiz, 2004).

El concreto es un material que ha sido usado a lo largo de los años; se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta y agregados minerales y para lograr mejores propiedades mecánicas debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol, 1996).

La combinación de un esfuerzo metálico embebido en el concreto proporciona mejor resistencia a la compresión y a la tensión por lo que el acero de refuerzo absorbe las cargas de tensión y el concreto soportará las cargas de compresión, tal y como lo exponen Lambot (1855) y Coignet (1861); citado en Covarrubias, (1999).

Un mecanismo muy importante a considerar en el estado de Campeche es el ataque por iones cloruros ya que, al ser una zona costera, estos iones pueden estar presentes en el concreto desde la mezcla y llegar a la estructura a través de la brisa y/o penetrar durante la interacción del concreto con el agua de mar. Y ya que como afirma Uhlig, (1970): “los cloruros de la solución de los poros del hormigón pueden provocar roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero”, por lo anterior es indispensable conocer la zona donde se lleva a cabo una obra y de esta manera seleccionar los materiales y métodos adecuados para la elaboración del concreto reforzado.

Existen diferentes técnicas para conocer la velocidad de corrosión de las varillas embebidas en el concreto, la resistividad del concreto y otras propiedades de este.

Es por ello que en este trabajo se evaluó el deterioro de estructuras de concreto reforzado con y sin la adición de iones cloruro realizando pruebas de resistividad, potenciales de corrosión y resistencia a la polarización a nivel laboratorio, para demostrar que la presencia de estas sales durante la mezcla afecta de una manera importante la calidad del concreto.

2. Procedimiento

Se consideraron vigas y muros como elementos a colar, siguiendo el método ACI 211.1. De acuerdo a la NMX-C-111-ONNCCE-2004 se realizó la selección y dosificación de los agregados pétreos (grava y arena); de igual manera se consideraron las normas NMX-C-73-1987 Y ASTM C33. Se determinó el tamaño de partícula de los agregados por medio de tamices de malla de alambre de aberturas cuadradas; se hizo uso de la serie de tamices establecida en la norma NMX-C-077-ONNCCE-2004 “Análisis granulométrico y método de prueba” y NMX-C-84-1985 “Partículas más finas que la criba No. 200 p/lavado”; fueron de suma importancia las normas NMX-C-164-1983 “Agregados-Masa específica y absorción del agregado grueso” y NMX-C-166-1985 “Agregados-Contenido total de humedad”, para la obtención de los datos para la mezcla. Se elaboraron las probetas y cilindros con cemento Portland Compuesto Clase 30 de resistencia Rápida

(CPC 30 R), el cual corresponde a la clasificación de CPC (Cemento Portland Compuesto) de la actual norma mexicana para cementos hidráulicos en México, (NMX-C-414-ONNCCE-2004); y se consultaron las especificaciones de la norma ASTM C C150 – 07, para Cemento Portland.

Se realizaron pruebas de resistividad, potenciales de corrosión y Resistencia a la polarización, además de una prueba complementaria (resistencia a la compresión) para cilindros que fueron elaborados simultáneamente. Para la interpretación de los resultados se hizo uso de las normas A.S.T.M y mexicanas NMX-ONNCCE, considerando que son normas que establecen intervalos para la interpretación de los parámetros electroquímicos de las 3 técnicas aplicadas en el presente proyecto; tomando en cuenta las especificaciones de las normas mencionadas se realizó un duplicado de las probetas (un total de 12 probetas de concreto reforzado) y se compararon con los valores que establecen las normas. Las pruebas se realizaron 1 vez al mes durante 10 meses, considerando la disponibilidad de equipos y la velocidad de corrosión que presenta el concreto. Se realizaron promedios con las probetas con las mismas condiciones, obteniendo los resultados para graficar en cada prueba, esto para hacer más fácil la interpretación de los datos.

2.1 Especificaciones de las probetas y cilindros

Se elaboraron 2 series de 6 probetas de concreto experimentales con medidas de 15X15X30 cm con una relación agua/cemento de 0.45; los cálculos para la mezcla se realizaron de acuerdo al método ACI 211.1 “Hormigón normal” y se hizo uso de un aditivo para mejorar las propiedades del concreto, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C1017/C1017M-13e1. Se embebieron varillas de acero de llegada, decapada y oxidadas en las probetas de concreto.

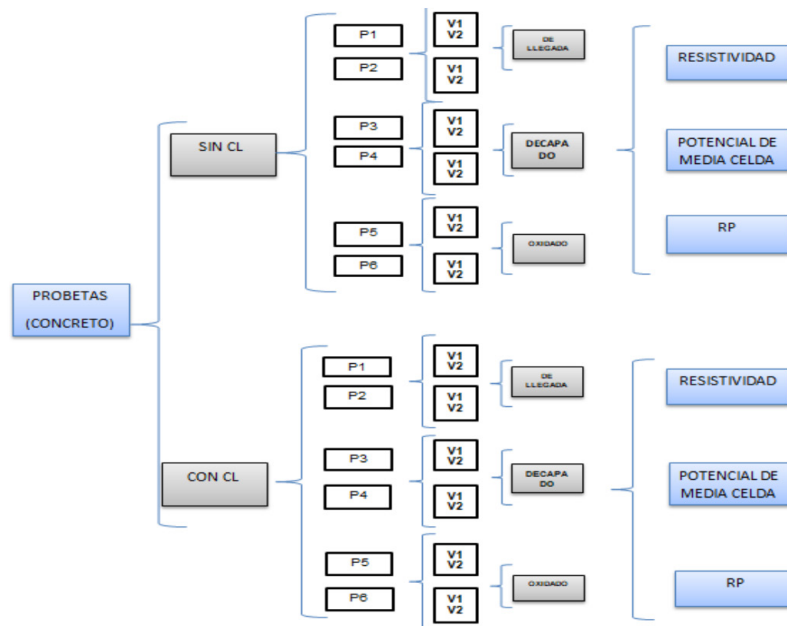


Figura 1. Arreglo de las probetas de concreto reforzado elaboradas.

2.2 Ensayos de compresión

Se realizaron ensayos de compresión a los 3, 7, 14, 28 y 90 días a los cilindros elaborados. Los ensayos fueron llevados a cabo en un laboratorio particular ubicado en la ciudad de San Francisco de Campeche, en el barrio de San Román en el cual nos proporcionaron las herramientas y normas necesarias para llevarlas a cabo. Para las pruebas realizadas a los 3, 7 y 14 los cilindros fueron empaquetados y transportados para no perder sus condiciones de prueba, debido a que se encontraban en proceso de curado. Se colocaron dos bases de neopreno en cada extremo de los cilindros y se realizó la prueba en cada uno de ellos de acuerdo a norma NMX-C-083ONNCCE-2004.

2.3 Mediciones de resistividad con el Resistómetro Nilsson

Se realizaron pruebas con un resistómetro Nilsson modelo 400; realizando mediciones de cuatro puntas de acuerdo a la norma ASTM G-57 en cada una de las caras de las probetas. El equipo está calibrado y probado con una resistencia de 10 K Ω .

2.4 Medición de potencial de media celda

Se realizaron mediciones de potenciales de corrosión en las probetas de concreto con un voltímetro digital de alta impedancia de la marca UNI-T modelo UT61C y un electrodo de referencia. Las mediciones fueron

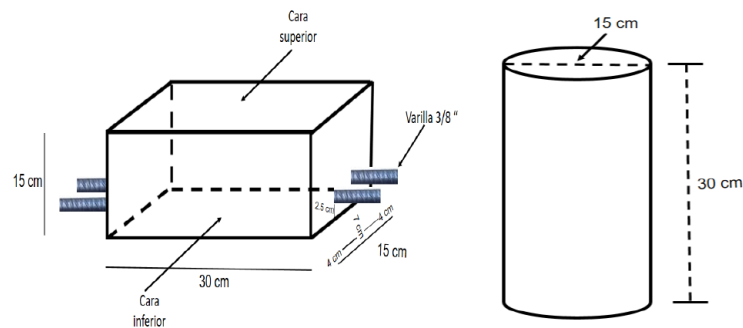


Figura 2. Probetas y cilindros experimentales.



Figura 3. Ensayos de compresión.



Figura 4. Medición de la resistividad.

realizadas con base a la norma ASTM C-876. De esta manera se conoce la diferencia de potencial que nos indica cualitativamente la condición de corrosión de la varilla.

2.5 Mediciones de resistencia a la polarización

Fueron realizadas con el Potenciostato Versa STAT 4 marca Princeton Applied Research, con la ayuda de un electrodo de referencia de calomel saturado y una placa de acero inoxidable como contraelectrodo. Se realizó un barrido de medición de -20 mV hasta +20 mV y una velocidad de 0.167 mV/s, siguiendo la norma ASTM G-59-97.

3. Resultados

Códigos de las probetas elaboradas:

- LlegSC: Llegada sin cloruros.
- DecSC: Decapada sin cloruros.
- OxSC: Oxidada sin cloruros.
- LlegCC: Llegada con cloruros.
- DecCC: Decapada con cloruros.
- OxCC: Oxidada con cloruros

3.1. Resistividad con humectación en la cara inferior

En las figuras 7 y 8 se presentan los valores de la resistividad ($\Omega \text{ cm}^2$) contra el tiempo en los especímenes de concreto en la cara inferior (cerca de las varillas de refuerzo), sin y con la adición de iones cloruro respectivamente después de la humectación; además de las diferentes varillas usadas en las probetas.

En la figura 7, las probetas sin presencia de iones cloruros presentan valores de resistividad $> 4,000$ ($\Omega \text{ cm}^2$) lo cual indica un riesgo de corrosión muy alta y $< 15,000$ ($\Omega \text{ cm}^2$) presentando un riesgo de corrosión bajo de acuerdo a la norma ASTM G57-06, 2012.

En la figura 8, las probetas con presencia de iones cloruros presentan valores de resistividad $> 3,000$ ($\Omega \text{ cm}^2$) presentando un riesgo de corrosión muy alta y $< 14,000$ ($\Omega \text{ cm}^2$) es decir un riesgo de corrosión bajo de acuerdo a la norma ASTM G57-06, 2012.

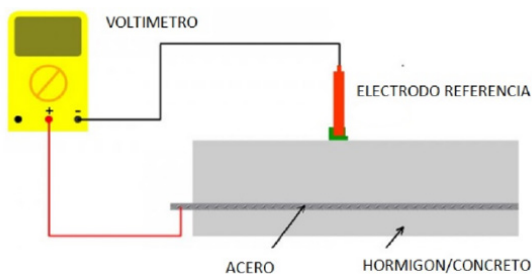


Figura 5. Ejemplo de la medición de los potenciales de corrosión en el concreto reforzado.

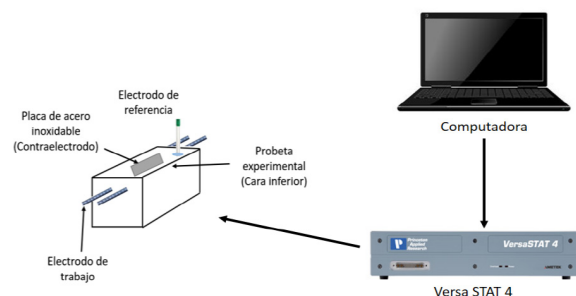


Figura 6. Esquema experimental para Rp.

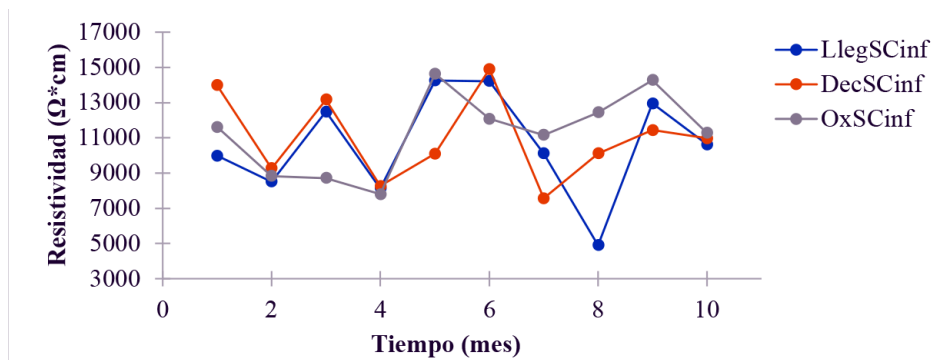


Figura 7. Resistividad vs tiempo de las probetas de concreto de la cara inferior. Sin iones cloruro. Después de la humectación.

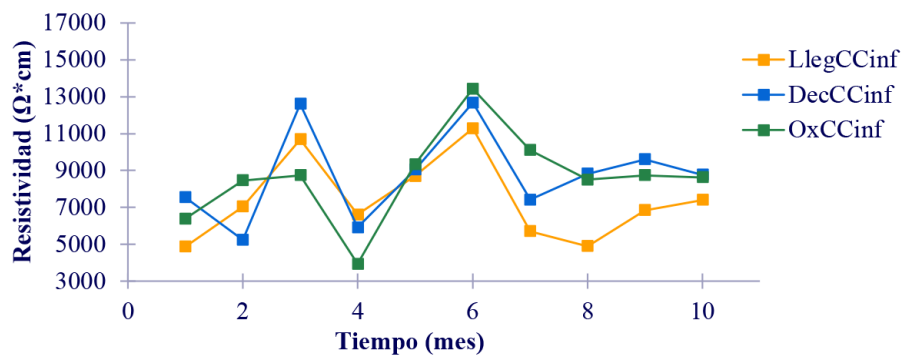


Figura 8. Resistividad vs tiempo de las probetas de concreto de la cara inferior. Con iones cloruro. Después de la humectación.

De acuerdo a la NMX-C-514-ONNCCE-2016, en ambos gráficos hay valores que indican porosidades interconectadas de consideración y excesivas, por lo tanto, el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo será rápido y extremadamente rápido. Además, las velocidades de corrosión serán altas o muy altas.

Las probetas de concreto sin la adición de iones cloruro presentan resistividades mayores a las probetas de concreto con cloruros. El tipo de varilla puede influir en los valores obtenidos de resistividad debido a que la medición con el equipo alcanza la profundidad a la que se encuentran las varillas en el concreto.

Las diferencias que existen entre los valores máximos y mínimos de las probetas sin y con cloruros se debe principalmente a la humectación que han tenido las probetas. Chan (2016), encontró que existe una disminución menor en el valor de la resistividad (de 300,000 kΩcm), con respecto al valor de resistividad cuando tienen 0 %HR, se presenta en probetas expuestas en 25 y 35 % de humedad relativa ambiental. Mientras que las probetas que estuvieron expuestas entre 45%-75 %HR las disminuciones de resistividad fueron mayores (4,600,000 kΩcm). Chan *et al.* (2016), reportan la variación de la resistividad como función de la humedad en el concreto, con valores que van del orden de MΩcm a kΩcm en un intervalo de 0 a 80 % de Humedad.

Las diferencias que existen en las resistividades en las caras superiores e inferiores se debe principalmente a la presencia de las varillas de refuerzo, ya que en las caras superiores al no presentar varillas no hay disminución de la resistividad, esto debido a la homogeneidad del concreto; mientras que en las caras inferiores se observa la disminución de la resistividad, tal como lo menciona Nguyen, A.Q. Klysz, G. Deby, F. Balayssac, J.-P (2017).

3.2. Potenciales de corrosión

En la figura 9 se muestran los resultados de los potenciales de corrosión contra el tiempo de las probetas sin y con cloruros.

Considerando los rangos de los valores de la norma ASTM C876 para potenciales de corrosión se tiene que; la mayoría de los puntos de E_{corr} (V) de las probetas de concreto sin iones cloruro están situados en la zona con una probabilidad de corrosión baja, es decir con el 10%, igual existen puntos de esta condición que presentan valores de E_{corr} (V) en la zona de entre -0.20 y -0.35, es decir en la zona con corrosión intermedia de aproximadamente del 50 %.

Los valores de los puntos de E_{corr} (V) de las probetas de concreto con iones cloruro están situados en la zona con probabilidad de corrosión de aproximadamente el 50% y en la zona con probabilidad de corrosión alta, hasta 90%, de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016.

Los valores de E_{corr} de las probetas sin cloruros con varillas embebidas de acero de llegada presentan valores más positivos que las probetas con cloruros con varillas de acero de llegada. Lo mismo ocurre para las varillas de acero de capada y oxidadas. Se puede observar como las probetas sin cloruros se encontraban en la zona activa en los primeros meses de las pruebas, después alcanzaron la zona de pasivación a los 4 meses; mientras que las probetas con adición de cloruros se encontraban en la zona activa y después fueron disminuyendo sus valores con el paso de los meses.

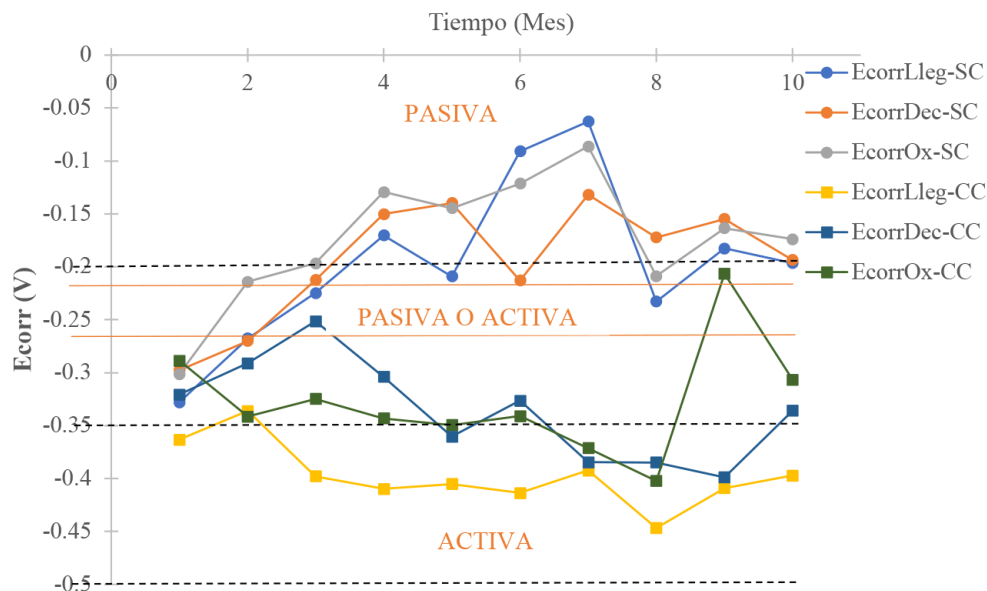


Figura 9. E_{corr} vs tiempo de las probetas de concreto con y sin la adición de iones cloruro. Varillas de acero de refuerzo decapada, de llegada y oxidada.

El punto más alto de Ecorr (V) está dado por la probeta de concreto sin cloruros con varillas embebidas de acero de llegada mientras que el punto más bajo esta dado por la probeta de concreto con cloruros de acero de llegada (Pérez, 2000), reporta que los Ecorr son función de la condición de exposición, siendo fundamental el contenido de humedad en los poros del concreto, mostrando que es factible medir valores menores a -350 mV vs E_{Cu/CuSO4} y estar el refuerzo de acero en condiciones de pasividad. En cuanto a la presencia de iones cloruro, se encontró que son determinantes para la despasivación de la varilla en condiciones de ciclos de humectación y secado.

3.3. Velocidades de corrosión

En las figuras 10 y 11 se observan los datos obtenidos de las velocidades de corrosión para las probetas sin y con iones cloruro respectivamente y de las varillas de acero usadas.

En la figura #0 se observan las probetas sin adición de cloruros. Se puede notar que las probetas con varillas de acero oxidadas presentan los datos mayores (cercanos a 1) mientras que las probetas con las varillas de acero decapada son menores (cercanos a -1).

En la figura 11 se tienen las probetas con cloruros donde las varillas de acero de capada presentan los I_{corr} (A/cm²) menores y las probetas de acero oxidadas los valores mayores, lo que pasa de manera similar con las probetas sin iones cloruro.

Mientras más limpias se encuentren las varillas de refuerzo, menor serán sus velocidades de corrosión. Esto es de gran importancia para la industria de la construcción ya que simulando los tiempos en los que se llegan a utilizar las varillas de acero, estas pueden corroerse dependiendo del lugar donde se encuentren.

De acuerdo a la norma NMX-C-501-ONNCCE-2015, se tiene que los valores obtenidos en ambas condiciones (sin y con cloruros) se encuentran en un nivel de corrosión despreciable, debido a que se encuentran por debajo de 1×10^{-4} A/cm².

Comparando las figuras 10 y 11 se observa que las probetas sin iones cloruros presentan los I_{corr} menores, mientras que las probetas con adición de los iones presentan los I_{corr} mayores, esto es debido a que los cloruros pueden ser liberados debido a los cambios fisicoquímicos que se presentan en la mezcla cementante, y entonces podrán participar en la ruptura de la capa pasiva del refuerzo para que se inicie la corrosión (G. K. Glass, 2000).

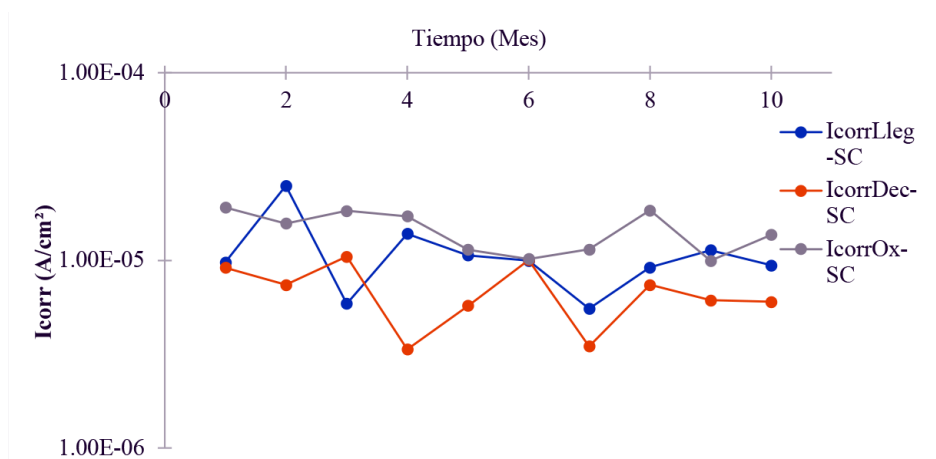


Figura 10. I_{corr} vs tiempo de las probetas de concreto sin iones cloruro. Varillas de acero de capada, de llegada y oxidadas.

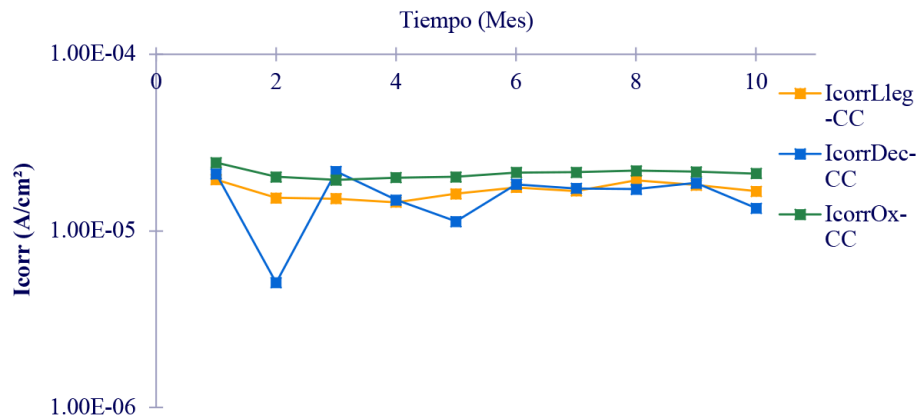


Figura 11. Icorr vs tiempo de las probetas de concreto con iones cloruro. Varillas de acero decapada, de llegada y oxidadas.

El tipo de acero de refuerzo influye en el desempeño por durabilidad, a través de la corrosión, además del efecto del contenido de cloruro en el agregado y en el concreto; es por ello que las Icorr son influenciadas tanto por los cloruros como por el tipo de varilla embebida (Cabrera-Madrid y López-González, 2018).

3. Conclusiones

- La presencia de iones cloruro afectan la resistividad del concreto.
- Se podría trazar una línea de tendencia para relacionar los datos de Ecorr e Icorr vs Resistividad.
- Es posible evaluar el deterioro de estructuras de concreto reforzado en tiempos de exposición cortos.

5. Agradecimientos

Agradezco al Dr. Tezozómoc Pérez López y al Ing. Jesús David Sáenz López por compartirme sus conocimientos y lograr el éxito de este trabajo; a mis profesores de la Universidad Autónoma de Campeche y al Centro de Investigación en Corrosión.

6. Referencias

- ACI Committee 211. (1991). "Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete". American Society Institute. EUA.
- ASTM C33/C33M – 08. Historical Standard: Especificación Normalizada de Agregados para Concreto.
- ASTM C876 - 91(1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- ASTM C1017/C1017M – 13e1. Especificación Normalizada para Aditivos Químicos para Uso en la producción de Concreto Fluido.
- ASTM C C150 – 07. Historical Standard: Especificación Normalizada para Cemento Portland.
- ASTM G57 - 06(2012) Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.
- Cabrera-Madrid, J.A. y López-González, A. (Diciembre 2018). "Efecto de los cloruros de los agregados en la resistividad eléctrica del concreto".

- Chan Blanco, Karen S. (2016). “Análisis de propiedades de conductividad eléctrica del concreto mediante el desarrollo de un sistema de instrumentación virtual”. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Investigación en Corrosión.
- Chan Blanco, Karen Sarai; Moo Yam, Víctor Manuel Jesús; Pérez López Tezozomoc and Lagunas Jiménez, Ruben. (2016). “Instrumented System for Analysis of Concrete Resistivity”. MRS Proceedings, Volume 1815 (Symposium 6J – NACE: Corrosion and Metallurgy). imrc2015.21.
- Cortes M., María Teresa. y Ortiz H, Pablo, (Dic, 2004). “Corrosión”. APUNTES CIENTÍFICOS UNIANDINOS No. 4.
- Covarrubias Alvarado, O. (1999). “Determinación de propiedades de resistencia a la corrosión de aceros aleados al silicio embebidos en mortero”. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- G.K. Glass, B. R. (2000). The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete. Corrosion Science, 42(11), 2013-2021.
- H.H. Uhlig. (1970). “Corrosión y control de corrosión”. Ediciones URMO.
- H.H. Uhlig. (2000). Uhlig’s Corrosion Handbook 2da ed. (ed. R.W. Rivie) (John Wiley and Sons, Londres).
- Nguyen, A.Q.; Klysz, G.; Deby, F. and Balayssac, J.-P., (2017). “Evaluación of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement”. Cement and Concrete Composites. Elsevier.
- NMX-C-73-1987-Agregados-Masa Volumétrica.
- NMX-C-077-ONNCCE-2004-Análisis granulométrico y método de prueba.
- NMX-C-84-1985-Agregados-Partículas más finas que la criba No. 200 p/lavado.
- NMX-C-111-2004-Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-C-164-1983-Agregados-Masa específica y absorción del agregado grueso.
- NMX-C-166-1985-Agregados-Contenido total de humedad.
- NMX-C-414-ONNCCE-2004.Norma mexicana para cementos hidráulicos en México.
- NMX-C-495-ONNCCE-2016. “Industria de la construcción-durabilidad de estructuras de concreto reforzado-medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto, especificaciones y método de ensayo”.
- NMX-C-501-ONNCCE-2015. Industria de la construcción-durabilidad de estructuras de concreto reforzado-medición de velocidad de corrosión en campo especificaciones y método de ensayo.
- NMX-C-514-ONNCCE-2016. Industria de la construcción-resistividad eléctrica del concreto hidráulico-especificaciones y métodos de ensayo.
- Palbol, L., (1996). Optimización de los agregados para concreto. “Construcción y tecnología”, (México).
- Pérez López, Tezozomoc. (2000). «Estudio de la cinética de corrosión del refuerzo de acero embebido en concreto en diferentes condiciones de exposición en medio marino”. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Comparación de impactos ambientales entre concreto convencional y reciclado mediante ACV. Caso de estudio: concreto con $f'c$ de 35MPa elaborado con agregados de Morelia, Michoacán

R. Ruiz Ruiz, W. Martínez Molina, E.M. Alonso Guzmán,
H.L. Chávez García, C.U. Espino González, M. Arreola Sánchez

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: rosalia.ruiz@umich.mx

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo comparar los impactos ambientales asociados a la producción de 1m³ de concreto reciclado (CR) con respecto al concreto convencional (CC), con especificaciones $f'c=35\text{MPa}$, relación A/C= 0.48 y revenimiento de 10cm y agregados de la región de Morelia, Michoacán. La metodología de evaluación de impacto ambiental es Análisis de Ciclo de Vida (ACV) mediante el método Ecoindicator 99(EI99) con perspectiva jerárquica y ponderación promedio (H, A). Los resultados indican que el CR tiene una disminución del 13 % del impacto ambiental con respecto al CC, lo cual es atribuido al uso del residuo como agregado grueso y a que las distancias de transporte son menores, pero cuando éstas son igualadas el impacto de ambos concretos es similar.

Palabras clave: ACV; EI99; concreto de agregados reciclados; concreto de agregados naturales.

Abstract

This study focus on compare environmental impacts associated with the production of 1m³ of recycled aggregates concrete (RAC) and natural aggregates concrete (NAC) with compressive strength of 35MPa, W/C ratio of 0.48, slump of 10cm and aggregates of surrenders of Morelia, Michoacan. The methodology of Life Cycle Assessment (LCA) was applied by means Ecoindicator 99 (EI99) with hierarchical perspective and average weighing (H,A). Results indicate that the environmental impact of RAC is 13% lesser than of NAC, which is attributed to use of the construction and demolition waste as coarse aggregate and the distances of transport are smaller. But, when distances are equalled, the environmental impact of both concretes is similar.

Keywords: LCA; EI99; recycled aggregates concrete; natural aggregates concrete.

1. Introducción

En las últimas décadas, la gestión de los residuos de la construcción y demolición (RCD) se ha convertido en un tópico de gran interés, ya que si éstos no son dispuestos adecuadamente generan graves problemas ambientales. Por un lado, la industria de la construcción es una de las industrias en la que más residuos se generan. Según el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos publicado en 2020, la generación de RCD en México fue de 10.15 millones de toneladas en 2018, de los cuales el 25 % son residuos de concreto que son simplemente vertidos y rara vez aprovechados (SEMARNAT, 2020). Por otro lado, existe una enorme demanda de bienes y servicios, entre ellos de infraestructura que requiere enormes cantidades de materia prima, principalmente materiales para fabricar concreto. Como una alternativa de solución a la problemática de RCD y a la gran demanda de materia prima para fabricación de concreto, se han realizado diversas investigaciones alrededor del mundo, principalmente en Europa y Estados Unidos, acerca de la utilización de éstos como agregados en la elaboración de concreto hidráulico en los que se indica que su utilización trae grandes beneficios económicos, ambientales e incluso técnicos, aunque deberá ponerse especial atención a éste último aspecto, ya que los agregados reciclados son más porosos y tienen absorción más alta que los naturales, para lo cual han sido sugeridos y/o estudiados el uso de diferentes adiciones y/o materiales suplementarios que permitan contrarrestar el decremento en las propiedades mecánicas y de durabilidad (Martínez-Molina *et al.*, 2015; Alexandridou *et al.*, 2018; Pedro *et al.*, 2017). Por un lado, en el estudio llevado a cabo por Alnahhal *et al.* (2018), sobre concretos reciclados adicionados con ceniza de cascarilla de arroz se reportan mejoras en la resistencia y durabilidad, al mismo tiempo que existe un decremento del 29 % de las emisiones de CO₂. Por otro lado, (Xiao *et al.*, 2018) hicieron un análisis comparativo de la huella de carbono entre edificios de gran altura hechos con concreto convencional y reciclado y encontró que además de tener funciones equivalentes, la huella de carbono tiene una disminución de hasta $2.175 \times 10^5 \text{kgC}_e$; mientras que (Turk *et al.*, 2015) aplicaron la metodología de Análisis de ciclo de vida (ACV) y reportaron una reducción del 88 % de los impactos ambientales asociados del concreto reciclado convencional. (Younis *et al.*, 2018) condujeron un análisis del costo del ciclo de vida de un concreto hecho con agregados reciclados, agua de mar y un polímero de fibra de vidrio como elemento de refuerzo con respecto a un concreto convencional estructural, donde reportaron una disminución del 50 % del costo del reciclado con respecto al convencional. A pesar de lo mencionado anteriormente, en México existen pocos estudios sobre CR, principalmente los que abordan el impacto ambiental, lo cual ha limitado la valorización del concreto reciclado a gran escala en nuestro país.

El presente estudio se enfoca en hacer una evaluación de los impactos ambientales asociados a los procesos de producción de concreto convencional y reciclado que permita identificar los subprocesos que tienen la mayor carga ambiental en cada uno de ellos, así como determinar si existe una ventaja ambiental significativa del CR con respecto al convencional y en qué condiciones esta ventaja continua.

2. Procedimiento

2.1 Materiales

Los materiales objeto de estudio del ACV son los reportados por (Contreras-Marín, 2015) quien enfocó su estudio en la factibilidad técnica de la implementación de RCD como agregados de concreto hidráulico para pavimentos rígidos. Los materiales son: concreto convencional (CC) y reciclado (CR) con $f'c$ de 35MPa, relación A/C de 0.48 y revenimiento de 10cm. Las mezclas fueron elaboradas con cemento Portland CPC 30R, agua, arena volcánica como agregado fino, grava triturada (AN) y grava reciclada (AR) como agrega-

do grueso, respectivamente, y un aditivo fluidificante. Todos los agregados naturales son de las plantas de agregados de los alrededores de Morelia, Michoacán, mientras que los agregados reciclados son producto de las demoliciones de edificaciones del centro de la misma ciudad. Los materiales fueron caracterizados mediante los métodos estandarizados en la normativa mexicana. El concreto fue diseñado mediante el método del American Concrete Institute (ACI) y ensayado mediante pruebas destructivas como compresión y módulo de ruptura (MR).

2.2 Método

Existen diferentes metodologías para hacer evaluaciones ambientales de productos y/o servicios. La metodología de ACV ha cobrado gran relevancia en los últimos años, la cual se trata de un proceso multi-etapa que permite evaluar la carga ambiental de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, identificando y cuantificando la entrada y salida de materia y energía del sistema en estudio (Olivera *et al.*, 2016). Según la norma (ISO 14040, 2006), el ACV consta de cuatro fases claramente definidas, las cuales son: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) e interpretación. Los concretos de esta investigación fueron evaluados mediante la metodología ACV de la cuna a la puerta y el método de evaluación de impacto ambiental fue el método orientado a daños conocido Ecoindicator 99 con perspectiva jerárquica y ponderación promedio (H,A). La finalidad de esta metodología es hacer una comparación entre las diferencias que existen entre sistemas y los componentes del mismo, mediante el cálculo de un valor único que indica el impacto ambiental total asociado a los efectos resultantes del inventario de ciclo de vida. Dicho valor es denominado ecoindicador y el ecopunto (Pt) es su unidad de medida (Goedkoop y Spriensma, 2001).

2.2.1 Definición de objetivo y alcances

El objetivo del presente ACV es comparar el impacto ambiental de la producción de 1m³ de concreto reciclado con respecto al concreto convencional con las especificaciones mencionadas en la sección 2.1. Como se trata de un ACV de la cuna a la puerta, los sistemas de producto incluyen solamente las etapas de: extracción y/o adquisición de materias primas, producción y transporte de materiales. Pero en el caso del CR se agregan los procesos de demolición y la disposición final de concreto que es evitada por el uso de los residuos como agregado reciclado. Las entradas y salidas a evaluar son: materias primas (se excluye el impacto asociado al fluidificante) y energía necesarias para la fabricación del concreto, la demolición, disposición final, así como las emisiones a la atmósfera generadas durante la fabricación del cemento Portland y producción de agregados y las derivadas del uso de combustible en las operaciones de transporte y utilización de maquinaria.

2.2.2 Análisis del inventario

La realización del inventario implica el conocimiento a profundidad de cada una de las etapas involucradas en términos de materia y energía. Para los subprocesos de extracción y/o adquisición de materia, así como producción de materiales, concreto y demolición, la recopilación y cálculo fue mediante una ficha que contempla los diferentes procesos unitarios, la productividad de los equipos y el rendimiento del combustible en las plantas de agregados de la región. Pero es importante mencionar que en el caso del cemento, la información fue tomada del informe estadístico de la Federación Interamericana del Cemento (FICEM). El subproceso de transporte fue calculado en función de la distancia recorrida por la carga transportada de

cada material y tomando en cuenta el tipo de vehículo, ya que las tasas de emisión de contaminantes varían en función de éstos. En el presente trabajo se plantearon 2 escenarios de transporte: el primero, en el que las distancias de transporte de los sitios de obtención de AN y AR hacia la planta de concreto son las reales (calculadas) y el segundo, en el que supone que estas distancias son iguales. En la figura 1 se presenta la ubicación de los sitios para ambos concretos. Las cantidades de materiales transportados son las cantidades necesarias para producir un m^3 de concreto. La tablas 1 y 2 resumen el inventario de ciclo de vida para $1m^3$ de CC y CR, respectivamente.

2.1.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

El método de EICV elegido para esta investigación es el EI99 (H,A), así que las categorías de impacto están agrupadas en las áreas de daño a: la salud humana que es medido en DALYs (Años de vida ajustados por discapacidad); la calidad del ecosistema que se mide en $PAF \cdot m^2 \cdot yr$ (Fracción de especies potencialmente afectadas por m^2 por año) y $PDF \cdot m^2 \cdot yr$ (Fracción de especies potencialmente desaparecidas por m^2 por año); y los recursos que son medidos en MJ de energía excedente necesaria para extracciones futuras. Las categorías de impacto evaluadas son 10: carcinogénesis, cambio climático, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, efectos respiratorios, acidificación/eutrofización, ecotoxicidad, uso de suelo, consumo de minerales y combustibles fósiles. Para lo cual fue necesario hacer el inventario de sustancias emitidas y recursos gastados para los subprocesos del inventario de materiales, transporte y energía presentados en las Tablas 1 y 2. La base de datos debe ser la que incluya dichos procesos unitarios o algunos similares y asignarlos a las actividades contempladas en los sistemas de producto. En este estudio, se eligió la base de datos Ecoinvent versión 3.3 debido a su confiabilidad. Se buscó que la mayoría de los modelos tuvieran gran similitud con los procesos estudiados en este trabajo de investigación y que fueran para una misma ubicación geográfica. Respecto al punto de similitud de procesos se llegó a buena compatibilidad, ya que se pudo encontrar modelos muy acordes a los procesos de la región.



Figura 1. Ubicación de sitios de extracción, adquisición, producción, demolición y disposición final de materiales.

Tabla 1. Inventario de ciclo de vida de la producción de 1m³ de concreto convencional.

	Cemento (kg)	Arena (kg)	AR (kg)	Agua (kg)	Transporte (tkm)		Producción (m ³)
					CR-1	CR-2	
Entradas							
<i>Materiales (kg)</i>							
Cemento	450.0						
Arena		795.0					
AN							
AR			658.0				
Agua				184.5			
<i>Transporte</i>							
Camioneta 1.5t					0.7	0.7	
Volteo 7m ³					23.3	36.3	
Camión de 32t					104.0	104.0	
<i>Energía (MJ)</i>							
Diésel							9.1
Eléctrica							7.5
Salidas							
<i>Tecnósfera</i>							
Concreto							1.0

La clasificación, caracterización, normalización y ponderación fue realizada conforme a lo establecido por la norma (ISO 14044,2006) y tomando los factores correspondientes de la metodología EI99 del manual editado por (Ministry of housing, spatial planning and the environment, 2000). El presente estudio se centra en el estudio de los impactos de punto final, por tanto sólo son presentados los resultados una vez hecha la ponderación.

2.1.4 Interpretación

La interpretación permite identificar qué etapas y/o subprocesos del ciclo de vida son responsables de la mayor carga ambiental, de tal manera que permite identificar qué partes del sistema del producto necesitan ser mejoradas. Además, cuando se trata de comparaciones entre productos, se puede determinar cuál presenta el mejor desempeño ambiental (Antón-Vallejo, 2014). En esta investigación se hizo la identificación de aspectos significativos positivos y negativos, tanto en el inventario como en la EICV.

Tabla 2. Inventario de ciclo de vida de la producción de 1m³ de concreto reciclado.

	Cemento (kg)	Arena (kg)	AR (kg)	Agua (kg)	Transporte (tkm)		Producción Demolición Disposición final (m ³)
					CR-1	CR-2	
Entradas							
<i>Materiales (kg)</i>							
Cemento	450.0						
Arena		795.0					
AN							
AR			658.0				
Agua				184.5			
<i>Transporte</i>							
Camioneta 1.5t					0.7	0.7	
Volteo 7m ³					23.3	36.3	
Camión de 32t					104.0	104.0	
<i>Energía (MJ)</i>							
Diésel							9.1
Eléctrica							7.5
Salidas							
<i>Tecnósfera</i>							
Concreto							1.0
<i>Suelo</i>							
Concreto demolido							1.0
Concreto vertido							-1.0

3. Resultados

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos por (Contreras-Marín, 2016). En la figura 2 se aprecia que la resistencia a la compresión de ambos concretos es superior a la f'_c de diseño a los 28 días y que si bien el CC presenta mayor resistencia a la compresión que el convencional, la diferencia es inferior al 10%. Con respecto al MR, en la figura 3 se aprecia que ambos concretos están dentro del rango esperado para concretos diseñados con un f'_c de 20 a 40MPa, los cuales han sido usados convencionalmente en el diseño de pavimentos y la diferencia entre CC y CR es menor a 1.6 %.

Las figuras 4 y 5 muestran los resultados del ACV por subproceso y por categoría de impacto, respectivamente, para los concretos evaluados en los 2 escenarios propuestos, donde se aprecia que el impacto ambiental asociado al CR disminuye 13 % con respecto al convencional en el escenario de transporte 1, mientras que la disminución es del 10 % en el escenario 2. Por un lado, en la Figura 4 se puede notar que la disminución del impacto en los concretos reciclados se debe principalmente a que el agregado grueso es un residuo y por tanto se evita la disposición final de éste; además de que las distancias para adquirirlo son menores que las del AN en el escenario 1 y su producción es menos contaminante. También se puede notar que las etapas de producción de cemento y transporte son las que ocasionan los mayores impactos, las cuales representan el 67 % y 18 %. Por otro lado, las categorías de impacto más afectadas por la producción de

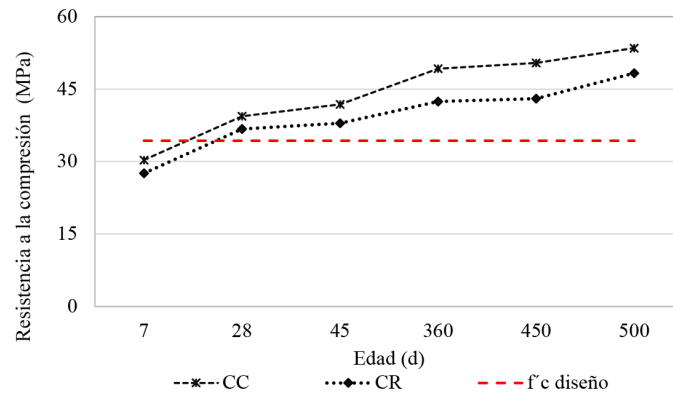


Figura 2. Resistencia a la compresión de CC y CR. Elaboración propia con datos de (Contreras-Marín, 2016).

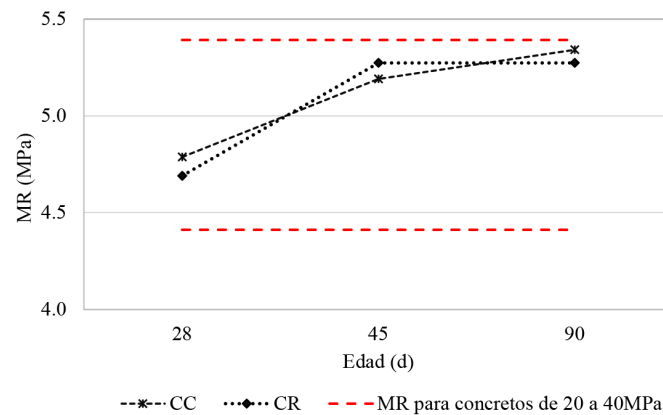


Figura 3. Módulo de ruptura de CC y CR. Elaboración propia con datos de (Contreras-Marín, 2016).

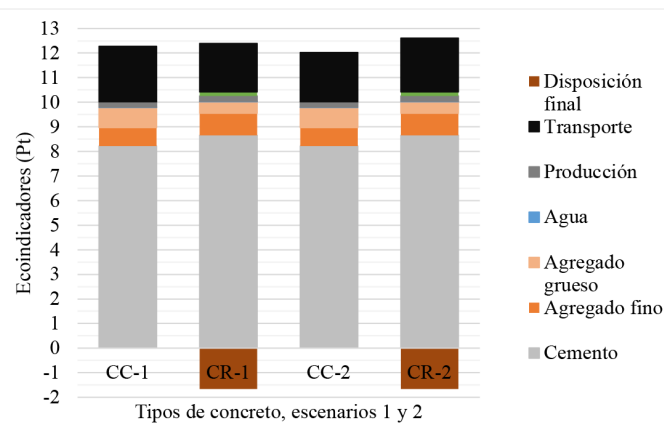


Figura 4. Puntuación ambiental por subproceso.

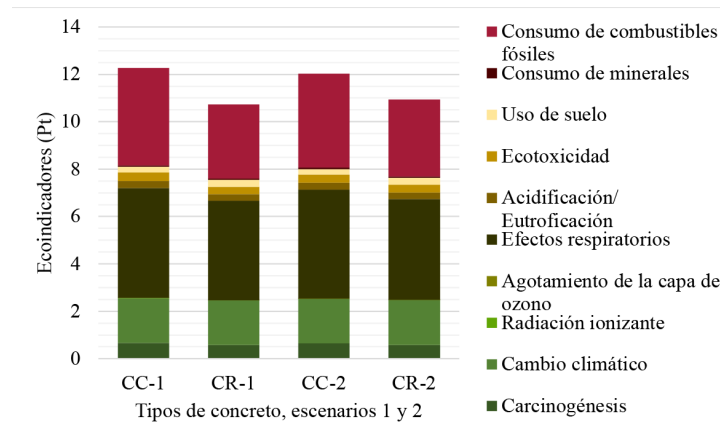


Figura 5. Puntuación ambiental de los concretos por categoría de impacto.

ambos concretos son: efectos respiratorios, cambio climático y consumo de combustibles fósiles, las cuales representan aproximadamente el 38 %, 34 % y 16 %, respectivamente, del total de daños calculados.

4. Conclusiones

De acuerdo con lo reportado en este estudio, los principales impactos ocasionados por la producción de concreto son efectos respiratorios, cambio climático y consumo de combustibles fósiles, lo cual es de esperarse dado a las altas emisiones de pequeñas de partículas y CO_2 en la producción del cemento y agregados, así como la quema de combustibles por las grandes distancias que tienen que trasladarse las materias primas necesarias. Con respecto a la comparación de impactos ambientales de los concretos evaluados, se puede concluir que el CR presenta una ventaja significativa con respecto al CC, pero ésta disminuye a medida que las distancias de transporte de los agregados naturales y reciclados se igualan.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte técnico y financiero de CONACYT y el PNPC, así como el apoyo del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la FIC-UMSNH.

6. Referencias

- Alexandridou, C., Angelopoulos, G.N. and Coutelieris, F.A. (2018). Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. *Journal of Cleaner Production*. 176: 745-757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.081>.
- Alnahhal, M.F., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Abutaha, F., Alqedra, M.A. and Nayaka, R.R. (2018). Assessment on engineering properties and CO_2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 203: 822-835. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.292>
- Antón-Vallejo, M. (2014), “Utilización del análisis de ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo”, tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña.

- Contreras-Marín, E. (2016), “Evaluación de Agregados Reciclados, para su implementación en Pavimentos Rígidos”, tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p.p. 93-99.
- International Standard Organization. (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Switzerland.
- International Standard Organization. (2006). ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Switzerland.
- Goedkoop, M. and Spriensma, R. (2001). “The eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report”, Amsterdam.
- Martínez Molina, W., Torres Acosta, A., Alonso Guzmán, E., Chávez García, H., Hernández Barrios, H., Lara Gómez, C., Martínez Alonso, W., Pérez Quiroz, J., Bedolla Arroyo, J. y F. González Valdez (2015). Concreto reciclado: una revisión. ALCONPAT. 5(3):235-248.
- Ministry of housing, spatial planning and the environment.(2000). “Eco-indicator 99. Manual for designers. A damage oriented method for Life Cycle Assessment”. Amsterdam.
- Olivera, A., Cristobal, S. y Saizar, C. (2016). Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social: una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. INNOTECH Gestión. 7:20-27.
- Pedro, D., De Brito, J. and Evangelista, L. (2017). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. Construction and Buildings Materials. 154:294-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>.
- SEMARNAT (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.
- Turk, J., Cotic, Z., Mladenovic, A. and Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. Waste Management. 45:194-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Younis, A., Ebead, U. and Judd, S. (2018). Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. Construction and Buildings Materials. 175:152-160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.183>
- Xiao, J., Wang, C., Ding, T. and Akbarnezhad, A. (2018). A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. Journal of Cleaner Production. 199:868-881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Efecto de la carbonatación en la condición de la interfase concreto-acero durante el proceso de carbonatación acelerada

T. Torrez Pérez³, T. Pérez López^{1,3}, J. A. Paat Estrella²,
D. Nieves-Mendoza⁴

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

² Facultad de Ciencia Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche

³ Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana

⁴ Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana,

Autor de Contacto: al056051@uacam.mx

Resumen

Se evaluó el efecto de la carbonatación en la condición de la interfase concreto-acero durante el proceso de carbonatación acelerada. Se elaboraron 66 probetas de concreto con acero de refuerzo y sin acero. Las probetas se sometieron a medición del potencial de corrosión (E_{corr}) y pH. Los resultados de pH y E_{corr} , muestran concordancia, ya que durante el proceso de carbonatación el pH disminuyó gradualmente, de un pH aproximado a 13 a un pH de 9, coincidiendo con el valor del potencial de corrosión que disminuyó su valor inicial de -120 mV hasta aproximadamente -700 mV. El seguimiento del E_{corr} demuestra que las varillas embebidas en concreto sometidas a un proceso de carbonatación acelerada presentaron despasivación de la varilla.

Palabras clave: Corrosión, carbonatación acelerada, despasivación.

Abstract

The effect of carbonation on the condition of the concrete-steel interface during the accelerated carbonation process was evaluated. Sixty-six steel-reinforced and non-steel concrete specimens were produced. The specimens were subjected to corrosion potential (E_{corr}) and pH measurement. The results of pH and E_{corr} show concordance, since during the carbonation process the pH gradually decreased from a pH of approximately 13 to a pH of 9, coinciding with the value of the corrosion potential that decreased its initial value from -120 mV to approximately -700 mV. The monitoring of the E_{corr} shows that the embedded rods in concrete subjected to an accelerated carbonation process showed depassivation of the rod.

Keywords: Corrosion, accelerated carbonation, depassivation.

1. Introducción

La corrosión del acero de refuerzo es una de las mayores causas que propicia el mantenimiento, reparación y sustitución de estructuras de concreto reforzado en el mundo, la mayoría de las veces prematuro. Actualmente, se estima que los países industrializados destinan de entre 3.5 y 4.5 % del PIB para intervenir estructuras con problemas de corrosión. En México no se cuenta con estadísticas similares sobre la magnitud del problema. Sin embargo, de acuerdo con un reporte de daños de la Red Federal de Carreteras se informa que poco más de 6000 puentes presentan algún grado de deterioro por corrosión, ya sea por ataque de cloruros o por carbonatación del concreto, o una combinación de ambos (González Díaz, 2010). Investigaciones previas en edificios de concreto reforzado han mostrado una carbonatación significativa del concreto después de sólo 20 años de servicio (Moreno *et al.*, 2005). Las mayores profundidades de carbonatación han sido encontradas en zonas de mayor concentración de CO₂, como lo pueden ser algunas zonas urbanas y/o industrializadas (Khunthongkeaw *et al.*, 2006).

Entre los agentes del medio ambiente que inducen la corrosión del acero de refuerzo, el dióxido de carbono (CO₂) es el compuesto que con mayor frecuencia entra en contacto con las construcciones, puesto que es un componente natural de la atmósfera (Solís Carcaño *et al.*, 2008), es por ello por lo que, la corrosión inducida por la carbonatación es la segunda causa de corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

La concentración promedio de CO₂ en la atmósfera es de aproximadamente un 0,03 %, sin embargo, esta pequeña concentración reacciona lentamente con los hidróxidos de la pasta de cemento que se encuentran diluidos en la solución poro del concreto, primero con los hidróxidos de sodio y potasio y posteriormente, los carbonatos que estas reacciones han generado reaccionan con el hidróxido de calcio, dando lugar a la formación de carbonato de calcio que precipita en la superficie del poro. Se dice entonces que esa porción del concreto se ha carbonatado (Solís Carcaño *et al.*, 2008).

La carbonatación no sólo modifica la estructura del concreto y por consiguiente sus propiedades, sino que también tiene una influencia decisiva sobre la velocidad de corrosión del concreto reforzado (Stolte y Bohnenkamp, 1976). El concreto es un material altamente alcalino con un pH entre 12,6 y 13,8, esto debido a los hidróxidos de calcio, sodio y potasio que se encuentran presentes en la matriz del concreto. Bajo las condiciones de pH antes mencionadas, el acero que se encuentra embebido dentro del hormigón forma espontáneamente una capa pasiva que, aunque es de pocos nanómetros de espesor muestra una acción protectora hacia el acero de refuerzo (Bertolini *et al.*, 2004), sin embargo, esta capa puede ser destruida por agentes agresivos tales como son los iones cloruros y/o el dióxido de carbono, lo que produce una despasivación del acero de refuerzo (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

La carbonatación puede desencadenar el proceso de corrosión, debido a que el descenso de pH que provoca hace posible que el acero de refuerzo pase del estado pasivo al activo. El proceso de corrosión depende de otros factores externos, tales como un contenido mínimo de humedad en el medio ambiente, el cual asegure la existencia del electrolito en los poros del concreto, y un libre acceso de O₂ hasta la superficie metálica para que pueda producirse la semirreacción catódica (Andrade *et al.*, 1981).

La humedad relativa (HR) ambiental es un factor importante para la progresión de la carbonatación, con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70 % (Tuutti *et al.*, 1982), a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono.

La corrosión se define como la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo cambios en sus propiedades tanto físicas como químicas. En otras palabras, el proceso corrosivo es la tendencia del

regreso a la condición natural del metal en condiciones estables (González Díaz, 2010). Su característica principal es que, generalmente, sólo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas anódicas y catódicas. En las primeras se da una reacción de oxidación por medio de la cual los electrones son liberados dirigiéndose a las regiones catódicas, produciéndose en el ánodo la disolución del metal (Solís Carcaño *et al.*, 2008).

El proceso global de la carbonatación consiste en seis etapas (Chávez Ulloa *et al.*, 2010):

- (a) $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- (b) $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$
- (c) $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
- (d) $\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$
- (e) $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{CaCO}_3$
- (f) $\text{OH}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Garcés Terradillos (2008), demostró que la etapa (a) corresponde a la absorción de CO_2 en la disolución poro contenida al interior del concreto, con la formación de la especie H_2CO_3 . Las reacciones (b) y (c) están relacionadas con la disociación del H_2CO_3 y el consumo de iones OH^- , que origina la disminución del pH de la disolución poro. La disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (d) permite mantener un pH elevado, cercano a 12.4 en la disolución poro. De esta manera, se asume que los iones calcio resultantes de la disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, precipitan al combinarse con iones carbonato para formar CaCO_3 (e). La etapa (f) corresponde a la disociación del agua. Dado que las etapas (a), (c), (e) y (f) son instantáneas, los pasos controlantes del proceso son la disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (d) y la disociación de H_2CO_3 (b). En consecuencia, las reacciones (a), (c), (e) y (f) se encuentran en equilibrio, mientras que (b) y (d) siguen las leyes cinéticas de reacción (Thiery *et al.*, 2005; Chávez *et al.*, 2010). Las formas que puede adoptar la corrosión son diversas, en general, se clasifican por la extensión del área atacada. Los tipos de corrosión más usuales son: generalizada, localizada, por picaduras y fisurante (Garcés Terradillos, 2008).

La corrosión trae consigo la formación de herrumbre, la cual se caracteriza por ser un proceso expansivo, alcanzando hasta cuatro veces su tamaño original, esto a su vez involucra esfuerzos internos y un eventual desprendimiento del concreto sobre el acero de refuerzo. La sección transversal del área del acero también puede verse reducida significativamente (Obando, 2013).

Las mediciones electroquímicas de potencial de media celda forman parte de las técnicas parcialmente no destructivas, de costo aceptable, que permite evaluar la probabilidad de corrosión de los aceros que forman parte de la estructura de concreto. La técnica de medición se encuentra estandarizada bajo la norma ASTM C876-91, aplicable para la evaluación in situ, e independiente del tamaño del refuerzo y de la profundidad dentro de la pasta de concreto (Rodríguez *et al.*, 2015). Las áreas donde hay corrosión son identificadas por medio de potenciales muy negativos, mientras que en zonas donde no hay corrosión los valores son menos negativos. El valor de este potencial puede relacionarse con la probabilidad de que la barra esté en un estado de corrosión. El hecho de que haya dos distintos electrolitos (el concreto y la solución de sulfato de cobre) añade un pequeño, pero insignificante, voltaje a la totalidad del potencial medido (Pruckner 2001).

Esta técnica consiste en la medición de un parámetro termodinámico que resulta ser útil, ya que revela el estado superficial de las varillas, sin embargo, no da información acerca de la cinética o velocidad con la que procede la corrosión (Almeraya *et al.*, 1998), es decir, esta técnica solo proporciona información cualitativa sobre el riesgo de corrosión como se muestra a en la tabla 1 (González Díaz, 2010).

Tabla 1. Potencial de corrosión según norma ASTM C876-91, (Rodríguez *et al.*, 2015).

Voltaje medido vs Electrodo de cobre / sulfato de cobre (V)	Probabilidad de corrosión
> -0.2 V	10 % o menos
-0.2V a -0.35 V	Región de incertidumbre
< -0.35 V	90 % o mas

2. Procedimiento

Se elaboraron 66 probetas de concreto con acero de refuerzo de 3/8” y 18 probetas sin acero como se muestra en la figura 1, utilizando cemento portland Maya, grava (de tipo calcáreo) como agregado grueso y arena como agregado fino, todos los materiales son característicos de la región. En esta primera etapa se cortaron las varillas con una longitud de 50 cm y posteriormente se limpiaron, y se cubrieron 17.5 cm de cada extremo con cinta aislante, dejando un área central de trabajo de 15 cm, como se muestra en la figura 1.

Las probetas se dividieron en tres series (I, II y III), para facilitar su manipulación durante el proceso de carbonatación. Posteriormente las tres series se sometieron a diferentes estudios que incluyen pruebas físicas, químicas y electroquímicas. Estas pruebas se realizaron antes, durante y después del proceso de carbonatación, para monitorear los posibles cambios ocasionados por el CO₂ en la interfase acero-concreto.

Para el diseño de mezcla, se eligió el diseño establecido de la ACI (American Concrete Institute) 211.1, elaborando probetas con relación de a/c de 0.6. Los materiales que fueron utilizados para la fabricación de los especímenes de concreto cumplieron con la normatividad vigente para cada uno de ellos, los cuales se describen a continuación.

Los agregados pétreos fueron seleccionados bajo el cumplimiento de la NMX-C-111-ONNCCE- 2018 (Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo), de los cuales el agregado fino que se utilizó fue arena y el agregado grueso fue piedra triturada con tamaño máximo de 19 mm. Los materiales utilizados son característicos de la región del sureste del país, de los cuales se obtuvieron las propiedades que se presentan en la tabla 2. El cemento utilizado para la fabricación de especímenes fue cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida (CPC 30R), con un peso específico de 3,150 kg/m³. Seguidamente, se realizó el cálculo de los pesos de los materiales por metro cúbico de concreto, obteniendo los pesos que se muestran en la tabla 3.

Se utilizaron moldes cilíndricos y prismáticos de 15 cm de diámetro o de anchura por 30 cm de altura, los cilíndricos fueron utilizados para probar esfuerzos de compresión a 7, 14 y 28 días. Los moldes empleados fueron de lámina metálica no absorbente y rígida, de acuerdo con la norma NMX-C-159ONNCCE-2004.

Una vez elaboradas las vigas, después de 24 horas se procedió a desmoldar, y se sometieron a curado por inmersión con una solución saturada de Ca (OH)₂ durante 28 días. Durante este tiempo se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado (tabla 4).

2.1 Degradación química del concreto (Carbonatación)

Previo a la degradación química del concreto mediante la aplicación de CO₂, se realizaron pruebas electroquímicas y químicas para conocer las condiciones iniciales de las muestras. Con la intención de lograr una mayor carbonatación en menor tiempo, se realizaron ensayos en una cámara de carbonatación acelerada,

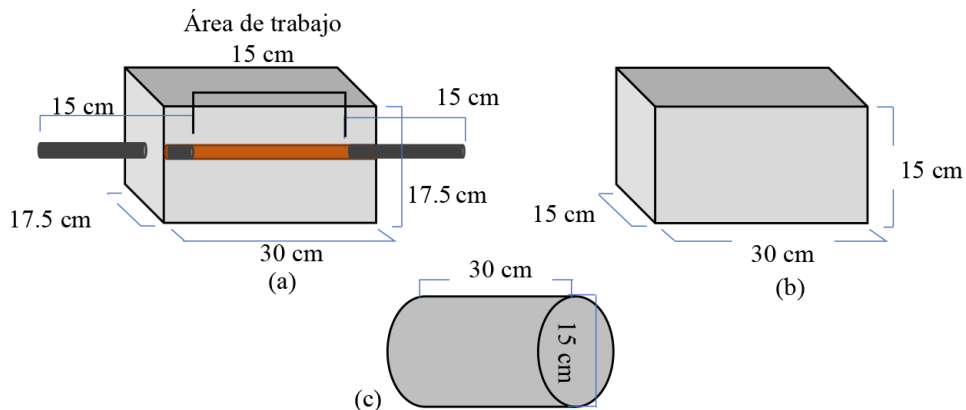


Figura 1. Características de las vigas elaboradas, (a) Con varilla de 50 cm (20 cm descubiertos como área de trabajo); (b) Sin varilla; (c) Cilindro para pruebas de resistencia a la compresión.

Tabla 2. Características de los materiales utilizados en las mezclas.

Pruebas	Agregado grueso (Grava)	Agregado fino (arena)	Cemento (Portland)
PVSS (Kg/m ³)	1241	1335	1400
PVVS (Kg/m ³)	1417	1514	
Densidad ó peso específico (gr/cm ³)	2.26	2.56	2.99
% Absorción	2.5	2.56	---
T.M.N.A. (mm)	12.5	2.5	---
% Humedad	---	---	---

Tabla 3. Pesos por metro cúbico de mezcla de concreto.

Materiales	(Kg)	Kg/m ³	Kg/m ³	Cantidad por utilizar (Kg)
Agua	205	17.01	6.68	115.82
Cemento	341.67	27.67	10.86	188.43
Agregado grueso	906.88	73.46	28.84	500.15
Agregado fino	927.49	75.13	29.49	511.51

Tabla 4. Resultado de la resistencia a la compresión de las vigas durante el tiempo de curado.

Días	7	14	28
Resistencia a la compresión	68 Kg/cm ² (6800 kPa)	119 Kg/cm ² (11900 kPa)	204 Kg/cm ² (20400 kPa)

debido a que la carbonatación en condiciones naturales es un fenómeno lento desde el punto de vista técnico. Durante los ensayos acelerados de carbonatación, las muestras de concreto se sometieron a una concentración de CO_2 entre 3 y 4 %, de acuerdo con las pruebas realizadas por Turcry *et al.* (2014), mayor que la presente en el aire ambiente. Se controló uno de los factores principales de la carbonatación, la humedad relativa, la cual se estableció entre 60 y 65 % (Nordic Innovation Centre, 2005). Para obtener la concentración deseada de CO_2 y de humedad relativa, se empleó un tanque comercial de 25 kg, controlando el volumen con un medidor de flujo.

Las vigas se carbonataron en un periodo de seis meses. Las vigas se distribuyeron en las cámaras de carbonatación, dejando entre cada una de las vigas una separación de 5 cm, haciendo uso de cortes de tubo PVC de 1/2", tanto vertical como horizontalmente, con la finalidad de que el gas se distribuyera uniformemente por todas las vigas. Cabe mencionar, que para una mejor distribución del CO_2 en las vigas, éstas se rotaron manualmente sobre su propio eje una vez a la semana, durante el periodo de carbonatación.

En el transcurso de los seis meses se utilizaron 75 kg de CO_2 . Se determinó el avance de la carbonatación mediante el método de vía húmeda con los indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína, utilizando como vigas "testigo", los especímenes que se elaboraron sin acero de refuerzo. La prueba consistió en realizar un corte transversal a la viga, de aproximadamente 4 cm de espesor (Figura 15), después de realizado el corte, se retiró de la cara interna todo el material que quedó suelto con una brocha limpia. Seguidamente se le aplicó cada uno de los indicadores, fenolftaleína y timolftaleína de forma uniforme, utilizando un atomizador para una mejor distribución. Por último, se midió cada uno de los lados carbonatados con un flexómetro, es decir, la parte superficial que no presentó coloración (figura 2).

2.2 Potencial de Corrosión

La medición consistió en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del concreto (American society of test and materials, 1994).

Debido a la elevada resistividad del concreto sobre todo cuando está libre de humedad, se humedeció de forma homogénea la superficie sobre la que se realizaron las mediciones. Para llevar a cabo estas mediciones se utilizó como electrodo de referencia el cobre-sulfato de cobre (Cu/CuSO_4). La medición se realizó

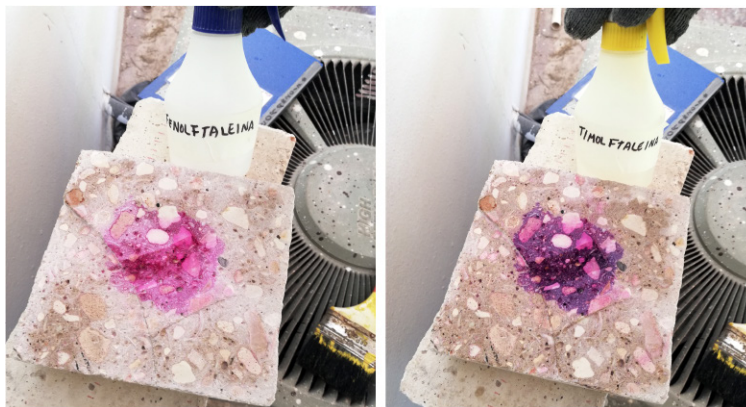


Figura 2. Aplicación de los indicadores ácido-base.

con un multímetro de alta impedancia con una precisión mínima de + 1 mV. El acero de refuerzo se conectó al polo (-) y el electrodo de referencia al polo (+). El criterio de evaluación fue el que está establecido en la Norma ASTM C-876 (tabla 1).

3. Resultados

A las muestras de material, extraídas en polvo, se les determinó el pH, con el fin de obtener valores más exactos de pH, y confirmar la determinación cualitativa realizada por el método de indicadores, estos resultados se presentan en la figura 3.

Con el proceso de degradación química se logró que el pH fuera disminuyendo hasta alcanzar valores alrededor de 9 upH.

Una vez completado el proceso de degradación química acelerada del concreto, se determinó el potencial de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto, esta medición representó la magnitud que indicó la probabilidad de corrosión o pasividad del mismo. Se obtuvo un valor promedio del potencial igual a -650 mV (figura 4). De acuerdo a los valores establecidos la Norma ASTM C-876 (tabla 1), valores más negativos a -350 mV, presentan el 90 % de riesgo de que exista corrosión, lo que confirmó la efectividad de la carbonatación.

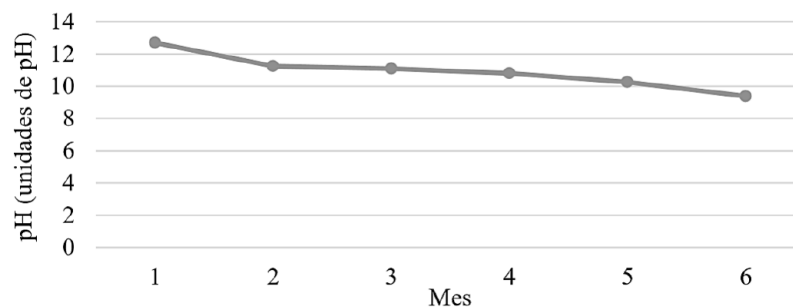


Figura 3. Valores de pH obtenidos durante el proceso de carbonatación.

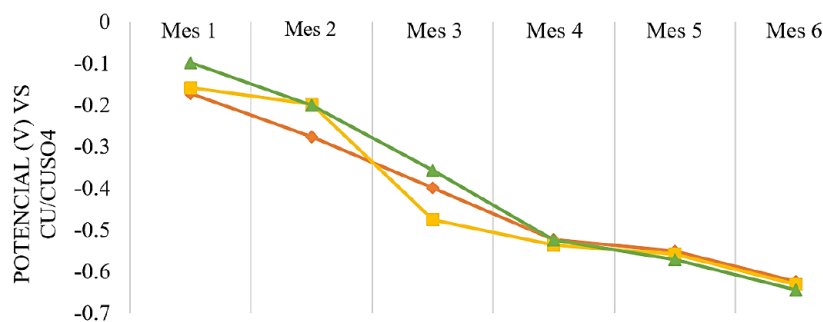


Figura 4. Potencial promedio de las tres series de vigas reforzadas en estudio.

Para la corrosión en un medio acuoso, dos variables fundamentales, llamadas potencial de corrosión y pH, son evaluadas por su particular importancia. Cambios en otras de sus variables, como la concentración de oxígeno tienden a reflejarse como cambios en el potencial de corrosión.

Como se observa en la figura 5 las gráficas de pH y E_{corr} , muestran que durante el proceso de carbonatación el pH disminuyó gradualmente, de un pH aproximado a 13 a un pH de 9 en la proximidad de la varilla, coincidiendo con el valor del potencial de corrosión que disminuyó su valor inicial de -120 mV hasta aproximadamente -700 mV, y de acuerdo con la norma ASTM C-876, estos valores se encuentran por debajo del valor establecido de -350 mV con una probabilidad del 90 % de riesgo de que haya corrosión.

4. Conclusiones

Los valores del pH del concreto antes de la carbonatación se encuentran en valores entre 12 y 13 unidades de pH, protegiendo la pasividad del acero de refuerzo. Estos valores disminuyeron con el tiempo de exposición en condiciones agresivas de carbonatación, hasta obtener valores por debajo de 9 unidades de pH.

El seguimiento del E_{corr} demuestra que las varillas embebidas en concreto sometidas a un proceso de carbonatación acelerada presentaron una secuencia que va desde el estado pasivo hasta la despasivación de la varilla, por lo que se afirma que el potencial de corrosión es una herramienta de gran utilidad para determinar la probabilidad de corrosión en el acero embebido en concreto.

5. Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación en Corrosión (CICORR), UACAM, UV-campus Xalapa, PRODEP, Fundación Pablo García.

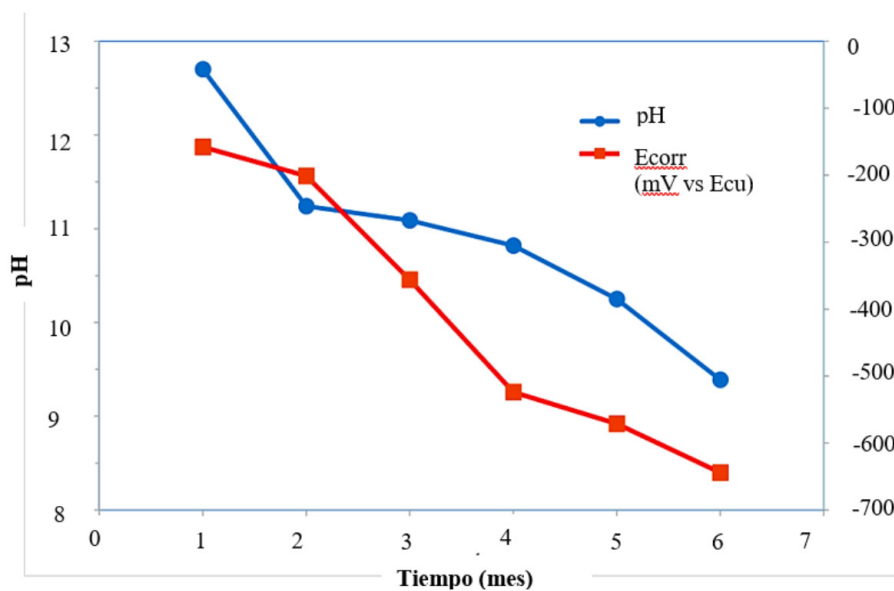


Figura 5. Seguimiento de pH y E_{corr} .

6. Referencias

- Aguirre, A. M. y Mejía de Gutiérrez, R. (2013). “Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas”. *Materiales de Construcción* Vol. 63, 309, 7-38.
- Andrade, C., Algaba, S y Gonzales, J.A. (1981). “Corrosión de armaduras embebidas en hormigón carbonatado”. *British Corrosion Journal* vol 15 No. 3, pp. 135.
- Almeraya, C. F. (1998). “Monitoreo y control de la corrosión en estructuras de concreto”.
- ASTM internacional. (2015). “Método de prueba estándar para el potencial de corrosión del acero de refuerzo sin recubrimiento en concreto”. www.astm.org
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. y Polder, R. (2004). “Corrosión de acero en el concreto”. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim.
- Chávez Ulloa, E., Pérez López, T., Reyes Trujeque, J., Corvo Pérez, F. y Osorno Carrillo, J. B. (2010). “Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada”. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 41.
- Garces Terradillos, P. y Zornoza Gómez, E. (2008). “Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado”. España: Editorial club universitario.
- González Días, F. (2010). “Recalculización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión”. Tesis doctoral). Tesis en cotutela: Universidad Autónoma de Nuevo León y Université Paul Sabatier, Nuevo León, México.
- Khunthongkeaw, J., S. Tangtermsirikul y T. Leelawat, (2006). “Un estudio sobre la predicción de la profundidad de carbonatación para el hormigón de cenizas volantes”. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 20, pp. 744-753.
- Moreno, E. I., Solís, R. G., López, L. (2005). “Corrosión inducida por carbonatación en estructuras urbanas de hormigón”. Houston, TX: CORROSION, paper no. 263, NACE International.
- NMX-C-083-ONNCCE. (1985). “Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba”.
- NMX-C-159-ONNCCE. (1983). “Industria de la construcción - Concreto - Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio”.
- Obando Ramírez, A. D. (2013). “Propuesta de procedimientos de las técnicas: ruido electroquímico, resistencia a la polarización e impedancia electroquímica usadas en la medición de la corrosión del refuerzo en el concreto reforzado”. Tesis de maestría. Bogotá.
- Rodríguez, G., Aperador Chaparro, W., Delgado Tobón, E. (2015). “Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro”. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVI (número 4).
- Pruckner, F. (2001). “Corrosión y protección de armaduras en medidas e interpretación de hormigón”.
- Solís Carcaño, R., Moreno, E., Jiménez Torres, F., Rosas Pérez, V. (2008). “Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado”. *Costa Rica: Ingeniería* vol. 18 (1, 2): 45-55.
- STOLTE, E., y BoHNENKAMP, K. (1976). “Protección contra la corrosión de materiales metálicos en la construcción y la ingeniería civil”. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., pp. 113-127.
- Tuutti, K. (1982). “Corrosión del acero en el hormigón, el cemento sueco y la investigación del hormigón”. Institute, Suecia.

• IX Congreso Nacional ALCONPAT •
San Francisco de Campeche, Campeche

Control de Calidad





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CONTROL DE CALIDAD

Ceniza de bagazo de caña como MCS: Necesidades de investigación

M. A. Maldonado-García, V. A. Franco-Luján, P. Montes-García

CIIDIR unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional,

Autor de Contacto: pmontes@ipn.mx

Resumen

El presente estudio es acerca del uso de ceniza de bagazo de caña (CBC) como material cementante suplementario (MCS). Se analizaron múltiples estudios sobre los post-tratamientos utilizados para mejorar las características físicas y químicas de la CBC. Asimismo, se evaluaron aspectos de trabajabilidad, resistencia mecánica y durabilidad de compuestos donde se substituyó parcialmente el cemento Portland por CBC. Para tal efecto se revisaron artículos publicados en revistas especializadas. Se encontró que la mayoría de las investigaciones están enfocadas en el post-tratamiento de la CBC y en el desarrollo de propiedades microestructurales y mecánicas de concretos conteniendo dicha ceniza. Sin embargo, prácticamente no existen estudios sobre la durabilidad de composites base cemento adicionados con CBC como MCS, los cuales son muy necesarios.

Palabras clave: Materiales cementantes suplementarios; post-tratamiento; trabajabilidad; propiedades mecánicas; durabilidad.

Abstract

This study aims to the use of sugarcane bagasse ash (SCBA) as supplementary cementitious material (SCM). Several studies about the post-treatments used to improve the physical and chemical properties of the SCBA were analyzed. Likewise, the workability, mechanical and durability properties of cement-based composites added with SCBA were evaluated. For that purposed, a number of published papers were reviewed. It was found that most researches are focused on the post-treatment methods for the SCBA and the microstructural and mechanical properties of concretes containing this ash. However, only few studies on durability of cement-based composites containing SCBA as SCM were found. Therefore, research on this topic is highly needed.

Keywords: supplementary cementitious materials; post-treatment; workhability; mechanical properties; durability.

Resumo

Este estudo visa a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA) como material cimentício complementar (SCM). Vários estudos sobre os pós-tratamentos utilizados para melhorar as propriedades físicas e químicas do SCBA foram analisados. Da mesma forma, foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, mecânica e durabilidade dos compósitos à base de cimento adicionados com SCBA. Para tanto, diversos artigos publicados foram revisados. Verificou-se que a maioria das pesquisas está voltada para os métodos de pós-tratamento do SCBA e as propriedades microestruturais e mecânicas dos concretos contendo essa cinza. No entanto, apenas alguns estudos sobre durabilidade de compósitos à base de cimento contendo SCBA como SCM foram encontrados. Portanto, pesquisas sobre este tópico são altamente necessárias.

Palavras-chave: materiais cimentícios complementares, pós-tratamento; capacidade de trabalho; propriedades mecânicas; durabilidade.

1. Introducción

En recientes años la demanda de cemento Portland (CP) se ha incrementado considerablemente para satisfacer las necesidades de infraestructura alrededor del mundo (Habert, 2013). Sin embargo, su manufactura requiere cantidades excesivas de materia prima y energía, además de emitir entre 0.8 a 1.0 toneladas de CO₂ a la atmosfera por tonelada de cemento, lo que representa del 5 al 7 % de las emisiones totales de CO₂ a nivel global (Aprianti *et al.*, 2015; Paris 2016). Una alternativa para contrarrestar esta problemática es utilizar materiales cementantes suplementarios (MCS) al CP en la elaboración concreto u otros compositos base cemento. Uno de estos materiales es la ceniza volante (CV) proveniente de la combustión de carbón mineral durante la generación de energía eléctrica. La CV ha sido ampliamente evaluada y utilizada en la manufactura de concretos, esto debido a que posee características tales que en presencia de los productos de hidratación del CP son propicias para la ocurrencia de las llamadas reacciones puzolánicas, contribuyendo a la mejora de propiedades de trabajabilidad y durabilidad del concreto sin detrimento significativo de su resistencia a compresión (Malhotra, 1994). No obstante, recientes políticas ambientales apuntan hacia el reemplazo del carbón mineral por gas natural, con la consecuente reducción del volumen CV disponible para su uso en la industria de la construcción. Por esta razón, desde hace varios años se investiga el uso de MCS alternativos provenientes de otras industrias que subsanen dicho déficit. En este contexto, la industria azucarera, la cual es una industria creciente al igual que la del cemento (R=0.96) (figura 1), ha sido blanco de diversas investigaciones sobre todo por la disposición de sus residuos.

El principal residuo de la industria azucarera es la ceniza de bagazo de caña (CBC) la cual es generada durante el proceso de combustión del bagazo de caña utilizado como combustible para la obtención de azúcar y alcohol. Se ha reportado que anualmente se producen aproximadamente 15 millones de toneladas de CBC ocasionando serios problemas ambientales en suelos, ríos y agua subterránea debido a su disposición a cielo abierto (Frías y Sánchez de Rojas, 2013). En México, la unión nacional de cañeros (UNC, 2020) reporta una producción cercana a 52 millones de toneladas de azúcar de caña en el periodo 2019-2020, obteniendo aproximadamente 15 millones de bagazo y 0.34 millones de toneladas de CBC de acuerdo con estimaciones basadas en lo reportado por Akram *et al.* (2009). Diversas investigaciones mencionan que la CBC contienen compuestos ricos en sílice y alúmina en su fase amorfa los cuales reaccionan con el hidróxido de calcio que se genera durante la hidratación del CP, lo cual sugiere que la CBC puede emplearse como sustituto parcial de CP en mezclas de concreto utilizando porcentajes de hasta 30 % sin tener efectos negativos en las propie-

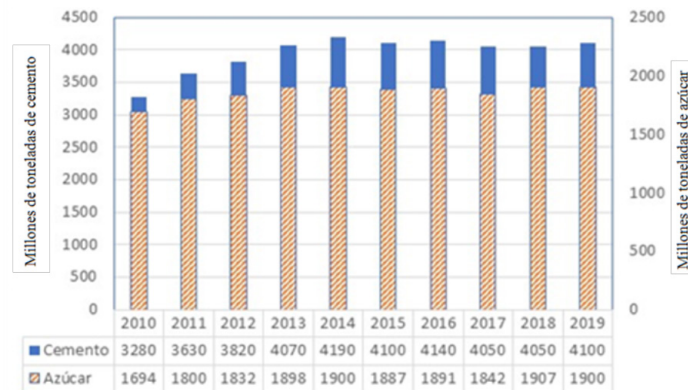


Figura 1. Producciones globales de cemento y caña de azúcar durante los últimos diez años en millones de toneladas, adaptados de (IEA, 2020; Shahbandeh, 2020).

dades microestructurales y mecánicas de dichos concretos (Ganesan *et al.*, 2007; Chusilp *et al.*, 2009; Bahurudeen y Santhanam, 2015; Dhengare *et al.*, 2015; Cordeiro *et al.*, 2018; Maldonado-García *et al.*, 2018).

No obstante, la CBC también puede tener un alto contenido de pérdidas por calcinación (PxC) que podrían afectar negativamente algunas propiedades del concreto. Para subsanar esta deficiencia se han planteado varias alternativas, por ejemplo, el post-tratamiento de la ceniza antes de su adición en mezclas de concreto y su combinación con otros MCS para minimizar su aparente efecto negativo. Diversas investigaciones han reportado acerca de dichos post-tratamientos para la CBC y su influencia en las propiedades microestructurales y mecánicas de mortero y concreto (Chusilp *et al.*, 2009; Bahurudeen y Santhanam, 2015; Maldonado-García *et al.*, 2017), pero pocos han evaluado el aspecto de durabilidad.

Considerando lo anterior, el objetivo de este artículo es analizar las necesidades de investigación sobre los tratamientos necesarios a la CBC para su uso como MCS, así como el efecto de la combinación de CBC con otros MCS para la preparación de morteros y concretos ternarios.

2. Procedimiento

Se revisaron artículos especializados acerca del uso de CBC sin tratar y sometida a diferentes métodos de post-tratamiento tales como cribado, molido y re-calcinado. Se analizó el efecto de la adición de la CBC en las propiedades de trabajabilidad, mecánicas y de durabilidad de morteros y concretos. Finalmente, con base en lo anterior se propusieron necesidades de investigación en cuanto al uso de CBC como sustituto parcial del CP en mezclas de mortero y concreto.

3. Resultados

3.1 Post-tratamientos de la CBC

Existen diversas investigaciones en las cuales se menciona la necesidad de implementar un post-tratamiento a la CBC previo a ser empleada en mezclas de concreto. Lo anterior con la finalidad de incrementar su actividad puzolánica y por ende mejorar algunas propiedades microestructurales, mecánicas y de durabilidad de concretos conteniendo esta ceniza. Los post-tratamientos comúnmente empleados son el calcinado y re-calcinado, el molido por medios mecánicos, el tamizado y combinación de estos métodos.

3.1.1 Calcinado y Re-calcinado

Diversos autores han evaluado el proceso de combustión del bagazo de caña para ser utilizado como sustituto parcial de CP en mezclas de concreto. Morales *et al.*, 2009, mencionan haber incrementado el índice de actividad resistente de compuestos base cemento adicionados con bagazo de caña calcinada a temperaturas de 800 y 1000 °C. Sin embargo, Soares *et al.* (2014), mencionan que una temperatura de calcinación de 600 °C es suficiente para favorecer la creación de sílice amorfa y que a mayores temperaturas se obtiene cristobalita. Zareei *et al.* (2018), menciona que un proceso de calcinado de 700 °C mejora las propiedades mecánicas de compuestos base cemento adicionados con CBC.

El re-calcinado se refiere al proceso de someter la CBC a un proceso de calcinación después de su recolección en los ingenios azucareros, esto con el objetivo de incrementar su actividad puzolánica debido a que se obtiene un material más homogéneo con alto contenido de compuestos químicos con potencial puzolánico y compuestos con bajo contenido de carbón. Bahurudeen y Santhanam (2015), evaluaron el efecto de diferentes temperaturas, 600, 700, 800 y 900 °C y concluyeron que el re-calcinado tiene un efecto positivo en las propiedades puzolánicas de la CBC, no obstante este efecto se invierte con temperaturas de calcinación superiores a 700 °C. Algo similar concluyen Veras-Ribeiro y Morelli (2014), mencionando que temperaturas de re-calcinado de 500, 600 y 700 °C incrementa la actividad puzolánica de la CBC debido a que disminuye el contenido de carbón.

Analizando lo anterior, existen conclusiones diferidas acerca de la temperatura adecuada de calcinado o re-calcinado, lo cual puede deberse principalmente al tipo de minerales en el bagazo de la caña, estos son variable dependiendo de las propiedades de la caña de azúcar en determinada región donde sea cultivada. Sin embargo, se puede establecer un rango de temperatura idóneo el cual sería entre 600 y 700 °C, bajo estas condiciones se reduce el contenido de PxC y se incrementa el potencial puzolánico de la CBC.

3.1.2 Molido

De acuerdo con investigaciones previas, el molido es el post-tratamiento más empleado para la CBC. Este post-tratamiento reduce el tamaño de partículas de la CBC, generalmente hasta alcanzar una finura similar a la del CP, e incrementa su área superficial, por consiguiente, se tiene mayor área de contacto disponible para los procesos de reacción puzolánica (Somma *et al.*, 2012; Cordeiro y Rurtis 2017). Otros autores han implementado métodos de molido para obtener un tamaño de partículas menor a las de CP afirmando que un molido prolongado incrementa hasta obtener arriba de 100% de potencial puzolánico de la CBC (Cordeiro *et al.*, 2009, 2016). Se ha reportado que al incrementar el potencial puzolánico de la CBC por medio del molido se obtiene una mayor resistencia a la compresión debido a los cambios en la microestructura de la matriz cementante del concreto conteniendo este material (Cordeiro *et al.*, 2008, 2018; Bahurideen y Santhanam 2015).

Otros autores han reportado que el molido también tiene efectos positivos en la CBC con alto contenido de PxC incrementando su índice de actividad resistente (Somma *et al.*, 2012). Chusilp *et al.* (2009) y Montakarniwong *et al.* (2013), reportan que la CBC con alto contenido de PxC no tiene efectos negativos en la resistencia a compresión de morteros cuando la ceniza es sometida a un proceso de molido hasta obtener un tamaño de partícula de 45µm. De igual manera, Rerkpiboon *et al.* (2015), mencionan que la CBC con alto contenido de PxC molida hasta obtener un tamaño de partícula de 45 µm incrementa la resistencia al ingreso de iones cloruro del concreto.

De acuerdo con anterior, se puede concluir que el post-tratamiento de molido mejora las cualidades de la CBC, principalmente físicas, en cuanto a su potencial puzolánico. Sin embargo, este proceso suele ser por tiempo prolongado, mayor a 1 hora, y requiere de grandes cantidades de energía.

3.1.3 Tamizado

El tamizado es el proceso de remover partículas fibrosas en la CBC después de ser recolectada en los ingenios azucareros. Investigaciones concluyen que el proceso de tamizado puede ser suficiente para incrementar el índice de actividad resistente de la CBC (Torres *et al.*, 2014; Bahurudeen y Santhanam 2015; Maldonado-García *et al.*, 2018).

De igual manera, Investigaciones recientes afirman que un proceso de tamizado de la CBC por la malla de 75 μ m durante 4 a 5 minutos es recomendable para no tener efectos negativos en la resistencia a compresión de morteros y concretos, además de favorecer las propiedades de durabilidad de éstos (Arenas-Piedrahita *et al.*, 2016; Maldonado-García *et al.*, 2019; Franco-Lujan *et al.*, 2019). Otros autores mencionan que un proceso de tamizado por la malla de 300 μ m es suficiente para incrementar el índice de actividad resistente y la resistencia a compresión de compuestos base cemento (Bahurudeen y Santhanam 2015).

De acuerdo con lo reportado por Maldonado-García *et al.* (2018), puede no existir diferencia significativa en el índice de actividad resistente de la CBC sometida a post-tratamientos de molido y tamizado. Los autores mencionan haber obtenido índices de actividad resistente muy similares al comparar la CBC molida durante 1 hora y tamizada por la malla de 75 μ m versus CBC solamente tamizada por la misma malla. Por lo anterior, se concluye que el tamizado resulta una opción más amigable con el medio ambiente sin demeritar las propiedades puzolánicas de la CBC en comparación de cuando se aplica el post-tratamiento de molido.

3.1.4 Combinación de métodos de post-tratamientos

La mayoría de las investigaciones sobre el tema concuerdan en la conveniencia de utilizar dos post-tratamientos para mejorar las propiedades puzolánicas de la CBC. Al respecto, Ganesan *et al.*, 2007 y Noor-ul (2011), mencionan haber empleado entre 5 a 30% de CBC calcinada a 650 °C y molida para reducir su tamaño de partículas como sustituto parcial de CP sin tener efectos negativos en propiedades mecánicas de compuestos base cemento. Bahurudeen y Santhaman (2015), también evaluaron el desempeño puzolánico de la CBC sometida a combinación de diferentes post-tratamientos. Los autores sugieren que se requiere de un mínimo procesamiento de la CBC mencionando como mejor opción el tamizado por la malla de 300 μ m más un proceso de molido hasta obtener la fineza del cemento de 300m²/kg.

3.2 Trabajabilidad

Investigaciones reportan que la CBC tiene efectos adversos en la fluidez y trabajabilidad de mezclas base CP en estado fresco. Lo anterior se atribuye a la presencia de partículas de aspecto fibroso, a medio calcinar o sin calcinar. Asimismo, el problema de fluidez y trabajabilidad se puede deber a las diferentes formas y tamaños del resto de partículas de la CBC (Bahurudeen *et al.*, 2014). Al respecto, Jiménez-Quero *et al.* (2013), proponen un mecanismo en el cual las partículas de CBC tienden a aglomerarse durante el proceso de mezclado debido a sus diversas formas y tamaños (figura 2a). Este efecto puede ser contrarrestado utilizando un aditivo superplastificante (Bahurudeen *et al.*, 2014) o con la adición de otro MCS como por ejemplo la CV la cual tiene partículas con forma esférica reduciendo la fricción en la mezcla (figura 2b) (Jiménez-Quero *et al.*, 2013).

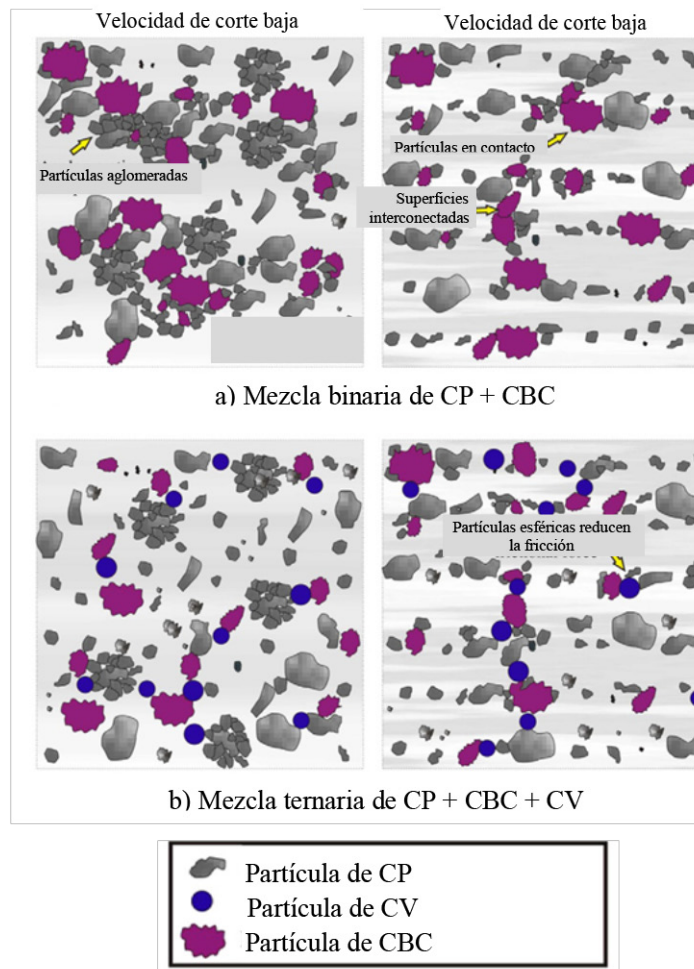


Figura 2. Representación esquemática del comportamiento reológico de la CBC en compuestos base cemento (Adaptado de Jiménez-Quero *et. al.*, 2013).

3.3 Propiedades microestructurales

El uso de un MCS cambia la microestructura de la pasta cementante de compuestos base cemento. En este sentido la CBC puede cambiar la microestructura de dichos compuestos mediante dos mecanismos: la reacción puzolánica y el efecto filler, ambos mecanismos están estrechamente relacionados con la composición química y propiedades físicas de la ceniza, las cuales a su vez dependen del post-tratamiento aplicado.

El cambio de microestructura por reacción puzolánica se atribuye al desarrollo de compuestos cementantes tales como silicatos hidratados de calcio y aluminosilicatos hidratados de calcio los cuales hacen la matriz cementante más compleja y/o densa (Ríos-Parada *et. al.*, 2017; Maldonado-García *et. al.*, 2018; Zareei *et. al.*, 2018).

El efecto filler ocurre al existir partículas muy finas o partículas cristalinas modificando la interconectividad entre poros de la matriz cementante (Rukzon y Chindaprasirt 2012; Arif *et. al.*, 2016). Este efecto

puede ocurrir cuando se somete a la CBC a un proceso de molido prolongado y las partículas tienen alto grado de cristalinidad.

3.4 Propiedades mecánicas.

Investigaciones afirman que la adición de CBC como sustituto parcial del CP incrementa la resistencia a compresión de morteros y concretos independientemente del post-tratamiento empleado (Cordeiro *et. al.*, 2012; Dhengare *et. al.*, 2015; Ríos-Parada *et. al.*, 2017; Cordeiro *et. al.*, 2018; Rajasekar *et. al.*, 2018; Zareei *et. al.*, ; Maldonado-García *et. al.*, 2019). El incremento de la resistencia a compresión es atribuido principalmente a la formación de nuevos compuestos cementantes a partir de las reacciones puzolánicas ocurridas entre la CBC, el hidróxido de calcio formado durante la hidratación de CP y agua. De igual manera se reporta que el proceso de reacción puzolánica e incremento de la resistencia a compresión ocurre después de 28 días de curado (Katara y Madurwar, 2017; Cordeiro *et. al.*, 2018; Maldonado-García *et. al.*, 2018).

En la figura 3 se muestra un gráfico de resistencias a compresión de concretos ternarios adicionados con CBC y CV tamizadas por la malla de 75µm. Se observa que la resistencia a compresión del concreto que contiene 15 % de CBC es igual a la del concreto control a partir de los 14 días. El concreto con adición del 15 % de CV muestra valores de resistencia a compresión menores a las del concreto control y del concreto conteniendo 15 % de CBC. Es probable que esta CV posea pocas propiedades puzolánicas. Considerando lo anterior, es de esperarse que al combinar el 15 % de CBC y el 15 % de CV la resistencia a la compresión se vea disminuida con respecto a los resultados observados en la mezcla de concreto conteniendo solamente 15 % de CBC.

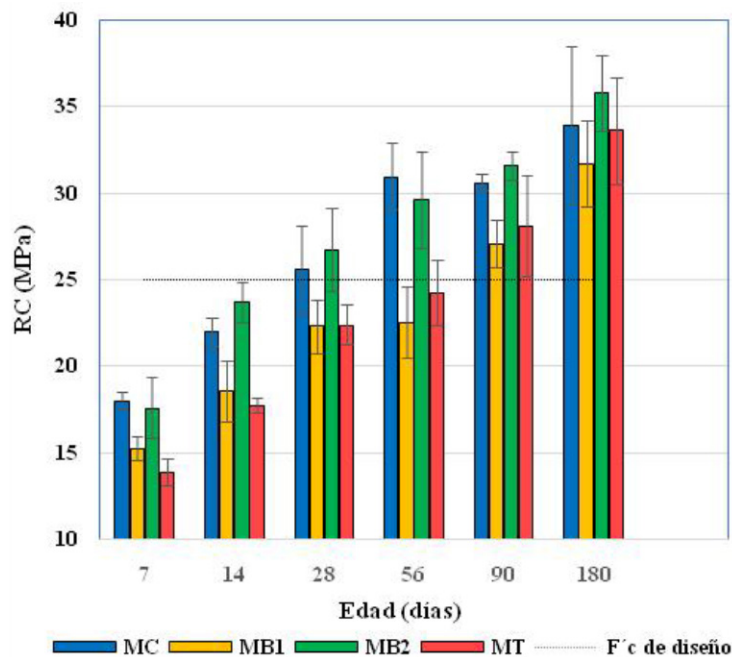


Figura 3. Resistencia a la compresión de concretos ternarios conteniendo CBC y CV tamizadas por la malla de 75µm MC = 100% CP, MB1 = 85% CP + 15% CV, MB2 85% CP + 15% CBC, MT = 70% CP + 15% CV + 15% CBC (Adaptado de Pacheco-Hernández - en proceso)

Otras investigaciones se han enfocado en utilizar 0, 10 y 20 % de CBC tamizada por la malla de 75 μ m como MCS en cementos activados alcalinamente base CV utilizando activadores de SiO₂/NaOH. Hasta el momento han reportado tener efectos benéficos en sus propiedades mecánicas evaluadas por medio de pruebas de resistencia a la compresión y pulsos ultrasónicos (Pérez-Cortés 2016; Valdivieso-Méndez, en proceso).

3.4 Propiedades de durabilidad

Investigaciones reportan que la adición de CBC como MCS tiene efectos positivos en las algunas propiedades de durabilidad de concretos. Lo anterior independientemente del post-tratamiento al cual haya sido sometida la CBC. Diversos autores han evaluado la absorción, resistencia a la penetración y difusión de iones cloruro y resistividad eléctrica (Somma *et. al.*, 2012; Arenas-Piedrahita *et. al.*, 2016; Zareei *et. al.*, 2018; Rajasekar *et. al.*, 2018) afirmando que la absorción de agua se reduce hasta en un 50 % después de 90 días de curado. Asimismo, observaron que la resistencia a la penetración y difusión de iones cloruro se incrementa en aproximadamente 50 % en concretos conteniendo CBC debido a una microestructura más compleja de los compositos. Finalmente mencionan que la resistividad eléctrica también incrementa al adicionar CBC. Sin embargo, a pesar de las ventajas en cuanto a durabilidad reportadas por dichos autores, aún existen pocos estudios referentes a la durabilidad de concretos reforzados conteniendo CBC, lo cual es bastante relevante.

Existen dos publicaciones en las cuales han evaluado el efecto de la adición de CBC en la corrosión de concretos reforzados mediante pruebas electroquímicas en donde mencionan efectos positivos (Nuñez-Jaquez *et. al.*, 2012; Valencia *et. al.*, 2012). Sin embargo, dichos estudios se han realizado a corto plazo dando lugar a algunas incertidumbres. Por lo anterior y por la naturaleza no destructiva del método de monitoreo mediante pruebas electroquímicas se sugiere un mayor tiempo de monitoreo. Al respecto, investigaciones recientes han dado continuidad al monitoreo del proceso de corrosión de morteros binarios y concretos ternarios reforzados adicionados con CBC y CV durante más de 2500 días (Maldonado-García *et. al.*, 2019; Franco-Luján *et. al.*, 2019). En dichos estudios se ha reportado el efecto benéfico de la adición de CBC, la cual solamente fue tamizada por la malla de 75 μ m durante 4 a 5 minutos, al disminuir el riesgo y la intensidad de corrosión de morteros y concretos conteniendo dicha ceniza. En la figura 4 se puede observar un gráfico de densidades de corrosión de concretos ternarios conteniendo CBC. Hasta la fecha de monitoreo reportada se concluye que el 10 y 20 % de adición de CBC incrementa el tiempo de despasivación y disminuye la corrosión en concretos reforzados (comparándolo con el control), teniendo una densidad de corrosión moderada, lo cual es semejante a la mezcla de concreto que solo contiene CV.

4. Discusión

Hoy en día existe la necesidad de emplear materiales de construcción que sean más amigables con el medio ambiente. Entre dichos materiales se encuentran los concretos adicionados con materiales suplementarios. Estos materiales pueden ser desechos de alguna actividad industrial o agroindustrial tales como la CV y la CBC respectivamente y deben cumplir con ciertas características físicas y de composición química para su uso en concretos. De acuerdo con el análisis de literatura realizado en este escrito, la CBC puede ser utilizada hasta en un 30% como reemplazo parcial del cemento Portland sin afectar negativamente la resistencia a compresión de los mismos (Dhengare *et. al.*, 2015; Paris *et. al.*, 2016; Katare y Madurwar, 2017; Maldonado-García *et. al.*, 2017). Sin embargo, se reporta que la CBC requiere de un mínimo Post-tratamiento para

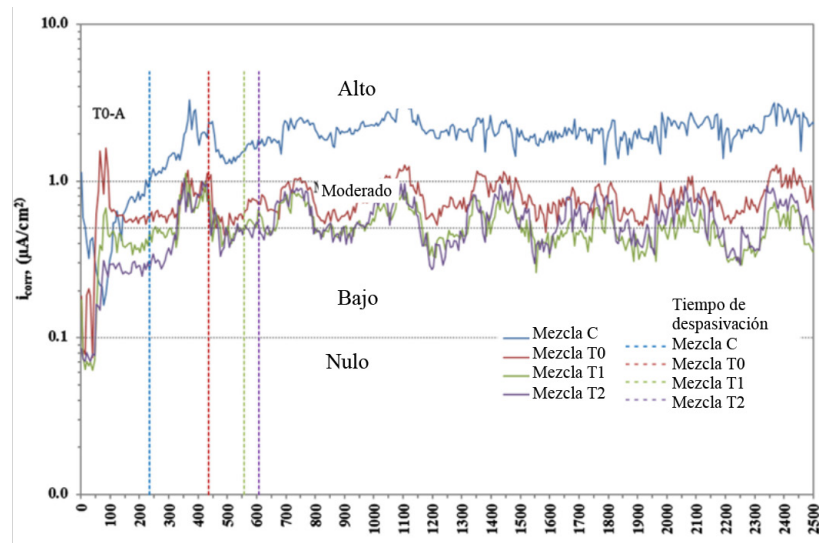


Figura 4. Densidades de corrosión de acero de refuerzo embebido en concretos ternarios conteniendo CBC tamizada por la malla de $75\mu\text{m}$. Mezclas C (control), T0 (20% de CV), T1 (10% de CBC y 20% de CV), T2 (20% de CBC y 20% de CV) (Adaptado de Franco-Luján *et. al.*, 2019).

incrementar su actividad puzolánica (Bahurudeen and Santhanam 2015). De los post-tratamientos analizados, el tamizado es la opción que requiere menor cantidad de energía y por ende ocasiona menor contaminación ambiental sin demeritar las propiedades microestructurales, mecánicas y de durabilidad evaluadas hasta ahora. Considerando lo anterior, en este artículo también se ha expuesto los avances de un proyecto de seguimiento a mediano plazo en el cual se emplea CBC tamizada por la malla de $75\mu\text{m}$ (Jiménez-Quero *et. al.*, 2013; Arenas-Piedrahita *et. al.*, 2016; Ríos-Parada *et. al.*, 2017; Maldonado-García *et. al.*, 2018; Maldonado-García *et. al.*, 2019; Franco-Luján *et. al.*, 2019). Hasta el momento el grupo de investigación ha evaluado las propiedades reológicas de pastas y morteros, la microestructura y propiedades mecánicas a edades tardías de morteros y concretos, aspectos de durabilidad y el riesgo de corrosión de morteros binarios y concretos ternarios adicionados con dicha CBC. Los autores han reportado que es posible utilizar la CBC solamente tamizada por la malla de $75\mu\text{m}$ sin presentarse efectos contraproducentes en morteros y concretos. Sin embargo, al ser un proyecto a mediano plazo han surgido algunas necesidades de investigación que a continuación se describen.

5. Necesidades de investigación

Con base en la revisión de la literatura se vislumbran las siguientes necesidades de investigación:

- Estudios para corroborar el post-tratamiento más ecológico para la CBC enfocándose a la demanda energética de éste, y las emisiones de CO_2 que genera a la atmosfera.
- Evaluación de la amorficidad de las diferentes fases minerales presentes en la CBC y su papel en los cambios observados en la matriz cementante. Asimismo, la aparente protección de estas fases amorfas en la corrosión del acero de refuerzo de concretos.
- Evaluación del efecto del contenido de carbón de la CBC en la durabilidad morteros y concretos, especialmente en el fenómeno de carbonatación.

- Estudios no acelerados a largo plazo sobre la durabilidad de morteros y concretos reforzados que contienen CBC. Estos estudios deben considerar los efectos de la adición de CBC en la resistencia a la penetración de cloruros, la capacidad de ligado de cloruros y el monitoreo de la corrosión inducida por cloruros después de la despasivación del acero de refuerzo.
- Estudios sobre la elucidación del mecanismo de protección contra la corrosión aparentemente mejorado con la adición de CBC, considerando los tres factores mencionados anteriormente.
- Investigación centrada en el efecto de la corrosión sobre las propiedades mecánicas del refuerzo de acero en concreto que contenga CBC, especialmente en la reducción de la ductilidad de dicho acero.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el recurso financiero otorgado para la realización de las diferentes investigaciones. También agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las becas de posgrado otorgadas para la realización de estudios de maestría a Ur Iván Hernández-Toledo, M. A. Maldonado-García, Jenny Carolina Arenas-Piedrahita, Venustiano Ríos-Parada, Pedro Pérez-Cortéz, David Irvin Valdívieso-Méndez y Alejandra Verónica Pacheco Hernández; así como de estudios doctorales a Víctor G. Jiménez-Quero, M.A. Maldonado-García y V.A. Franco-Luján.

7. Referencias

- Akram, T., Memon, S.A., and Obaid, H. (2009). Production of low-cost self-compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials* 23(2): 703-712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>
- Arenas-Piedrahita, J.C., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J.M., López-Calvo, H.Z., Valdez-Tamez, P.L. and Martínez-Reyes, J. (2016). Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials* 105: 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- Aprianti E.; Shafiqh P.; Bahri S.; and Farahani J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials* 74: 176-787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Arif E., Clark M. and Lake N. (2016). Sugar cane bagasse ash from a high efficient co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. *Construction and Building Materials* 128: 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>
- Bahurudeen, A. V. Marckson, Kishore A. and Santhebam M. (2014). Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers. *Construction and Building Materials* 68: 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.013>
- Bahurudeen A and Santhanam M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement Concrete Composites* 56: 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Chusilp N., Jaturapitakkul C., and Kiattikomol K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials* 23: 3523-3531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>
- Cordeiro G. C and Rurtis K. E. (2017). Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. *Cement and Concrete Research* 97: 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>

- Cordeiro G.C., Tavares L.M, and Toledo-Philo R.D. (2016). Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. *Cement Concrete Research* 89: 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>
- Cordeiro G.C., Toledo-Philo R.D., Tavares L.M., and Fairbairn E. M. R. (2012). Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes. *Construct. Build. Mater* 29: 641-646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.095>
- Cordeiro G.C., Toledo-Philo R.D., Tavares L.M., and Fairbairn E.M.R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement Concrete Research* 39:110-115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- Cordeiro G.C., Toledo Philo R.D., Tavares L.M., and Fairbairn E.M.R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites* 30: 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- Cordeiro G.C., Paiva O.A., Toledo-Philo R.D., Fairbairn E.M.R and Tavares L.M. (2018). Long term compressive behavior of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. *Journal of Testing and Evaluation* 46(2): 564-573. doi:10.1520/JTE20160316
- Dhengare S., Amrodiya S., Shelote M., Asati A., Bandwaf N., Anand K and Jichkar R. (2015) Utilization of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material in concrete and mortar – A review. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 6(4): 94-106. www.iaeme.com/Ijciyet.asp
- Franco-Luján, V.A., Maldonado-García, M.A., Mendoza-Rangel, J.M. & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, pp. 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.004>
- Frías R. M., and Sánchez de Rojas G. M. I. (2013) “Eco-efficient concrete. Chapter 5: Artificial pozzolans in eco-efficient concrete”. Woodhead Publishing Limited.
- Ganesan K., Rajagopal K and Thangavel K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement. Concrete Composites* 29: 515-524. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Habert G. (2013). “Eco-efficient concrete, Chapter 1: Environmental Impact of Portland cement production”. First edition, Woodhead Publishing Limited.
- IEA. (2020). *Tracking Industry 2020*. IEA. Paris. <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>
- Jiménez-Quero, V.G., León-Martínez, F.M., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C. and Chacón-Nava, J.G. (2013). Influence of sugarcane bagasse ash and fly ash on the rheological behaviour of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 40: 691-701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Katara V.D., and Madurwar M.V. (2017). Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. *Construction and Building Materials* 152: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>
- Maldonado-García M.A., Hernández-Toledo U.I., Montes-García P and Valdez-Tamez P.L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars, *Materiales de Construcción* 68(329) e148, 2018. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>
- Maldonado-García, M.A, Hernández-Toledo, U.I., Montes-García, P. & Valdez-Tamez, P.L. (2019). Long-term corrosion risk of thin cement composites containing untreated sugarcane bagasse ash. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31: 04019020_1-04019020_13. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002647.
- Maldonado-García M.A., Montes-García P and Valdez-Tamez P.L. (2017). A review of the use of sugarcane bagasse with a high LOI content to produce sustainable cement composites. *Second International Conference on Bio-based Building Materials*, Clermont-Ferrant, France.

- Malhotra V.M. and Ramezaniapour A.A. (1994). "Fly ash in concrete". CANMET, segunda edición.
- Montakarntiwong K., Chusilp N., Tangchirapat W., and Jaturapitakkul C. (2013). Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. *Materials and Desing* 49: 414-420. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.031>
- Morales E.V., Villar-Cociña E., Frías M., Santos S.F., and Savastano Jt H. (2009). Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. *Cement and Concrete Composites* 31: 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.004>
- Noor-ul A. (2011). Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2011: 717-720. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000227)
- Núñez-Jaquez R.E., Buelna-Rodríguez J.E., Barrlos-Durstewitz C.P., Gaona-Tiburcio C., and Almeraya-Calderón F. (2012). Corrosion of modified concrete with sugar cane bagasse ash. *International Journal of corrosion* 2012: 1-5. 2012. DOI: 10.1155/2012/451864
- Paris J.M., Roessler J.G., Ferraro C.C., DeFord H.D., and Townsend T.G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production* 121: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Pacheco-Hernández A. V. A. "Influencia de la CVmx y la CBCst en algunas propiedades de concretos ternarios". M.Eng. Thesis, IPN (En proceso).
- Pérez-Cortés P., (2016), "Sugarcane bagasse ash for the synthesis of new cements with fly ash", M.Eng. Thesis. CIIDIR Oaxaca, IPN.
- Rajasekar A., Arinachalam K., Kottaisamy M., and Sraswathy V. (2018). Durability characteristics of ultra high strength concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 171:350-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>
- Rerkpiboon A., Tangchirapat W., and Jaturapitakkul C. (2015). Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. *Construction and Building Materials* 101: 983-989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.140>
- Ribeiro R.V. and Morelli M.R. (2014). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of Brazilian sugar cane bagasse ash (SCBA). *Materials Research* 17: 974-981. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093>
- Ríos-Parada V., Jiménez-Quero V.G., Valdez-Tamez P.L. and Montes-García P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials* 157: 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>
- Rukzon S., and Chindaprasirt P. (2012). Utilization of bagasse in high-strength concrete. *Materials and Desing* 34: 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.045>
- Shahbandeh M. (2020). Sugar cane production worldwide 1965-2018. Published at Feb 20, 2020. <https://www.statista.com/statistics/249604/sugar-cane-production-worldwide>
- Soares Marcela M.N.S., García Dayana C.S., Figueiredo Roberto B., Aguilar María Teresa P., Paulo R. Cetlin. (2016). Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. *Cement and Concrete Composites* 71: 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>
- Somna R., Jaturapitakkul C., Rattanachu P. and W. Chalee, (2012). Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Desing*, 36: 597-603, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.065>

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche



- Torres A. J., Mejía de Gutiérrez R., Escandon G.C.E., and González S. L.O. (2014) Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ingeniería e Investigación* 34: 5-10. DOI: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v34n1.42787>
- Valdivieso-Méndez D.I., “Characterization of alkaline-activated cement base fly ash and sugarcane bagasse ash by ultrasonic parameters”, M.Eng. Thesis.CIIDIR Oaxaca, IPN. (En proceso)
- Valencia W.G., Mejía de Gutierrez R., Barrera J., and Delvasto S. (2012). Durability and corrosion study of reinforced blended mortars with tuff and sugar cane bagasse ash. *Revista de la Construcción* 12: 112-122. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093>
- UNC. Unión Nacional de Cañeros A. C. de México. 2020. Visto en octubre de 2020 www.caneros.org.mx
- Zareei S.A., Ameri F., and Bahrami N. (2018). Microstructure, strength and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 184: 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





CONTROL DE CALIDAD

Análisis del comportamiento de Isla de Calor Urbana Superficial en ciudades puerto de México con clima cálido húmedo durante el COVID19

E.Limón-Yedra¹, E.Alonso-Guzmán², J.Santamaria-López³, R.Grajeda-Rosado¹

¹ Programa Arquitectura, FICH, Universidad Veracruzana,

² FIC, PIDA, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

³ FICH, Universidad Veracruzana

Autor de Contacto: lgrajeda@uv.com

Resumen

El objetivo principal de la presente investigación es analizar el comportamiento de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) de diferentes ciudades puerto de México, ubicadas entre las latitudes 22° a 19°, considerando dos meses de los años 2019 y 2020. La selección de los periodos permite comparar dos meses del periodo cálido húmedo, entre el 2019, año “normal” en el comportamiento de las actividades antropogénicas y el 2020, que debido a la contingencia sanitaria COVID-19, presenta una disminución de la movilidad y comportamiento de los habitantes urbanos. La información fue obtenida del LandSat 8 y procesados a través del programa ArcGis. Los datos muestran variaciones de temperatura de 10 a 20°C en las superficies de las ciudades.

Palabras clave: Isla de Calor Urbana Superficial; Actividad Antropogénica; Teledetección

Abstract

The main objective of this research is to analyze the behavior of the Island of Superficial Urban Heat (ICUS) of different port cities of Mexico, located between latitudes 22° to 19°, considering two months of the years 2019 and 2020. The selection of the periods makes it possible to compare two months of the warm humid period, between 2019, a «normal» year in the behavior of anthropogenic activities, and 2020, which due to the COVID-19 health contingency, presents a decrease in mobility and behavior of urban dwellers. The information was obtained from LandSat 8 and processed through the ArcGis program. The data show temperature variations of 10 to 20 ° C on the surfaces of cities.

Keywords: Surface Urban Heat Island; Anthropogenic Activity; Remote sensing.

1. Introducción

La climatología por definición es el estudio del comportamiento a largo plazo de la atmósfera en un lugar geográfico determinado. Dentro de sus disciplinas más especializadas, está la climatología urbana, para el estudio de las modificaciones locales por las actividades humanas y sus asentamientos urbanos. Su aplicación es relevante en los temas relacionados con la planificación urbana, la calidad ambiental del medio urbano y los riesgos climáticos que afectan a las ciudades, permitiendo la rehabilitación, la restructuración o reconstrucción de estas para el confort de sus habitantes (Moreno García, 1997).

Además, es una puerta de posibilidades como indicador de la sostenibilidad de las ciudades, por estar íntimamente ligada al Cambio Climático mundial y a los nuevos procesos de planeación urbana necesarios para las ciudades que buscan ser sostenibles y resilientes. Su análisis y detección abarca el uso de estaciones meteorológicas, recorridos en auto (transectos) y teledetección satelital para crear mapas isotérmicos de las ciudades.

Es por tanto que el concepto de Isla de Calor Urbano (ICU), fenómeno de acumulación del calor presente en las ciudades, causado por distintas actividades que se realizan en el día a día por lo seres humanos; como a) el transporte en automóviles, camiones colectivos, motocicletas, b) la no planeación en la utilización de materiales fríos en las edificaciones (usando en su mayoría materiales con gran capacidad de almacenaje calorífico que luego es expedido al ambiente), c) actividades portuaria (en ciudades costeras), d) mínima superficie de áreas verdes, e) diseños de edificaciones, que generan cañones urbanos con perfiles cerrados que no permiten el movimiento del viento dentro de las zonas urbanas; por mencionar algunas son factores que aumentan la temperatura ambiental (Serricola y Martín-Vide, 2014).

Otro concepto que se desglosa de la ICU, es la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS), fenómeno que ocasiona un aumento en la temperatura superficial que se lleva a cabo por la ausencia de ventilación más el efecto de la radiación que reciben las superficies de la ciudad y que se disipan a la atmósfera, esto sucede por los mecanismos de calentamiento del aire como serían: a) la evapotranspiración de la vegetación, b) la humedad del suelo, c) la combustión de elementos fósiles por el transporte, d) la contaminación atmosférica, e) la limitada cantidad de superficies húmedas, f) el intercambio de calor debido a la turbulencia incrementada por los edificios, entre muchas otras actividades de nuestro día a día que afectan gravemente a nuestro medio (Barradas, 2016).

La ICUS se identifica como uno de los principales impulsores de calor extremo en los centros urbanos; por lo tanto, actualmente los investigadores están considerando opciones de movilidad que podrían reducir el impacto que tiene la movilidad en el cambio climático y el consumo de recursos como los combustibles fósiles.

El estudio de la movilidad en las grandes urbes, se vuelto una ciencia aplicada, se estudian variables como el volumen de tráfico, la velocidad, densidad, inventarios de infraestructura generando modelos de pronósticos, sin embargo, estos estudios han hecho a un lado factores como la equidad de social, valor económico y el medio ambiente (Quintero-González, 2017).

El sector de transporte urbano es por tanto un problema importante por resolver para el desarrollo sostenible en términos de usos de energía, emisiones de dióxido de carbono y ICUS (Kolbe, 2019).

La investigación de Kolbe (2019), realiza una comparación entre vehículos convencionales (uso de energía fósil) y eléctricos, alimentados con fuentes de hidrogeno y eólica a través de la cuantificación de sus emisiones de CO₂, sus resultados arrojan que, si la flota actual de vehículos es sustituida un 50 % con vehículos eléctricos de energía eólica, reduce 1°C la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

A través de la metodología de teledetección satelital, el presente documento busca ofrecer un panorama de cómo afecta la movilidad el comportamiento de las isothermas de la ICUS en las ciudades, a través de la comparación de varias urbes en diferentes periodos y ubicaciones

2. Procedimiento experimental

2.1 Áreas de estudio

Las ciudades analizadas, fueron seleccionadas porque en comparación poseen similitudes en el comportamiento de movilidad, usos de suelos y actividades antropogénicas.

Primeramente, son ciudades mexicanas, ubicadas entre las latitudes 22 a 19°, con longitudes entre 105 a 93° y una altitud sobre el nivel del mar de 10 m, por lo tanto, comparten un clima según la clasificación Köppen; cálido de húmedo a subhúmedo. La investigación con un enfoque cuantitativo busca la comparación de estas cuatro ciudades y puertos costeros de México en dos periodos mayo y junio del 2019 y del 2020 (figura 1), meses representativos del periodo cálido y sobre todo cuando inicia de manera oficial la contingencia de resguardo del país.

Las ciudades estudiadas están clasificadas como ciudades y puerto, dos junto al océano Pacífico y dos en el Golfo de México, por su característica de ubicarse en una zona resguardada de gran oleaje, donde las embarcaciones pueden hacer maniobras para el embarque y desembarque de mercancías o pasajeros son consideradas como zonas portuarias importantes en México (SCT, 2020).

2.2 Método de procesamiento

Con el adelanto tecnológico, los científicos empiezan a utilizar instrumentos de medición más sofisticados, que permiten observar parte de la superficie terrestre y aplicarlos para saber cómo se comportan las islas de calor con respecto a puntos geográficos específicos. Es aquí, donde entra la detección por aviones y satélites por medio de fotografías térmicas, ediciones de ondas electromagnética de la radiación de calor. En este punto las mediciones son en zonas urbanas y regionales.

Debido a que los satélites sólo pasan por un mismo punto una vez cada determinado lapso de días, no registran información continua, por lo tanto, se analizaron varios días para asegurar que las condiciones climáticas sean estables. Es importante recalcar que esta herramienta es para el estudio de grandes áreas,

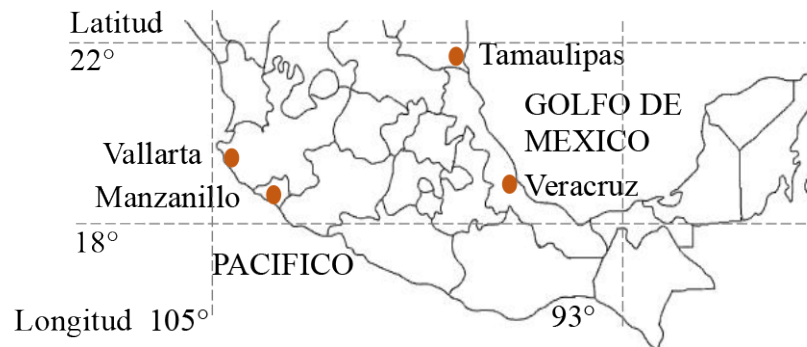


Figura 1. Ubicación de las ciudades puerto analizadas (SCT, 2020).

pero no permite saber el comportamiento de la capa de dosel, se enfoca en estimar las temperaturas de las superficies como son los techos, pisos, pavimentos y tipos de suelo urbanos (Gartland, 2008). Por lo que la ICU estudiada con esta metodología es la llamada superficial.

Los avances en la aplicación de la teledetección térmica en las superficies urbanas mediante satelitales actuales han alcanzado alta resolución para la interpretación de las isotermas de la ICU superficial (Voogt y Oke, 2002).

Utilizando la información de las bandas térmicas 2,3, 4, 5, 10 y 11 del satélite Landsat 8 en la página web de libre acceso, de la organización científica del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), se procesan imágenes con el programa ArcGis para obtener las isotermas de la Isla de Calor Urbana Superficial, así como los metadatos para posteriormente ser examinados con software estadístico; permitiendo la creación de gráficas para su análisis.

El software ArcGis maneja varias herramientas de procesamiento georreferenciado, de las cuales las usadas en esta metodología fueron: a) cálculo de la radiancia con las bandas TIR 10 y 11, b) obtención de la temperatura de brillo considerando su conversión en esta investigación de °F a °C, c) promedio de los resultados de la radiancia de las bandas 10 y 11, d) procesamiento del dato NDVI (Normal Difference Vegetation Index) usando las bandas 4 y 5, e) computo de la proporción de vegetación, utilizando los datos mínimos y máximos del NDVI, f) análisis del valor de emisividad ligado al porcentaje de vegetación con valores correspondientes a la emisividad de la vegetación y el suelo, y finalmente g) obtención de la Temperatura Superficial del Suelo (TSS) con la ecuación (1) (Grajeda *et.al.*, 2020):

$$LST = BT / 1 + w (BT / p) * \ln(\epsilon) \quad (1)$$

Donde:

BT= Temperatura del brillo .

w = Longitud de radiación de onda de las bandas 10 y 11.

p = Radiación de onda electromagnética.

Ln (ϵ) = Logaritmo en función de la emisividad final

3. Resultados

Los resultados finales de las cuatro ciudades por medio del ArcGis se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 5, indicando fecha de la toma satelital y temperatura máxima y mínima superficial, con una resolución de 60m por pixel, editados y cortados según municipio para identificar la zona específica de la ciudad.

3.1 Puerto Vallarta y Nuevo Vallarta, Jalisco (Pacífico)

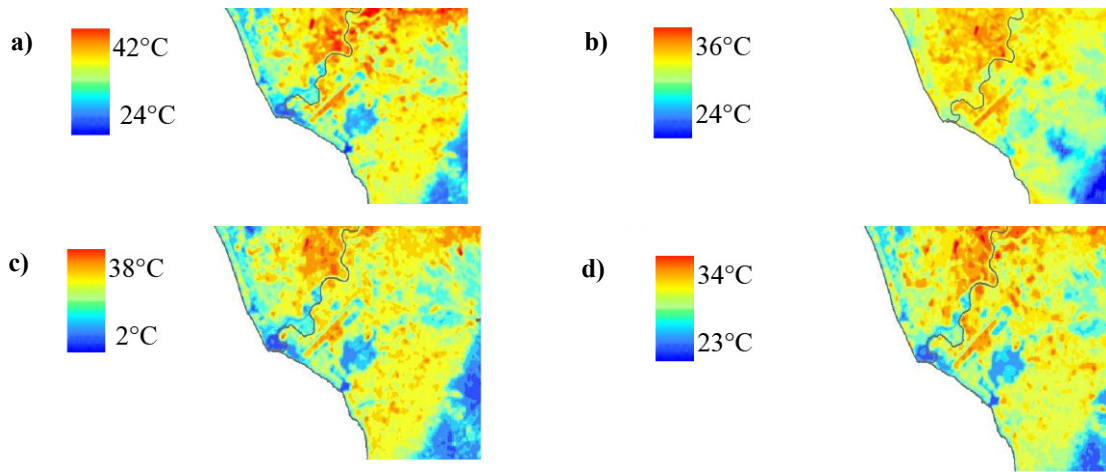


Figura 2. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas

de analisis en la zona conurbada de Puerto Vallarta y Nuevo Vallarta, Jalisco.

- a) TSS, maximos y minimos, 01 de mayo del 2019; b) TSS, maximos y minimos, 03 de mayo del 2020;
c) TSS, maximos y minimos, 21 de junio del 2019; d) TSS, maximos y minimos, 06 de junio del 2020

3.2 Puerto Manzanillo, Colima (Pacífico)

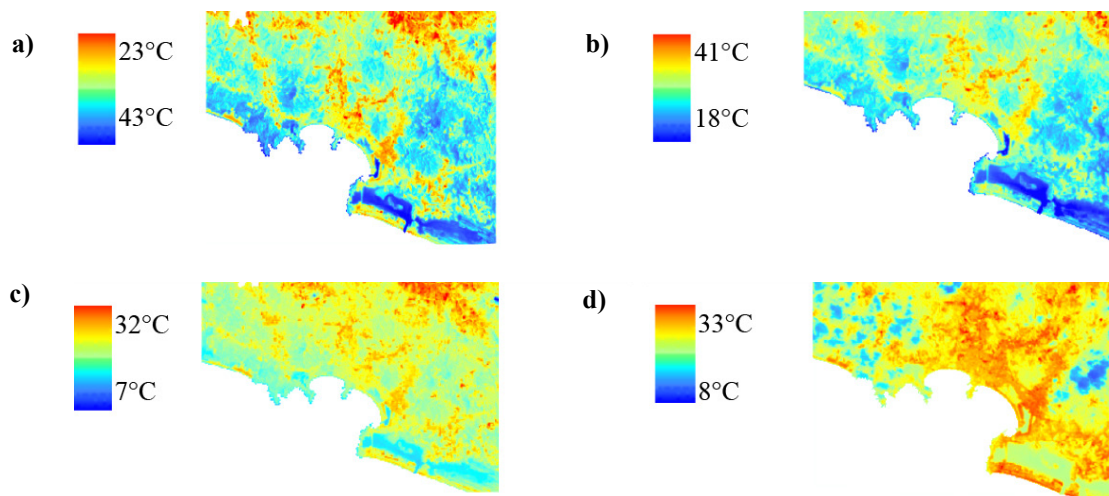


Figura 3. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis del pueto y ciudad de Manzanillo, Colima.

- a) TSS, maximos y minimos, 10 de mayo del 2019; b) TSS, maximos y minimos, 28 de mayo del 2020;
c) TSS, maximos y minimos, 11 de junio del 2019; d) TSS, maximos y minimos, 29 de junio del 2020.

3.3 Tampico y Ciudad Madero (Golfo de México)

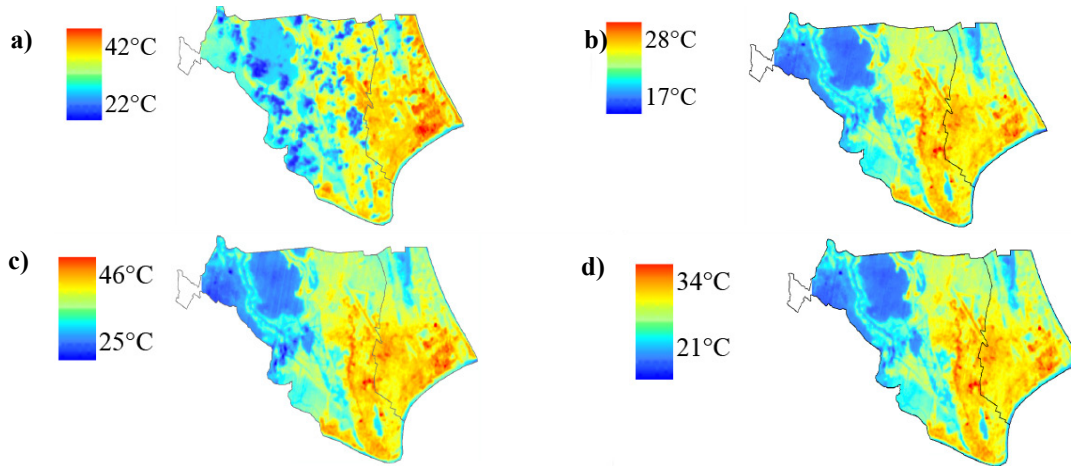


Figura 4. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis de la zona conurbadaa de Tampico y ciudad Madero.

a) TSS, maximos y minimos, 21 de mayo del 2019; b) TSS, maximos y minimos, 07 de mayo del 2020;
c) TSS, maximos y minimos, 06 de junio del 2019; d) TSS, maximos y minimos, 08 de junio del 2020

3.4 Veracruz y Boca del Río, Veracruz (Golfo de México)

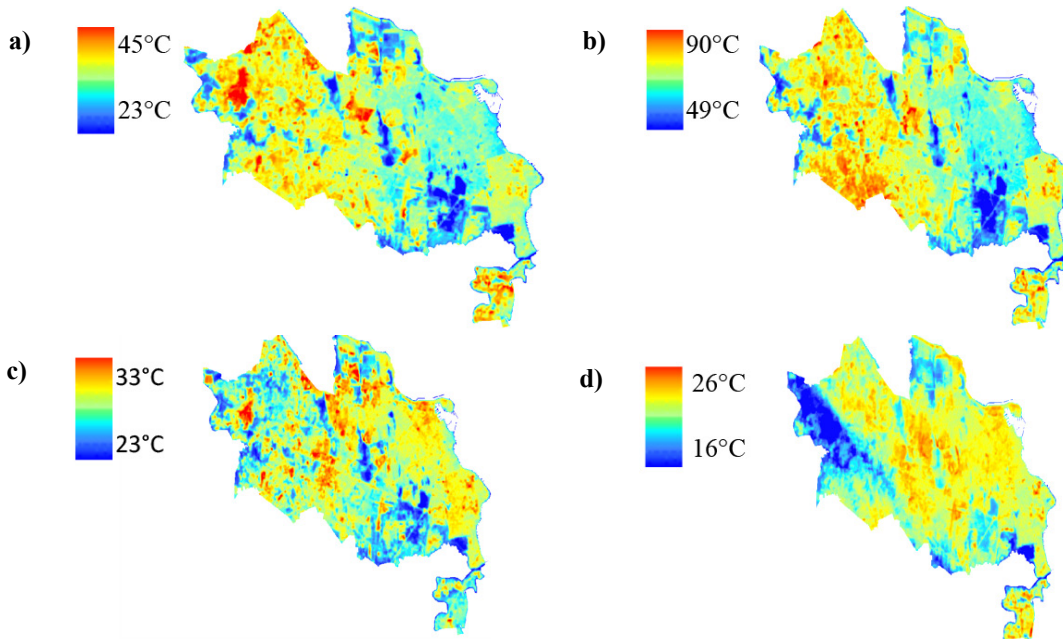


Figura 5. TSS maximos y minos de acuerdo con la fechas de analisis de la ciudad y puerto de Veracruz, Veracruz.

a) TSS, maximos y minimos, 21 de abril del 2019; b) TSS, maximos y minimos, 23 de abril del 2020;
c) TSS, maximos y minimos, 08 de junio del 2019; d) TSS, maximos y minimos, 10 de junio del 2020.

Gracias a las imágenes y datos directos del ArcGis, podemos observar el comportamiento térmico de la ciudad en los días analizados. Del lado del Pacífico, en Vallarta se presenta una disminución en los máximos de temperatura de 6 a 4 °C; sin embargo, en Colima la baja se presenta en las TMínimas solo en el 28 de mayo con 25 °C.

Del lado del Golfo de México, en Tampico y Ciudad Madero la TMáximas en el 2020 descienden de 14 a 18 °C, al igual que las TMínimas de 5 a 4 °C menos. Veracruz y Boca del Río no hay disminución en abril probablemente porque la cuarentana todavía no estaba activa; en comparación a junio, donde las TMáximas y TMinimas registran descenso en ambas de 7 °C.

Siguiendo la metodología y bajando los datos completos del programa la figuras 6 muestra el comportamiento de la Temperatura de acuerdo con el área de ocupación, siendo las líneas punteadas las correspondientes a los meses del año 2020.

Al igual que las imágenes, el corrimiento de las temperaturas a números menores corrobora como la movilidad y actividad diaria se manifiesta directamente con la Temperatura Superficial del Suelo (TSS), sin embargo, las curvas de distribución si varían entre ellas.

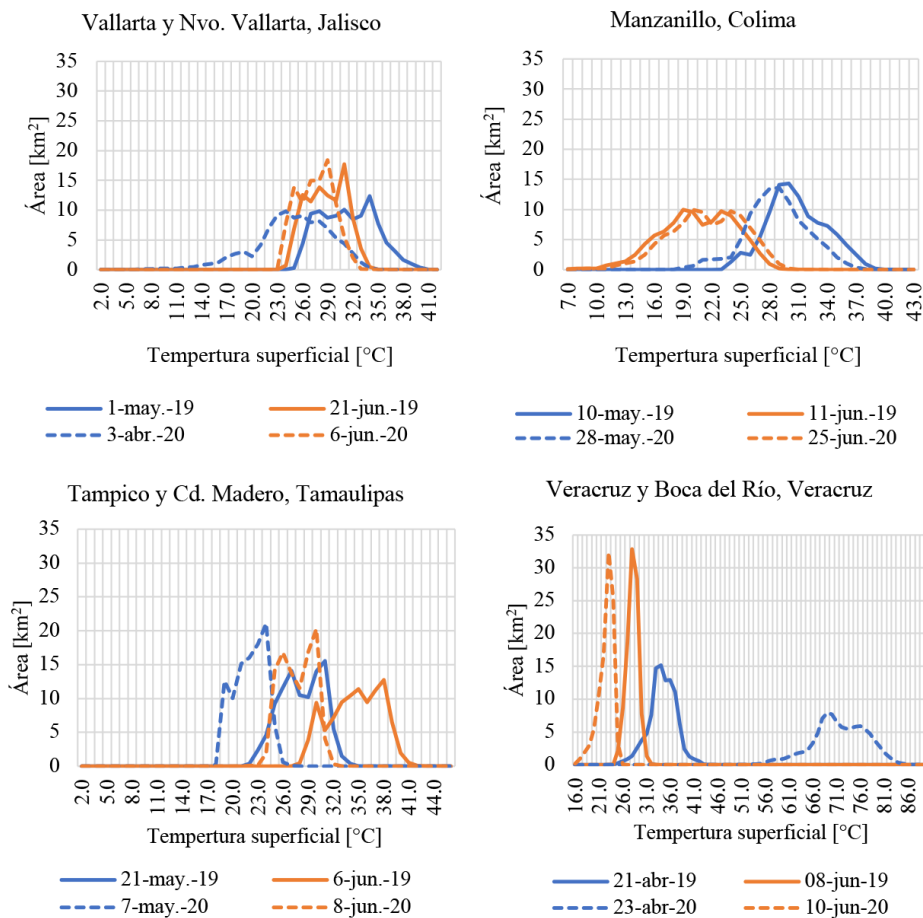


Figura 6. Grafica del comportamiento de temperaturas superficiales en las ciudades, correlacionando la temperatura con la extensión que esta abarca en la zona.

Por ejemplo, en Vallarta y Tamaulipas, la curva es más angosta por lo que los rangos de temperatura son más constantes dentro de la ciudad; Manzanillo y Veracruz disminuye, pero las curvas son parecidas, es decir la curva del mes de junio del 2020 es de 16 a 26 °C (10 °C) y en junio del 2019 de 21 a 31 °C (10 °C). Un que hubo un cambio significativo en las temperaturas, el comportamiento en la forma de las curvas, proyectadas en las gráficas, se mantienen con una forma parecida, pero de menor rango en cada ciudad.

4. Conclusiones

Con el análisis demostrado en este trabajo, y debido a la situación actual de confinamiento por la contingencia sanitaria del COVID-19, se puede observar que existe diferencia en las temperaturas superficiales entre los meses mayo y junio del 2019 y del 2020 de las cuatro ciudades puerto, las cuales oscilan entre los 10 y 20°C en sus superficies.

Se observa que las actividades escolares y laborales que generan movilidad, al ser detenidas por un lapso de meses genera una reducción en la temperatura superficial. Analizando los datos, se muestra que los valores de los rangos en los periodos de cuarentena son menores; corroborando que la movilidad, tiene un gran impacto en el entorno pues las máximas temperaturas de las ICUS dentro de las ciudades solo se observan en las áreas industriales.

Si bien, el crecimiento urbano es un hecho el cual no puede evitarse y con ello, habrá más demanda del espacio, del uso de transporte por las actividades laborales y educativas diarias, el aumentando la temperatura será inevitable; sin embargo, al buscar mejores alternativas para la movilidad urbana y control del tránsito vehicular, la temperatura atmosférica puede ser controlada en algunos puntos estratégicos de la planeación urbana.

El lograr entender cómo se comporta la temperatura superficial del suelo en relación con los fenómenos naturales climatológicos y los provocados por el hombre, antropogénicos; permite crear un acervo cultural general y universal, para la creación de políticas desde todos los ámbitos gubernamentales o privados. Al comprender qué es la movilidad no solamente está ligada a problemas de inadecuada gestión del tráfico, inaccesibilidad, exclusión social, y efectos económicos, sino también a las afectaciones ambientales, problemas de contaminación en el aire, contaminación de ruido, deterioro del paisaje urbano y ahora, con los datos arrojados por el estudio se puede abordar que genera un discomfort térmico que no solo repercute en la eficiencia energética de los edificios y del espacio urbano en general, sino sobre todo en la sensación que viven los peatones a la hora de su movilización o realizar actividades al aire libre.

Es por tanto que las políticas de movilidad deben ser analizadas desde diferentes perspectivas no sólo como una necesidad del hombre sino con su vinculación al medio natural, con esto se reafirma que porque uno de los puntos fuertes de la agenda ONU hábitat 2030 es la movilidad.

El trabajo busca apoyar como fundamentación en la justificación de nuevos planteamientos en el diseño de rutas en la movilidad urbana, como una herramienta de detección en los comportamientos térmicos de las ciudades y apoyo en el análisis y ordenamiento de los usos de suelo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen por todo el apoyo a CONACYT; PROMEP/PRODEP de SEP; Coordinación de la Investigación Científica, Facultad de Ingeniería Civil, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura (PIDA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Facultad de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Región Veracruz.

6. Referencias

- Barradas, V. (2016). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *UNAM, Oikos Publicación del Instituto de Ecología*, 1-4.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands, Understanding and mitigating heat in urban areas*. New York: Earthscan from Routledge.
- Grajeda, R., Alonso, E., Esparza, E., Martínez, W., Chavez, H., & Limón, E. (2020). Mapping the LST (Land Surface Temperature) with Satellite Information and Software ArcGis. *In Materials Science and Engineering Conference Series*, 811(1), 012045. doi: 10.1088/1757-899X/811/1/012045
- Kolbe, K. (2019). Mitigating urban heat island effect and carbon dioxide emissions through different mobility concepts: Comparison of conventional vehicles with electric vehicles, hydrogen vehicles and public transportation. *Transport Policy*, 80, 1-11. doi:10.1016/j.tranpol.2019.05.007
- Moreno García, M. (1997). Una propuesta de terminología castellana en climatología urbana. *Investigaciones geográficas*, 17(1997), 89-97. doi:10.14198/INGEO1997.17.08
- Quintero-González, J.-R. (2017). Del concepto de ingeniería de tránsito al de movilidad urbana sostenible. *Ambiente Y Desarrollo*, 21(40), 57-72. doi:10.11144/Javeriana.ayd21-40.citm
- SCT. (2020). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Obtenido de Sistema Portuario Nacional: <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- Serricola, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes terra-MODIS y análisis de componentes principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123-141. doi:10.4067/S0718-34022014000100009
- Voogt, J., & Oke, T. (2002). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche





UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CONTROL DE CALIDAD

El comportamiento térmico de ciudades costeras mexicanas del Pacífico en relación con sus Áreas Verdes

A. Ramírez-Romero¹, A. García-Ruíz², J. Velázquez-Pérez³,
M. Mondragón-Olán¹, W. Martínez-Molina³

¹ Programa Arquitectura FICH, Universidad Veracruzana

² Programa Topografía-Geodesta FICH, Universidad Veracruzana,

³ FIC, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Autor de Contacto: judith.velazquez@umich.mx

Resumen

El objetivo de la investigación es ahondar en el tema de la vegetación y su importancia en el comportamiento térmico de las superficies de los suelos urbanos. Correlacionando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con la Temperatura Superficial del Suelo (TSS), gracias al procesamiento de imágenes con el ArcGis y la información ofrecida por satélites con acceso libre, se logra analizar cuál es la ponderación de las zonas verdes dentro de las dos ciudades puerto y turísticas analizadas. Observaciones generales y particulares son ofrecidas, sobre como la combinación del NDVI y la TSS varían de acuerdo con los usos de suelo y su ubicación.

Palabras clave: NDVI, Teledetección, Temperatura Superficial del Suelo

Abstract

The objective of the research is to delve into the topic of vegetation and its importance in the thermal behavior of urban soil surfaces. Correlated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the Soil Surface Temperature (TSS), thanks to the processing of images with ArcGis and the information offered by free access satellites, it is possible to analyze the weighting of the green areas within the two port and tourist cities analyzed. General and particular observations are offered, on how the combination of the NDVI and the TSS vary according to the land uses and their location.

Keywords: NDVI, Remote Sensing, Soil Surface Temperature

1. Introducción

Las áreas verdes representan un importante papel en el mejoramiento de la calidad del ambiente urbano, debido a que dichas áreas al interior de las ciudades pueden proveer varios beneficios ecológicos destacándose el aminoramiento de la intensidad de algunas isotermas que componen el fenómeno de las Islas de Calor Urbana (Mena *et. al.*, 2011; Neinavaz *et. al.*, 2020,).

La vegetación es la señal principal del estado de un ecosistema por su papel fundamental en los ciclos del agua y del carbono y por la información que provee para la comprensión del cambio climático, podemos decir que la cubierta vegetal es un indicador natural de la salud ambiental y la tendencia climática, y la actividad fotosintética permite detectar esas variaciones, sin embargo algunos autores reportan que su evaluación a escala regional es complicada por el exceso de multivariantes (Vázquez y Adema, 2013; Wen *et. al.*, 2017).

La evapotranspiración de los sistemas suelo-vegetación es un factor efectivo de la modificación de las temperaturas superficiales, particularmente en las latitudes cálidas, secas y bajas. En las áreas urbanas, la evapotranspiración es modificada por las áreas verdes, y también por las superficies de pavimentos extensas e impermeables, debido a que el agua del suelo drena rápidamente y, a la larga, queda menos agua superficial disponible para la evapotranspiración, lo que afecta el equilibrio energético de la superficie urbana (Grimmond y Oke, 1991), teniendo más escorrentía que sus contrapartes rurales.

Los cambios en la vegetación son las principales causas de los cambios de temperatura de la superficie terrestre que están asociados con la densidad de vegetación, su salud, altura y densidad (Fathizad *et. al.*, 2017). La temperatura de la superficie terrestre (LST) sirve como red informática, para evaluar evapotranspiración, estrés hídrico de la vegetación y humedad del suelo (Karnieli *et. al.*, 2010).

Taha (1988) mediante modelos de simulación convino un dosel vegetativo con la ciudad Davis en California, lo cual dio como resultado bajas temperaturas diurnas y altas en la noche, llegando a la conclusión que el enfriamiento fue por la evaporación y el sombreado del suelo y el alza nocturna por la reducción del factor de vista del cielo. Afirmando que una cobertura vegetal del 30 % podría producir un oasis a mediodía de hasta 6 °C en condiciones favorables, y una isla de calor durante la noche de 2°C.

El uso de la teledetección es uno de los métodos indirectos aplicados para estimar la temperatura de la superficie terrestre. Los datos de teledetección tienen una gran capacidad para investigar cambios temporales y espaciales en la vegetación, uso de la tierra y estimación de la temperatura superficial de la tierra (Fathizad *et. al.*, 2017; Neinavaz *et. al.*, 2020).

La teledetección ha facilitado el estudio de la dinámica y distribución espacial de la vegetación a partir de un estimador del índice de área foliar y de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada, conocido como Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés, (Vázquez y Adema, 2013).

Basado en estudios de teledetección térmica y evapotranspiración, se ha puesto en marcha la utilización de este Índice en la planificación urbana.; índice que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. La Agenda 2030 (ONU, 2020) para el desarrollo sostenible aprobada en 2015 con la participación de 193 países (entre ellos México), ha planteado como un eje de acción la creación de áreas verdes, que promuevan una mejor calidad de vida a la ciudadanía y contrarresten los efectos emergentes del cambio climático, entre otros problemas, es importante su cuantificación y monitoreo en diferentes ciudades.

Por lo tanto, el presente trabajo busca identificar las áreas verdes de la ciudad de estudio y su comportamiento entre el año 2019 y 2020, por medio de imágenes LandSat y su procesamiento en ArcGis para deter-

minar cómo se relaciona con la temperatura superficial de la ciudad, logrando aportar algunas sugerencias para mejorar el confort térmico para los habitantes sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Wen *et. al.*, 2017).

2. Procedimiento experimental

2.1 Áreas de estudio

Las ciudades caso de este estudio fueron ciudades costeras cerca del Océano Pacífico: Puerto Vallarta, Jalisco y Manzanillo, Colima. La elección de las ciudades se basa en ser ciudades puerto importantes en México (SCT, 2020) y con actividad turística muy activa, y por lo tanto con características similares en uso de suelos y actividades en la población urbana. En la tabla 1 se muestran sus características geográficas.

2.2 Método de procesamiento

Se adquirieron los datos de Landsat-8, los números digitales del generador de imágenes terrestres operacionales (OLI) y las imágenes infrarrojas térmicas de Landsat-8 utilizando la información proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); mediante el procesamiento de imágenes en programas de tipo SIG se obtuvieron valores de radiancia, reflectancia, LST y finalmente el NDVI.

En este estudio se consideraron las bandas, 4,5,10 y 11 de Landsat-8, una vez realizado el procesamiento de imágenes, se obtuvieron mapas que, mediante operaciones en estos, se obtuvo LST para cada Ciudad costera, realizando un análisis cuantitativo y cualitativo de las temperaturas se llegó a gráficos que representan áreas de temperatura e índice de vegetación en porcentaje como los presentados en el apartado de resultados.

Se utilizó el método de índice de vegetación como NDVI, que se define como una relación entre el infrarrojo y el infrarrojo cercano, según ecuación (1).

$$NDVI = \frac{\text{Banda infrarroja cercana} - \text{Banda roja}}{\text{Banda infrarroja cercana} + \text{Banda roja}} \quad (1)$$

Los valores de NDVI fluctúan entre 1 y -1. Cuando la respuesta espectral medida de la superficie terrestre es muy similar en ambas bandas, los valores de NDVI están cerca de cero, esto se traduce en valores neutros o sin cambios significativos. La vegetación sana (que contiene actividad fotosintética) en el sector espectral de infrarrojo cercano tiene más reflexión que el sector espectral visible. Por lo tanto, los valores del NDVI serán positivos para la vegetación verde. Los valores de NDVI que suelen estar entre 0.1 y -0.1 representan a las áreas con poca o nula vegetación (Cesar Augusto *et. al.*, 2017; Fathizad *et. al.*, 2017; Karnieli *et. al.*, 2010; Vázquez and Adema, 2013).

Tabla 1. Ciudades analizadas.

Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud [m]	Clima	Población
Puerto Vallarta	20.653528 (20° 39' 12.7" N)	-105.243170 (105° 14' 35.41" W)	7	Cálido lluvias en verano	203,342
Manzanillo	19.059261 (19° 3' 33.34" N)	-104.303153 (104° 18' 11.35" W)	20	Cálido lluvias en verano	184,541

3. Resultados

Del 2019 al 2020, de acuerdo a las figuras 1 y 2, podemos observar que hay una disminución de temperatura superficial del suelo (TSS) en ambos casos de estudio (Vallarta y Manzanillo); sin embargo, la menor disminución (9°C) la presenta Manzanillo y los menores rangos de temperatura en Vallarta.

Antes de continuar, cabe mencionar que, según reportes del Centro Nacional del Agua, en su página de monitor de sequía en México, el 2020 presentó cerca de las zonas de estudio sequía moderada a extrema, en comparación del 2019 que durante el mismo periodo analizado los valores fueron de anormalmente seco a sequía moderada (Conagua, 2020).

En ambos casos los valores del índice NDVI, se encuentran entre 0.65 a -0.24, mostrando una gran variedad de coberturas: agua, suelo sin vegetación, vegetación alta y centros urbanos.

De la ciudad de Vallarta y sus alrededores, la mayor temperatura la obtiene la gran extensión desértica, llamada Sonoral, seguida por el aeropuerto y el centro de la ciudad; las menores temperaturas están ubicadas en las zonas turísticas de Vallarta, Nuevo Vallarta y su marina.

Con relación a Manzanillo, en la parte costera y por ser turística presenta un NDVI mayor a 0.50, por lo que las temperaturas son las menores en comparación a las zonas con NDVI <0.2, que comprende el área portuaria y urbanas cerca de zonas montañosas e industria minera.

A partir de los análisis realizados con el programa ArcGis, los resultados de TSS observados en las figuras 1 y 2 son consecuentes con el mapa presentado en la figura 3.

En la figura 3, se observa el contraste que existe en las Isotermas de Puerto Vallarta, siendo los pixeles de color amarillo-naranja la zona donde se encuentra la ciudad, conjuntos de zonas habitables, de servicios y actividades diversas de acuerdo a las necesidades de la población, entonces analizando el contraste de este mapa, la zona más marcada con bajas temperaturas es el bosque “Espinazo del diablo” donde también se aprecian niveles topográficos variados debido a zonas montañosas. De acuerdo al mapa de la figura mencionada anteriormente se muestra que la gama de colores rojo-naranja es el área donde se presentan los valores de temperatura más elevados, por lo que se determinó la ubicación y características del entorno donde se

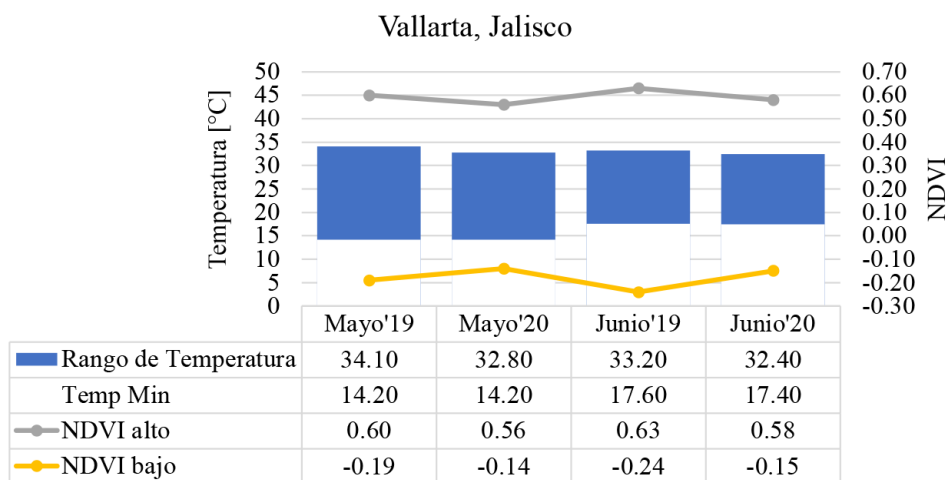


Figura 1. Datos comparativos de la Temperatura Superficial del Suelo y NDVI.

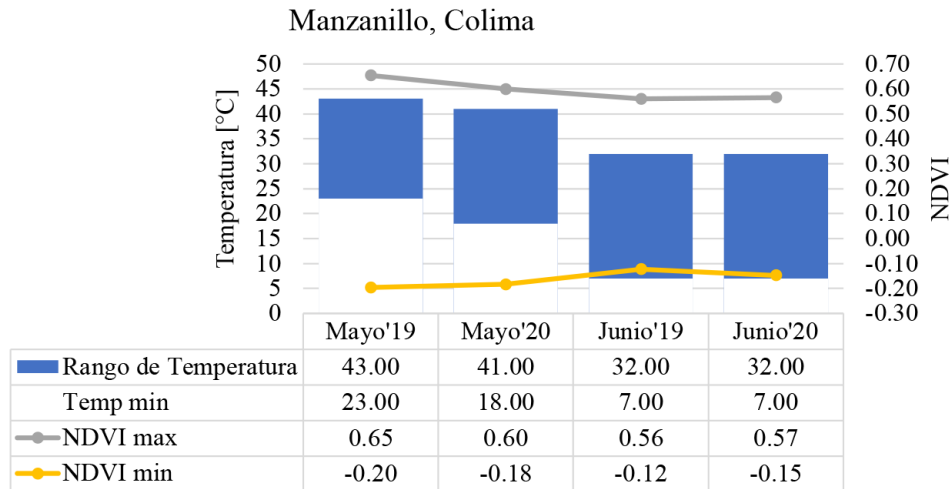


Figura 2. Datos comparativos de la Temperatura Superficial del Suelo y NDVI.

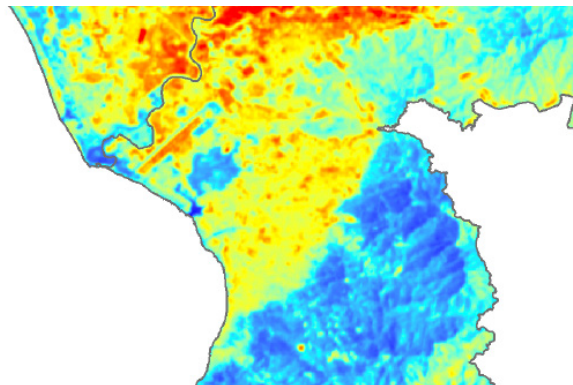


Figura 3. Resultados de la Temperatura Superficial del Suelo en Vallarta, Jalisco.

logró observar una amplia extensión de área desértica llamada Sonoral, aun cuando no se encuentran edificaciones, las altas temperaturas se detectan en ese sitio; cabe resaltar que a unos cuantos kilómetros se encuentra el aeropuerto que de la misma manera arroja temperaturas altas.

En la costa se ubica la zona turística y residencial donde las temperaturas se mantienen más bajas, en espacios pertenecientes al turismo ya que la vegetación es un elemento importante para la comodidad y estética del entorno. Para encontrar la explicación en la diferenciación de temperaturas, se utilizó Google Earth y Google Maps con la finalidad de obtener información visual del tipo de edificaciones que se encuentran en las distintas zonas.

En Puerto Vallarta Centro existe un área donde se concentra las temperaturas altas, esto está representado por los índices de color amarillo, analizando el entorno se encontraron algunas lotificaciones con un gran porcentaje de construcción pero con pocas o nulas áreas verdes, esto representa un indicador de que la man-

cha urbana es un generador de calor y de no ser intervenida o planeada con vegetación, el equilibrio entre comodidad y confort no se puede mantener siendo esto una causa de la presencia de Islas de calor urbano.

Analizando la figura 4 se observa que el calor se redujo de un año a otro, esto se puede atribuir a las actividades pausadas en cuestión de temas de contingencia, a excepción de la zona de Sonoral en la que se visualiza un aumento de temperatura, debido a la reducción de precipitación del 2020 (tabla 2).

Con base a los resultados obtenidos de la Temperatura Superficial del Suelo, se relacionó la información obtenida del análisis de Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) junto con reportes de precipitaciones y sequías del sitio oficial de CONAGUA, de dónde se obtuvo la tabla 2.

Con los resultados del NDVI indicados en la tabla 1 se observa una disminución en cuanto a los porcentajes de áreas verdes, determinando que en el 2019 hubo más vegetación en comparación del presente año 2020, se analizan las temperaturas y precipitaciones registradas donde se observa que en mayo 2020 las precipitaciones incrementaron en casi 3 veces el valor del año anterior; y en junio 2020 baja a 81.7 en comparación con el año 2019 presentando un valor de 96.3

A pesar de la diferencia sumando estos datos (2019, 102.3 precipitación – 2020, 97.7 precipitación) hubo una disminución que afecto a la vegetación de la zona y según las estadísticas de Conagua, se registraron datos de sequías exageradas o en el caso de Junio (2020) cercano a lo normal. En 2019 se observa en los meses de agosto-septiembre índices de humedad en la zona, y en los meses de abril-julio es común tener temporada de sequías con lo que se asocia las reducidas precipitaciones que se presentaron en esa época del año.

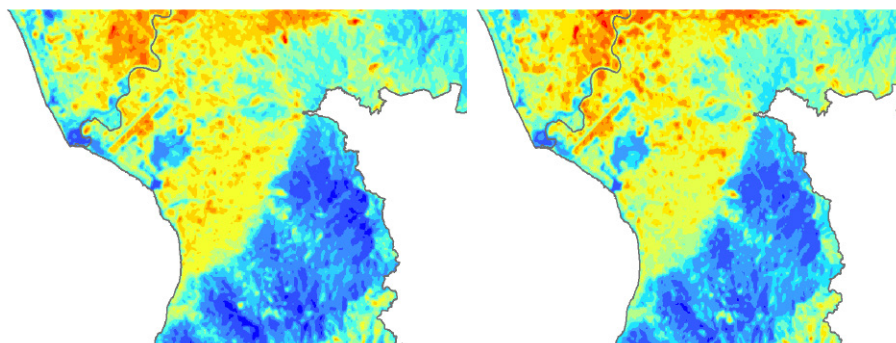


Figura 4. Comparativa de resultados del año del 2019 y año 2020 (de izquierda a derecha) de la Temperatura Superficial del Suelo en Vallarta, Jalisco.

Tabla 2. Comparativa NDVI 2019 y 2020 en Puerto Vallarta, Jalisco.

	2019		2020	
	Mayo	Junio	Mayo	Junio
Precipitaciones	6.0	96.3	16.0	81.7
Intensidad de sequía	Sequía moderada	Sequía moderada	Anormalmente seco	Anormalmente seco
Índice estandarizado de precipitaciones	Moderadamente seco	Moderadamente seco	Exageradamente seco	Cercano a lo normal

Los datos sobre precipitaciones que se han relacionado con el NDVI en este trabajo se tomaron del apartado de registros en la plataforma de Conagua, se considera que en el mes de mayo de ambos años los datos son similares. Tomando en cuenta la disminución de temperaturas máximas en el 2020 y que no hubo un cambio grande en las mínimas, lo importante para el estado de vegetación de una zona es tener las precipitaciones correspondientes para lograr mantener los índices de vegetación en un buen porcentaje.

En el caso de Puerto Vallarta, donde el contraste entre la zona urbana y la zona del “Espinazo del diablo” logra captar la gran diferencia de temperaturas y principalmente del NDVI. Con el paso del tiempo la importancia de la vegetación para lograr espacios más agradables ha aumentado y se observa desde el centro de la ciudad donde se comenzaron a construir las primeras edificaciones, dándole prioridad a estas y dejando aún lado las zonas verdes.

Las temperaturas van aumentando y se logra visualizar en las imágenes que conforme va aumentando la densidad urbana el calor se concentra hacia las edificaciones, estos resultados también varían dependiendo la utilización de suelo o de actividad que se encuentre en la zona, pues en Puerto Vallarta, se concentra mayor calor en la zona del aeropuerto y también en el área desértica del Sonoral. Con la obtención de los datos meteorológicos y del TSS, se relaciona el comportamiento que arrojan los resultados con el programa Arc-Gis, siendo de gran importancia las precipitaciones en conjunto con la vegetación ya que son los elementos que ayudan a tener un mayor control en el cambio de temperaturas. En ciertas épocas del año tales como abril-junio, la precipitación no es relevante en comparación de los meses siguientes como julio-octubre, por



Figura 5. NDVI de mayo y junio 2019 Vallarta, Jalisco.



Figura 6. NDVI de mayo y junio 2020 Vallarta, Jalisco.

ello se encuentran valores de “Sequía moderada- Anormalmente seco” en el Monitor de Sequía de México del sitio oficial de CONAGUA. Cabe mencionar que del año 2019 a 2020 hubo una mayor concentración de precipitación siendo el 2020 más del doble y según en monitoreo en cuanto a las referencias meteorológicas se consideró un mes anormalmente seco, donde el 2019 se observó ser moderadamente seco.

A continuación, la figura 7, presenta los resultados obtenidos después de haber analizado las imágenes satelitales para el puerto de Manzanillo, cabe mencionar que Manzanillo es un puerto de altura o gran calado, el cual presenta una gran movilidad de carga contener izada, mineral, a granel entre otras.

En la figura 7 se puede observar que Manzanillo, Colima es un lugar de temperaturas elevadas, esto puede atribuirse a varias cosas, la movilidad de carga mencionada con anterioridad y el turismo. Las zonas de color Amarillo-Rojo que se encuentran en el mapa representan las altas temperaturas, cercano a la costa también existe una zona de minería que provoca que la temperatura superficial aumente, dicho incremento es explicado por la estación del año en que fue capturada la imagen y porque este tipo de usos de suelo ocasiona aridez que se convierte en flujo de calor.

En la figura 8, se muestran las imágenes térmicas de Manzanillo en mayo 2019 y 2020 teniendo variaciones entre ellas de 30 a 40°C siendo la menor correspondiente al año 2020.

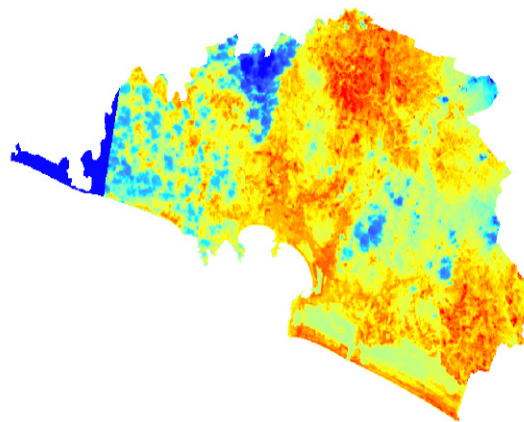


Figura 7. Resultados de la Temperatura Superficial del Suelo en del programa ArcGIS.

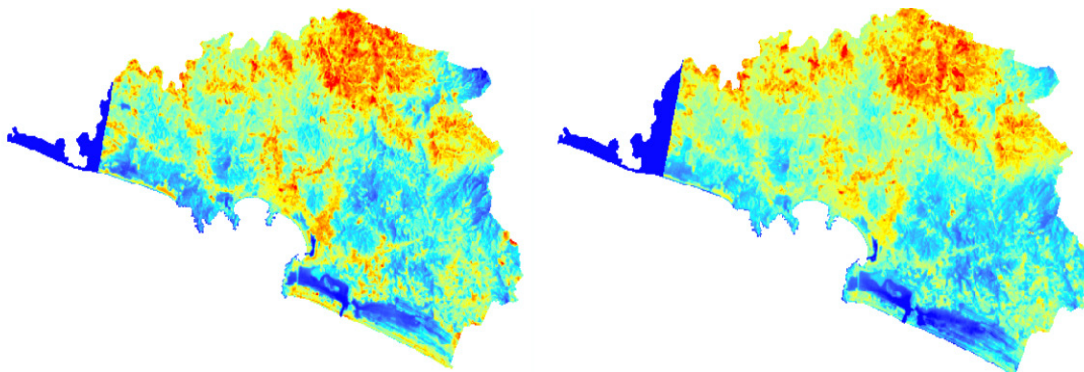


Figura 8. Imagen térmica de Manzanillo, Colima de mayo 2019 y 2020 (de izquierda a derecha).

Parte de la zona costera es turística y hotelera, la cual puede tener una temperatura menor, a pesar de que este influenciada por la zona minera que se encuentra a unos kilómetros de esta.

El puerto de Manzanillo está ubicado entre una zona montañosa, la cual tiene vegetación, lo que ayuda a que las imágenes satelitales nos den índices altos de vegetación y que en la parte céntrica de Manzanillo las temperaturas sean elevadas.

En las imágenes presentadas en la figura 8 con sus respectivas líneas isotérmicas, muestra que la variación es entre 2 a 6 °C, porque en el 2019 en la zona costera la actividad antropogénica estaba en sus parámetros normales, y en el 2020 por la contingencia debida al COVID-19, la movilidad disminuyo debido a las medidas establecidas de sanidad, dando como resultado que disminuya la temperatura, siendo muy significativo para esa zona ya que siempre presenta en todo el año temperaturas más elevadas que sus alrededores.

En la parte superior de figura 8, se aprecian puntos o isotermas color rojo, color indicativo de mayor intensidad térmica, vale la pena mencionar que esta zona es donde está la zona de ganadería, en el año 2019, la poca presencia de lluvias en comparación a años pasados, la convierte en una zona árida donde el NDVI disminuye a un valor menor de 0.2, afectando seriamente la calidad de la vegetación y por lo tanto modificando la TSS.

De los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes como el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y reportes de precipitaciones y sequías del sitio oficial de CONAGUA, se obtiene la tabla 3.

El reporte del NDVI es un conjunto de variables que dan a conocer cómo es que se encuentra la vegetación mediante los valores de índice de vegetación enfocándonos en Manzanillo, Colima, se analizan las fechas de:

- 10 de mayo del 2019 (Figura 9a).
- 11 de junio del 2019 (Figura 9b).
- 28 de mayo del 2020 (Figura 9c).
- 29 de junio del 2020 (Figura 9d).

Se podrá notar que el NDVI marca que los índices de la vegetación de Manzanillo disminuyeron del 2019 al 2020 indicando disminución en la calidad y distribución en la vegetación. Durante el 2020, factores como cambios de uso de suelo, escasez de lluvias, actividades industriales y una mayor urbanización debido al incremento poblacional han generado que los cultivos no sean de buena calidad, alterando el NDVI.

En cada figura 9a, b, c y d, se aprecia una mancha de color morado, indicando la zona minera y concuerda con las temperaturas altas de la zona.

Tabla 3. Rango de temperatura y NDVI de Manzanillo, Colima.

Datos	Mayo 2019	Mayo 2020	Junio 2019	Junio 2020
Temp máx	33.8	19.7	33.2	19.3
Temp med	27.7	26.3	26.6	28.3
Temp min	35.2	23.5	33.9	22.7
NDVI max	0.654254	0.599747	0.560314	0.611947
NDVI min	-0.196753	-0.1	-0.1	-0.1
Lluvias	3.5	2.1	111.2	84.7

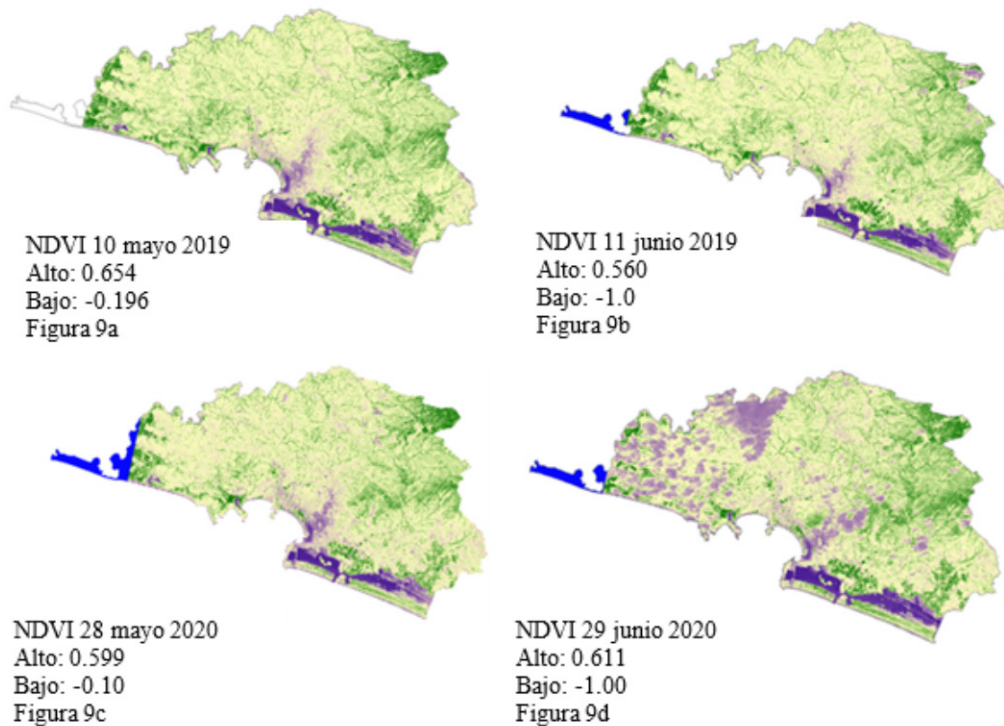


Figura 9: NDVI en Manzanillo, correspondientes a los meses de mayo y junio del año 2019 y 2020, resultados obtenidos por el ArcGIS

4. Conclusiones

La diferencia de vegetación y calor superficial son claras en ambos casos y periodos de análisis; la reducción de TSS es mayor en las áreas urbanas donde se presenta un alto índice de NDVI (>0.55) y la zona con mayor alza de temperatura se presenta en las áreas desérticas debido a las intensas sequías afectando a las zonas aledañas.

En el caso del Puerto de Manzanillo, se podrán apreciar algunas rachas más altas del NDVI, debido a que esa zona tiene buenos índices de vegetación, sin embargo, en cuestión de la temperatura es un poco elevada, debido a que hay zonas muy industrializadas como es el caso de la minería, debido a que la temperatura del suelo es un poco más elevada de lo normal recordando y atribuyendo a que las superficies de rodamiento debido en algunos casos al color son las que absorben una mayor cantidad de luz y con esto se incrementa la temperatura superficial además de que estas actividades industriales como la minería tienen sitios donde se disponen los jales donde estos absorben una gran cantidad de calor incrementando los índices de temperatura.

En el puerto de Manzanillo, se detectaron en el año 2019 menos precipitaciones, esto impacta directamente en los resultados, de acuerdo a los últimos datos de contaminación y cambio climático también se puede atribuir a la influencia del cambio climático las sequias extremas y atípicas en las diversas épocas del año sin embargo sabemos que si se contribuye a una mejora en la planeación urbana y se tiene cuidado de realizar un adecuado diseño de áreas verdes y respeto a la naturaleza podremos esperar que las precipitaciones sean

adecuadas para conservar índices de vegetación adecuados y con esto la disminución en la presencia de Islas de calor urbano, que se verá representado en un mejor confort térmico a sus habitantes y puede brindar un monitoreo periódico de la climatología urbana.

El agua forma un factor importante en el mantenimiento de estas áreas verdes, las cuales aun cuando se planeen integrarlas al entorno, es necesario que siga habiendo precipitaciones elevadas y seguir conservando esta característica que es importante para la comodidad en el entorno del ser humano, tomando en cuenta que se tomaron pruebas de ciudades turísticas y costeras, pues dependiendo la actividad principal del área, se deberá intervenir de manera adecuada. Actualmente, en las nuevas zonas de algunas de las ciudades costeras debido a los intereses turísticos la planificación urbana considera la vegetación como característica importante y, sobre todo, elemento indispensable para áreas de actividad residencial y turística.

Es importante mencionar que este trabajo forma únicamente una pequeña parte de una investigación mucho más amplia que está en proceso, debido a esto es que los datos aquí proporcionados son de un par de meses.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen por todo el apoyo a CONACYT; PROMEP/PRODEP de SEP; Facultad de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Región Veracruz, Coordinación de la Investigación Científica, Facultad de Ingeniería Civil, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura (PIDA) y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

6. Referencias

- Cesar Augusto, S., Martínez-Rincon, R., & Morales-Zarate, M. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. . *Investigaciones Geográficas*, 2017(94), 82-90. doi:10.14350/ig.57214
- Conagua. (2020). *Centro Nacional del Agua*. Obtenido de Monitor de Sequía en México: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Fathizad, H., Tazeh, M., Kalantari, S., & Shojaei, S. (2017). The investigation of spatiotemporal variations of land surface temperature based on land use changes using NDVI in southwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 249–256. doi:10.1016/j.jafrearsci.2017.06.007
- Grimmond, C., & Oke, T. (1991). An evaporation-interception model for urban areas. *Water resources*, 27, 1739. doi:10.1029/91WR00557
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R., Anderson, M., Imhoff, M., Gutman, G., & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. . *Journal of Climate*, 23(3), 618–633.
- Mena, C., Ormazábal, Y., Morales, Y., Santelices, R., & Gajardo, J. (2011). Índices de área verde y cobertura vegetal para la ciudad de parral (Chile), mediante fotointerpretación y sig. . *Ciencia Florestal*, 21(3), 517-527. doi:10.5902/198050983
- Neinavaz, E., Skidmore, A., & Darvishzadeh, R. (2020). Effects of prediction accuracy of the proportion of vegetation cover on land surface emissivity and temperature using the NDVI threshold method. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 85, 101948. doi:10.1016/j.jag.2019.101984

• IX Congreso Nacional ALCONPAT

26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

- ONU. (2020). *Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Obtenido de Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles : <https://www.un.org/sustainabledevelopment>
- Rani, M., Kumar, P., Chandra, P., Srivastava, P., Chaudhary, B., Tomar, V., & Prasad, V. (2018). Multi-temporal NDVI and surface temperature analysis for Urban Heat Island inbuilt surrounding of sub-humid region: A case study of two geographical regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 163-172. doi:10.1016/j.rsase.2018.03.007
- SCT. (2020). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes* . Obtenido de Sistema Portuario Nacional: <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- Taha, H. (1988). *Site-specific heat island simulations: Model development and application to microclimate conditions*. Reporte 26105, Thesis. University of California, Berkeley. doi:10.1016/S0378-7788(96)00999-1
- Vázquez, P., & Adema, E. (2013). Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. (*Rouse 1974*).
- Wen, Z., Wu, S., Chen, J., & Lü, M. (2017). NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Science of the Total Environment*, 574, 947-959.



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del Enigma sin Albas a Triángulos de Luz"



CONTROL DE CALIDAD

Diseño, construcción y validación de una cámara de carbonatación acelerada

T. Pérez-López², J. A. Paat-Estrella^{1, 4}, D. Nieves-Mendoza³,
E. Maldonado-Bandala³, T. C. Torrez-Pérez⁴

¹ Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana

² Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche

³ Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana

⁴ Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche

Autor de Contacto: Al056032@uacam.mx

Resumen

Se diseñó, construyó y validó una cámara de carbonatación acelerada. Durante estos ensayos se monitoreó la distribución homogénea del CO₂ dentro de la cámara de carbonatación, manteniéndose una concentración deseada de dióxido de carbono (CO₂) del 4% +/- 0.5% y de humedad relativa (60±5%). Los especímenes expuestos fueron 66 probetas de concreto de 15 x 30 cm concreto con una relación de a/c de 0.6. Estas fueron distribuidas dejando una separación de 5 cm tanto vertical como horizontalmente, con la finalidad de que el gas se distribuyera uniformemente. Se determinó el avance de la carbonatación mediante el método de vía húmeda con los indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína. Los resultados reportaron una carbonatación (proceso de degradación química) homogénea en los especímenes expuestos dentro de la cámara de carbonatación acelerada, con lo que se logró que el pH fuera disminuyendo hasta alcanzar valores alrededor de 9 upH.

Palabras clave: Carbonatación, corrosión, concentración.

Abstract

An accelerated carbonation chamber was designed, built and validated. During these tests, the homogeneous distribution of CO₂ within the carbonation chamber was monitored, maintaining a desired concentration of carbon dioxide (CO₂) of 4% +/- 0.5% and relative humidity (60 + 5%). The exposed specimens were 66 concrete specimens of 15 x 30 cm concrete with an a / c ratio of 0.6. These were distributed leaving a separation of 5 cm both vertically and horizontally, in order for the gas to be distributed evenly. The advance of carbonation was determined by the wet method with the acid-base indicators, thymolphthalein and phenolphthalein. The results reported a homogeneous carbonation (chemical degradation process) in the exposed specimens within the accelerated carbonation chamber, which allowed the pH to decrease until reaching values around 9 upH.

Keywords: Carbonation, corrosion, concentration.

1. Introducción

El acero en estructuras de concreto es protegido del ambiente atmosférico debido a la alcalinidad de la solución del poro ($\text{pH} > 12.5$). Sin embargo, el acero puede corroerse si la protección se pierde. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros —en ambientes marinos— o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación (Moreno *et al.*, 2004).

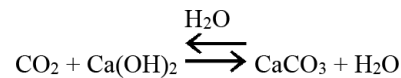
La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral (Montani, 2000).

La principal consecuencia de la carbonatación es la caída abrupta del pH alcalino de la solución-poro del concreto que disminuye desde un valor promedio de 12.5 hasta un valor cercano a 8.3 en zonas completamente carbonatadas, aunque se sabe que este fenómeno tiene varias etapas con valores de pH entre 11.3 y 9.5 (Campos-Silva *et al.*, 2016).

La porosidad del concreto reforzado es un parámetro fundamental en la carbonatación, puesto que la red de poros conectados con el exterior constituye el camino de avance del CO_2 . Según pruebas realizadas se ha demostrado que la profundidad de carbonatación varía de acuerdo con el tipo de mezcla (Chávez-Ulloa *et al.*, 2010). Una vez que el pH ha disminuido, el ambiente que rodea al acero de refuerzo pierde sus propiedades protectoras (capa de óxido pasivo), y se desencadena la corrosión del acero (Benavides, 2014).

El contenido de CO_2 en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar. Existen grandes diferencias de una zona urbana a una zona rural, siendo mayores las concentraciones en la primera. No obstante, para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña concentración de CO_2 , que normalmente se encuentra en la atmósfera en una concentración promedio de 0.03 % en volumen (300 ppm) (Montani, 2000).

Inicialmente el CO_2 no es capaz de penetrar profundamente dentro del concreto, debido a que reacciona con el calce del concreto superficial de acuerdo con la siguiente reacción:



dando como resultado un cambio en el pH:

$\text{pH} = 12.5 \text{ a } 13.5 \rightarrow \text{pH} \cong 9$

Aunque la porción de mezcla externa del concreto se carbonata rápidamente, el CO_2 continúa su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo es cercano a 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, dando paso a la corrosión del acero (figura 1) (Moreno, 1999).

2. Procedimiento

La cantidad de vigas se determinó con base al tiempo que durará el estudio. Para el diseño de mezcla, se eligió el diseño establecido de la ACI (American Concrete Institute) 211.1. Las probetas se elaboraron con una relación a/c de 0.6, con la finalidad de obtener productos de alta porosidad, siendo ésta un factor de control importante que influye en la difusión de los iones y el CO_2 , lo que permitió lograr una carbonatación más rápida en menor tiempo (Nordic Innovation Centre, 2005), como se muestra en la tabla 1.

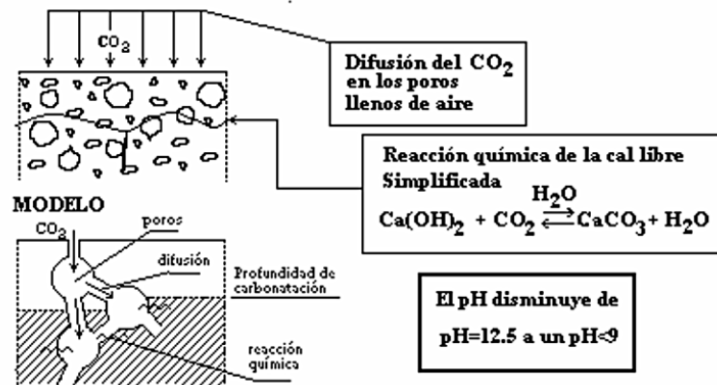


Figura 1. Esquema del proceso de carbonatación (Moreno, 1999).

Tabla 1. Pesos por metro cúbico de mezcla de concreto.

Materiales	(Kg)	Kg/m ³	Kg/m ³	Cantidad utilizada (Kg)
Agua	205	17.01	6.68	115.82
Cemento	341.67	27.67	10.86	188.43
Agregado grueso	906.88	73.46	28.84	500.15
Agregado fino	927.49	75.13	29.49	511.51

2.1 Diseño y preparación de probetas

Se elaboraron 66 probetas de concreto de 15 cm por 30 cm con acero de refuerzo de 3/8" y 18 sin acero como se muestra en la figura 2, utilizando cemento portland Maya, grava (de tipo calcáreo) como agregado grueso y arena como agregado fino, todos materiales característicos de la región.

En esta primera etapa se cortaron las varillas con una longitud de 50 cm y posteriormente se limpiaron y cubrieron con cinta aislante 17.5 cm de cada extremo, dejando un área central de trabajo de 15 cm² aproximadamente, como se muestra en la figura 2.

2.1.1 Materiales utilizados

Los materiales que se utilizaron para la fabricación de los especímenes de concreto cumplieron con la normatividad vigente, los cuales se describen a continuación.

Agregados Pétreos. Los agregados fueron seleccionados bajo cumplimiento de la NMX-C-111-ONNCCE-2018. El agregado fino que se utilizó fue arena, el agregado grueso fue piedra triturada con tamaño máximo de 19 mm. Los materiales que se utilizaron son materiales característicos de la región del sureste del país, de los cuales se obtuvieron las propiedades que se presentan en la tabla 2.

Posteriormente, se realizó el cálculo de los pesos de los materiales por metro cúbico de concreto, obteniendo los pesos que se muestran en la tabla 3.

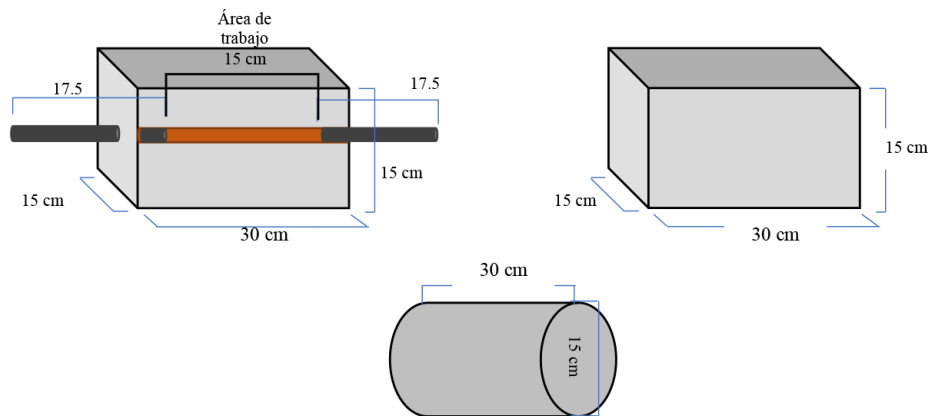


Figura 2. Características de las vigas elaboradas, (a) Con varilla de 50 cm, con 15 cm² descubiertos como área de trabajo; (b) Sin varilla; (c) Cilindro para pruebas de resistencia a la compresión.

Tabla 2. Características de los componentes utilizados en las mezclas.

Pruebas	Agregado grueso (Grava)	Agregado fino (Arena)	Cemento (Portland)
PVSS (Kg/cm ³)	1241	1335	1400
PVVS (Kg/cm ³)	1417	1514	
Densidad ó peso específico (gr/cm ³)	2.26	2.56	2.99
% Absorción	2.5	2.56	---
T.M.N.A. (mm)	12.5	2.5	---
% Humedad	---	---	---

Tabla 3. Pesos de los materiales por metro cúbico de mezcla de concreto.

Materiales	(Kg)	Kg/m ³	Kg/m ³	Cantidad Utilizada (Kg)
Agua	205	17.01	6.68	115.82
Cemento	341.67	27.67	10.86	188.43
Agregado grueso	906.88	73.46	28.84	500.15
Agregado fino	927.49	75.13	29.49	511.51

Cemento. El cemento utilizado para la fabricación de especímenes fue cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida (CPC 30R), con un peso específico de 3,150 kg/m³.

Agua. Este elemento importante fue tomado del sistema de agua potable de la Red de Abastecimiento del Centro de Investigación (CICORR) del campus 6 de la Universidad Autónoma de Campeche.

2.2 Degradación química del concreto (Carbonatación)

Se diseñó una cámara de carbonatación acelerada para carbonatar 78 probetas de concreto con una relación de a/c de 0.6, con la finalidad de obtener una carbonatación más rápida por ser un concreto más poroso, y con 50 cm de acero de refuerzo de 3/8" embebidos con 15 cm² de área de trabajo y 17.5 cm de cada extremo al exterior de las vigas.

El diseño y la construcción de la cámara de carbonatación acelerada puesta en marcha en el laboratorio de concreto del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, es un diseño único. Para llevar a cabo este diseño se utilizó material resistente a la corrosión, estableciendo los requerimientos de construcción al número y tamaño de las vigas de concreto reforzado.

Para acelerar el proceso de carbonatación en el concreto, se construyeron dos "cámaras de carbonatación acelerada (CCA)", Estas cámaras, se diseñaron con dimensiones de 2.26 m (CCA1), y 1.78 m (CCA2) de largo, ambas cámaras con 0.60 m de ancho y 0.90 m de alto, respectivamente, como se muestra en la Figura 3. Ambas fueron acondicionadas en unas gavetas con forma de prisma rectangular, elaborada de cemento en su mayor parte, cancelería de aluminio y acrílico, materiales que fueron sellados para evitar fugas. A cada cámara se le perforaron en la parte superior del acrílico tres orificios de 5 mm que se utilizaron como salidas de aire. Ambas cámaras fueron conectadas mediante tubería de PVC de 1/2" de diámetro, utilizando un cople tipo T para unir las y poder abastecerlas de CO₂ al mismo tiempo. Fueron provistas con un medidor de humedad relativa (HR), TER-150, marca STEREN, y un medidor de CO₂ marca TELAIRE 7001. Dentro de cada una de las cámaras, se conectaron dos ventiladores, uno en cada extremo, con la finalidad de lograr una mejor distribución del flujo de gas.

Las cámaras de carbonatación acelerada se estabilizaron a valores de humedad relativa entre 60% +5 % y entre 4% ± 0.5 % de concentración de CO₂, logrando un proceso de carbonatación estable aproximado de 8 horas al día. Para estabilizar la humedad relativa, se utilizó como adsorbente, aproximadamente 750 g (por cámara de carbonatación) de zeolita natural tipo *clinoptilolita*, activada en soluciones saturadas de NaOH a altas presiones, posteriormente secada en una estufa de secado durante 3 días a 105 °C. Esta zeolita activada y seca, se colocó en un tubo de PVC de 4", cortado a la mitad, en la parte superior de cada una de las cámaras, cubriendo la longitud total de cada una de ellas. Cada tercer día se cambiaba la zeolita húmeda por zeolita seca, con la finalidad de mantener estable la humedad relativa de las cámaras de carbonatación acelerada.

Para obtener la concentración deseada de CO₂ y de humedad relativa, se empleó un tanque comercial de 25 kg, controlando el volumen con un medidor de flujo como se muestra en la figura 3.

Las estructuras de concreto se acomodaron dentro de la cámara de tal forma, que estuvieron apoyados sobre cortes de PVC de 1/2 pulgada, uno en cada esquina, con la finalidad de facilitar el flujo del CO₂, cambiando la orientación semanalmente para que la difusión del gas en el concreto sea homogénea, además de que se evitó el contacto de las vigas entre sí, dejando un espacio entre ellas de 5 cm, de tal forma que el gas se distribuyera uniformemente por los cuatro lados de los especímenes.



Figura 3. Estabilización de las cámaras de carbonatación.

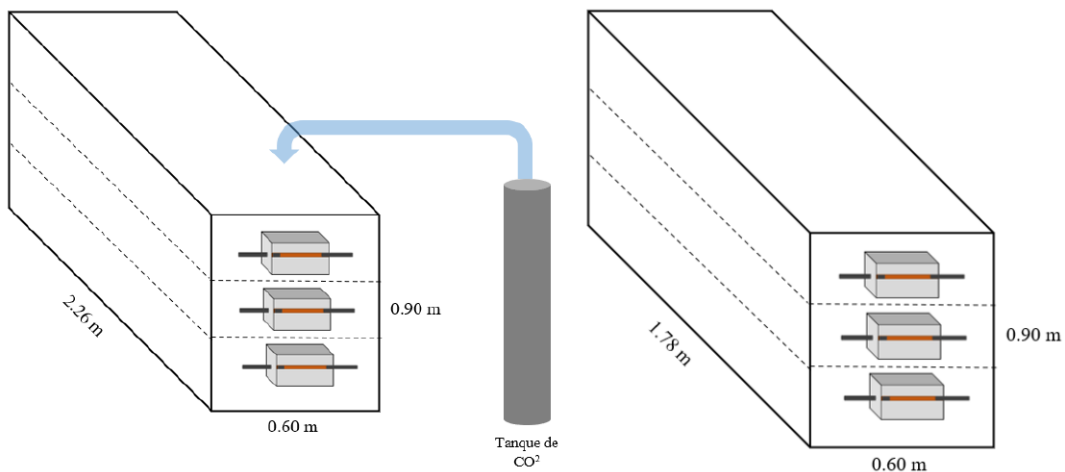


Figura 4. Dispositivo según las dimensiones (Cámara de carbonatación acelerada).

3. Resultados

Las muestras fueron expuestas en la cámara de carbonatación acelerada, hasta alcanzar una carbonatación completa. Para determinar el avance de la carbonatación en las estructuras de concreto se empleó el método de vía húmeda, utilizando disoluciones de indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína. Esta prueba se realizará en los especímenes con y sin acero de refuerzo, y serán colocados en el interior de la cámara de carbonatación acelerada y en medio natural. Posteriormente se sometieron a curado por inmersión con una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante 28 días. Para determinar el avance de la carbonatación en las estructuras de concreto se empleó el método de vía húmeda, utilizando disoluciones de indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína.

3.1 Determinación de la profundidad de carbonatación

El procedimiento consistió en realizar un corte transversal a la viga de aproximadamente 5 cm de espesor, después de realizado el corte, se retiró de la cara interna del corte todo el material o polvo que haya queda-

do suelto en la superficie del corte. Enseguida se le aplicó con un atomizador de forma uniforme a la cara interna del corte, el indicador ácido-base, no habiendo transcurrido un tiempo mayor de 15 minutos entre de corte y la aplicación. Posteriormente a las muestras se les realizaron tres mediciones de precisión en cada una de las partes que hayan permanecido incoloras con ayuda de un vernier o regla. Se llevó un registro fotográfico y de datos de cada muestra, para posteriormente obtener un valor promedio de cada lado y de cada muestra.

Se realizó una perforación con un taladro acoplado a una broca hueca, con la finalidad de obtener un cilindro y aplicar el método húmedo de indicadores, sin embargo, la longitud de la broca hueca fue menor a la longitud de carbonatación que presentaban las vigas, por lo que la prueba se continuó realizando un corte transversal a la viga, de aproximadamente 4 cm de espesor, una vez realizado el corte, se retiró de la cara interna todo el material que quedó suelto. Inmediato al corte y a la limpieza de la superficie, se le aplicó cada uno de los indicadores, fenolftaleína y timolftaleína de forma uniforme, utilizando un atomizador para una mejor distribución. Posterior a la aplicación de los indicadores, se midió cada uno de los lados carbonatados con un flexómetro, es decir, la parte superficial que no presentó coloración.



Figura 5. Corte transversal en vigas de concreto.



Figura 6. Limpieza del corte.



Figura 7. Aplicación de indicadores.

Este proceso de degradación química acelerada del concreto se llevó a cabo durante un periodo aproximado de seis meses, obteniendo un coeficiente de carbonatación (k), promedio de 8.98 mm/mes (tabla 4), lo que representa 5.3 cm de carbonatación durante los seis meses que duró el proceso.

Tabla 4. Características de los componentes utilizados en las mezclas.

mm/mes	mm/ 6 mes	mm/año
8.976	53.859	107.718



Figura 8. Extracción de cilindros y aplicación del método húmedo.



Figura 9. Resultados de la carbonatación, (a) primer corte; (b) segundo corte, (c) tercer corte, (d) cuarto corte.

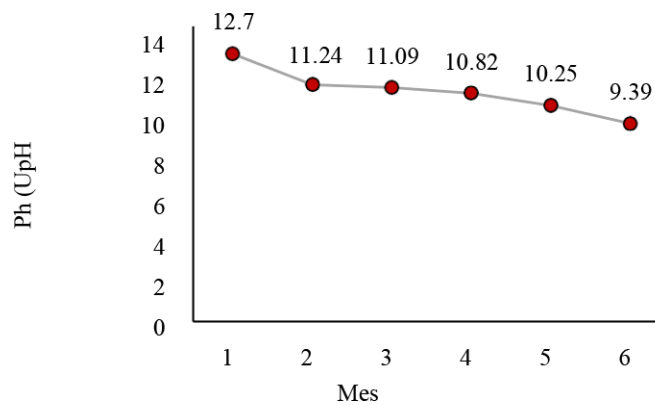


Figura 10. Valores de pH obtenidos durante el proceso de carbonatación.

4. Conclusiones

En conclusión, los resultados reportaron que a medida que la carbonatación avanzaba, la microestructura de la superficie hacia el interior del concreto cambiaba continuamente, lo que a su vez ocasionó que cambie su porosidad, por lo que al realizar la prueba por vía húmeda se observó un cambio representativo en las muestras colocadas al interior de la CCA en comparación con aquellas muestras que fueron expuestas al medio natural. La zeolita natural tipo clinoptilolita, saturada con NaCl, actuó como un excelente adsorbedor de humedad, logrando mantener la humedad relativa de ambas cámaras de carbonatación acelerada, considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Campeche, lugar donde se realizó el proyecto.

5. Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación en Corrosión por el apoyo brindado para la realización de este proyecto, UACAM, UV-Campus Xalapa, PRODEP, Fundación Pablo García.

6. Referencias

- Benavides, R. (2014). “Concreto de alto desempeño”. Tesis Magister en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería. Julio Garavito. Bogotá. Colombia. pp 31, 33.
- Campos-Silva, A., Fajardo, G., Mendoza-Rangel, J. (2016). “Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado”. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, Vol. 8 Núm. 1, de la pág. 14-34.
- Chávez-Ulloa, E., Pérez-López, T., Reyes-Trujeque, J., Corvo-Pérez, F. y Osorno-Carrillo, J. (2010). “Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada”. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 41, p. 04.
- Montani, R. (2000). “La carbonatación, enemigo olvidado del concreto”. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., *Revista Construcción y Tecnología, IMCYC*, diciembre, México. <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>
- Moreno, E., Domínguez-Lara, G., Cob-Sarabia, E. y Duarte-Gómez, F. (2004). “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración”. *Ingeniería 8-2* (2004) 117-130117.
- Moreno E. I., (1999), “Carbonatación de hormigones de cemento mezclados”. *Disertación Doctoral*, University of South Florida.

- **IX Congreso Nacional ALCONPAT**
26 a 28 de octubre de 2020, San Francisco de Campeche, Campeche

