



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



VI CONGRESO NACIONAL ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

Memorias del VI Congreso Alconpat 2014



"Educación de clase mundial,
un compromiso social"

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción
Delegación Nuevo León



Comité Directivo ALCONPAT

Sección México 2012- 2014

Presidente: Dr. Erick Edgar Maldonado Bandala
Presidente de Honor: Dr. José Castañeda Ávila
Vice Presidente: Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Secretario: Dr. Francisco Javier Olguin Coca



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Dr. Jesús Ancer Rodríguez
Rector

Ing. Rogelio G. Garza Rivera
Secretario General

Dr. Juan Manuel Alcocer González
Secretario de Extensión y Cultura

Dr. Celso José Garza Acuña
Director de Publicaciones

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

Dr. Ricardo González Alcorta
Subdirector de Estudios de Licenciatura

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Investigación

M.C. Mizaél Izaguirre González
Subdirector de Planeación y Desarrollo

M.C. Adrián Leonardo Ferriño Fierro
Subdirector de Vinculación

Ing. Rodolfo Meza
Subdirector Administrativo

COMITÉ DIRECTIVO

Dr. Pedro Castro Borges, *CINVESTAV-Unidad Mérida*

Dr. Andrés Torres Acosta, *Instituto Mexicano del Transporte*

Dr. Demetrio Nieves Mendoza, *Universidad Veracruzana*

Dr. Facundo Almeraya Calderón, *Universidad Autónoma de Nuevo León*

Dr. José Castañeda Avila, *CIMAV-Chihuahua*

Dr. Erick Maldonado Bandala, *Universidad Veracruzana*

Dr. Carlos Barrios Durstewitz, *Universidad Autónoma de Sinaloa*

COMITÉ ORGANIZADOR

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Presidente del Congreso

Lic. Erika Coronado Segovia

C.P. Claudia Yadira Marchant Barboza
Secretarías Ejecutivas

M.E.S. Ramón Longoria Ramírez
Asesor de Comunicación

COMITÉ DE IMAGEN INSTITUCIONAL

M.A. Ángel Ervey Martínez Rodríguez
Lic. Rosa Otilia Armendáriz Solís
Lic. Lucero Jazmín Limones Contreras
Diseño e imagen

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Ricardo Magallanes Rivera (*FIC-UANL*).
Dr. Oswaldo Burciaga Díaz (*FIC-UANL*).
Dr. Rodrigo González López (*FIC-UANL*).
Dr. José Manuel Mendoza Rangel (*FIC-UANL*).
Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado (*FIC-UANL*).
Dr. Alejandro Durán Herrera (*FIC-UANL*).
Dr. Roberto Pérez Martínez (*FIC-UANL*).
Dr. Román Hermosilo Mendoza (*FIC-UANL*).
Dr. René Alberto Dávila Porcel (*FIC-UANL*).
Dr. Facundo Almeraya Calderon (*FIME-UANL*).
Dra. Citlali Gaona Tiburcio (*FIME-UANL*).
Dr. Ricardo Orozco Cruz (*LI-UV*).
Dr. Carlos Barrios Durstewitz (*FI-UAS*).
Dr. Demetrio Nieves Mendoza (*UV*).
Dr. Erick Maldonado Bandala (*UV*).
Dr. Tezozomoc Pérez López (*CICORR-AUCAM*).
Dr. Iván Escalante García (*CINVESTAV-Unidad Saltillo*).

COMITÉ DE DISEÑO Y DESARROLLO DE PÁGINA WEB

Ing. David Garza Villareal
Lic. Amanda Selene Regalado
DESARROLLO DE APLICACIONES EN PÁGINA WEB
Mayra Silva Almanza
Rosa María Cavazos Cavazos
Briseyra M. Saldivar González
Ing. Graciela Cecilia Flores Reyes
Ing. Cosme Damián Cavazos Martínez
Dirección General de Informática

COMITÉ TÉCNICO

M.C. Joana Hetterine Campos Dimas
Verónica Isabel Pérez Uribe
Rosa Angélica López Hernández
Lic. Roberto Madrigales Ubaldo
Ing. Octavio Rivera Corral

Memorias del VI Congreso Nacional ALCONPAT México 2014



VI
CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

Editor: Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Con la colaboración de los Cuerpos Académicos de:
"Tecnología del Concreto"
"Materiales Alternativos en Ingeniería"
"Ingeniería Estructural"

Presentación



En nombre de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, de la Directiva sección México, tengo el honor de presentar a ustedes las memorias del VI Congreso Nacional ALCONPAT 2014.

Como ya es conocido, el Congreso ALCONPAT-México es uno de los eventos bianuales más importantes de la comunidad científica dedicada al estudio, investigación y práctica profesional del Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. El evento promueve un amplio intercambio técnico, científico y humano en la

búsqueda de un mayor perfeccionamiento profesional que beneficie el desarrollo de las comunidades a los que sus integrantes pertenezcan. Durante el Congreso se promueve la difusión y el conocimiento de los estudios, trabajos e investigaciones de los asistentes mediante ponencias plenarias y magistrales, mesas de discusión y exposición de trabajos de investigación de cada una de las disciplinas asociadas a las diferentes temáticas del congreso. Adicionalmente, se constituye en un foro en donde se fomentan los contactos personales y el intercambio de ideas y conocimientos, y con ello la mutua colaboración y el avance científico en el área de interés.

Personalmente quiero expresar mi más profundo agradecimiento para quienes han trabajado incansablemente para hacer de este evento una reunión agradable, y para las instituciones y empresas siguientes: Universidad Autónoma de Nuevo León, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (Delegación Nuevo León), Colegio de Ingenieros Civiles de Nuevo León, TGA Instruments, SATELSA, SAIDESA, XPERTO y PANALYTICAL; por su invaluable apoyo y que hicieron posible la realización de este magno evento.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
PRESIDENTE DEL CONGRESO

Prefacio

Invitamos a quienes consulten esta *MEMORIA DEL VI CONGRESO NACIONAL DE ALCO-PAT*, a que conserven este documento virtud que les ofrece la posibilidad de reconsiderar los contenidos de algunos de los temas tratados en las sesiones de esta memorable reunión.

Ojalá que este acervo de tecnología incremente no sólo el caudal de conocimiento, sino también el cariño y el respeto por estos productos de la investigación y la experiencia, íntimamente relacionados con las personas que los expusieron.

Al trascurrir el tiempo y aún después de que todo este contenido tenga cierta continuidad en el próximo VII CONGRESO, dentro de dos años, esta MEMORIA prestará utilidad no solo como testigo compendiable, de información técnica, sino también como un recuerdo de un tiempo aprovechando para la agradable camaradería y el intercambio de experiencias.

Al ir avanzando en la lectura de las siguientes páginas, se irán reconsiderando las afirmaciones, las dudas y aún las interrogantes cuya solución nos mantiene activos interesados permanentemente sobre temas como los materiales y la rehabilitación de las patologías más comunes en las construcciones, por causa de los fenómenos naturales o por las calamidades; todo dentro del acatamiento de la respectiva normatividad.

Sigan, pues adelante por entre estas páginas, consulten los datos que consideren necesarios y no disminuyan su comprensión y amabilidad hacia nosotros, los organizadores de esta VI REUNIÓN, que hemos puesto nuestro mejor empeño a su servicio.

GRACIAS Y ADELANTE

EL COMITÉ ORGANIZADOR



VI

CONGRESO NACIONAL

ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

T1.- MATERIALES Y NANOMATERIALES



COMPORTAMIENTO QUÍMICO DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS MEDIANTE DRX Y FTIR.

C. A. Rosas¹, S. P. Arredondo¹, J. M. Gómez², R. Corral¹, J. L. Almaral¹, M. J. Chinchillas¹, O. H. Acuña¹, A. J. Barreras¹, C. G. Morales¹, S. Apodaca¹, R. Orduño¹.

1. Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Ciudad Universitaria Fuente de Poseidón y prolongación Ángel Flores S/N Pte. Fracc. Las Fuentes. C.P. 81223. Los Mochis, Ahome, Sinaloa, México.
2. Universidad Politécnica de Cataluña, Ave. Dr. Marañón No. 44-50, C.P. 08028. Barcelona, España.

RESUMEN

El presente trabajo establece los comportamientos usuales de los materiales geopoliméricos, usando Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR). Los resultados obtenidos muestran que el geopolímero contiene estructura amorfa pero a su vez diferentes fases cristalinas, principalmente zeolitas, las cuales se relacionan directamente con el activador alcalino utilizado, además los enlaces químicos que aparecen en las bandas de FTIR corresponden a moléculas presentes en los compuestos cristalinos que se manifiestan en los resultados de DRX. Por otro lado se afirma que la ceniza volante fue correctamente activada, debido a la presencia del gel de aluminosilicato sódico hidratado (N-A-S-H) indicada en los espectros de FTIR.

Palabras Clave: cenizas volantes, geopolímero DRX, FTIR, NASH.

ABSTRACT

This work establishing the behavior of geopolymeric materials using X-ray diffraction (DRX) and Infrared Spectroscopy (FTIR). The results show that the geopolymer containing amorphous structure but turn different crystalline phases, mainly zeolites, which are directly related to the alkaline activator, also the chemical bonds that appear in the FTIR bands correspond to molecules present in the compounds crystalline manifested in the XRD results. Furthermore is stated that the fly ash was correctly activated due to the presence of sodium aluminosilicate gel (N-A-S-H) indicated in FTIR spectra.

Keywords: Fly ash, geopolymer, DRX, FTIR, N-A-S-H.

INTRODUCCIÓN

Los geopolímeros, son una nueva forma de aglutinante, utilizado en pastas, morteros y concretos compuestos, los cuales son producidos por la reacción de los aluminosilicatos con las soluciones alcalinas [1].

Los cementos alcalinos, como también son conocidos, se pueden sintetizar mediante la mezcla de ceniza volante (CV) y soluciones fuertemente alcalinas (tales como NaOH o KOH), luego curadas a temperaturas menores a 100 °C. La solución fuertemente alcalina, disuelve rápidamente a la CV para formar unidades tetraédricas de SiO₄ y AlO₄ libres. Con el desarrollo de la reacción, los geopolímeros se dividen en unidades tetraédricas de SiO₄ y AlO₄, los cuales están unidos alternativamente para producir tres tipos de productos geopolímeros: poli-sialato [-AlO₄- -SiO₄] (tipo PS), poli-sialato-siloxo [-SiO₄-AlO₄-SiO₄-] (tipo PSS), o poli-sialatedisiloxo [-SiO₄-AlO₄-SiO₄-SiO₄-] (tipo PSDS [2]. Durante la geopolimerización, como se mencionó anteriormente una vez que los polvos de aluminosilicatos se mezclan con la solución alcalina se forma una pasta y transforma rápidamente en un geopolímero duro y compacto. Por lo tanto, no hay suficiente tiempo y espacio para que el gel o la pasta puedan crecer en una estructura bien cristalizada [3].

Por otro lado comparado al cemento pórtland, los geopolímeros requieren menos consumo de energía, tiene menos emisiones de CO₂, alta resistencia a compresión inicial, menor contracción, baja permeabilidad, buena resistencia al fuego y a los ácidos, además de ser materiales con excelente durabilidad [4], Además en lo que respecta al comportamiento de los geopolímeros, diversos autores pronostican un reorganización estructural del componente vítreo como consecuencia del ataque alcalino, lo cual es plasmado en DRX y FTIR, con desplazamientos en las señales de los difractogramas y espectrogramas respectivamente [5,6]. Para conocer más acerca de las propiedades de estos materiales, es necesario realizar una serie de caracterizaciones por múltiples técnicas. El presente estudio se centra, además de otros parámetros, en la influencia del DRX y FT IR en las propiedades químicas de las pastas de geopolímero mediante disminución del tamaño de partícula (malla #200) por molienda mecánica.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Caracterización de los materiales:

Se utilizó una CV procedente de la central carboeléctrica en Nava, Coahuila, México. A la cual se le realizó Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar los principales componentes químicos (ver **tabla 1**), Según la norma (ASTM C618) la CV utilizada corresponde a una CV de tipo F. Por otro lado, para aumentar la reactividad de la ceniza volante de origen (CV-N) se le redujo el tamaño de partícula por medio de una molienda manual mediante el uso de un mortero de porcelana, posteriormente se clasificaron mediante el tamiz No. 200 (CV-M).

Tabla 1.- Composición química de CV-N (%wt.)

CV-N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI*
	56.9	26.24	5.56	4.25	0.72	1.21	0.346	0.71	1.21	2.47

LOI*: Pérdida por ignición

La ceniza volante se activó con solución alcalina de NaOH, con una molaridad de 8 M, la relación solución/ceniza fue de 0.4, posteriormente se colocaron en moldes de plástico, se desmoldaron a las 24 horas y se colocaron en bolsas herméticas por el método de inmersión [7], posteriormente se mantuvieron con una humedad relativa del 99 % y a una temperatura constante de 80 °C durante 7 y 28 días.

Mediante el equipo de difracción de laser (mastersizer 2000) se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (ver **figura 1**), esto con la finalidad de establecer la diferencia en tamaños de la CV-N y CV-M, en ésta, se puede observar que CV-M, concentra el mayor porcentaje de partículas en el rango de 0 a 45 µm (≈ 70 % en volumen), Por otra parte, CV-N se constituye por diferentes tamaños de partícula, llegando a contener un 55 % en volumen por encima de los 45 µm; lo que denota la influencia de la molienda manual y el tamizado, otra diferencia de CV-N con respecto a CV-M es que se observan tamaños de partículas mayores a 1000 µm (5 %), dichas partículas son consideradas como polidispersas.

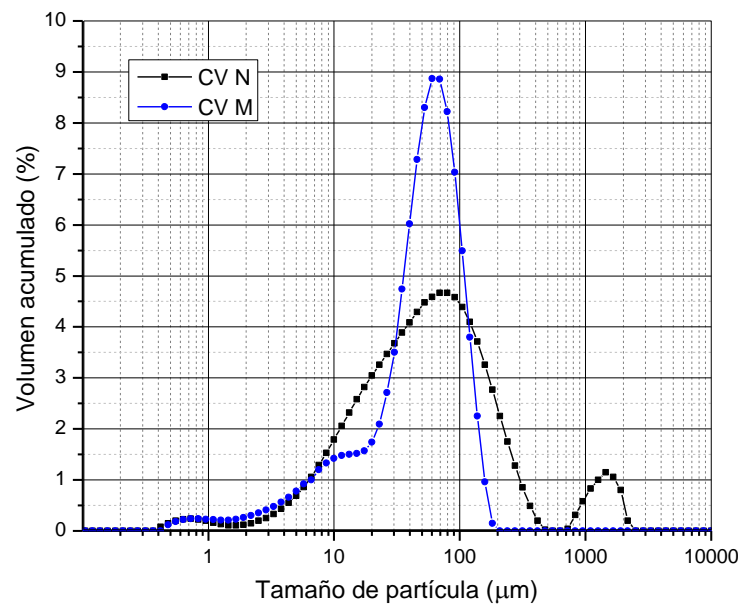


Figura 1.- Distribución de tamaños de partículas en CV-N y CV-M

La identificación de fases de las muestras sin activar (ver **figura 2**), se realizó mediante DRX, con el fin de determinar las fases cristalinas presentes de CV-N y compararlas con las fases presentes en la CV-M y a su vez con las muestras activadas alcalinamente (G). En ésta, es factible identificar los compuestos habituales de una CV con constituyentes amorfos en gran parte del difractograma, es importante recalcar que principalmente

aparecen entre los 17° y 30° de 2θ ; mientras que por otra parte, en los comparativas de los difractogramas de CV-N y CV-M se aprecia una elevación pronunciada en los resultados del difractograma de esta última ceniza, localizada entre los 5° y $10^\circ = 2\theta$ [°], atribuida posiblemente al aumento de la amorficidad de las CV-M, producida por la molienda manual.

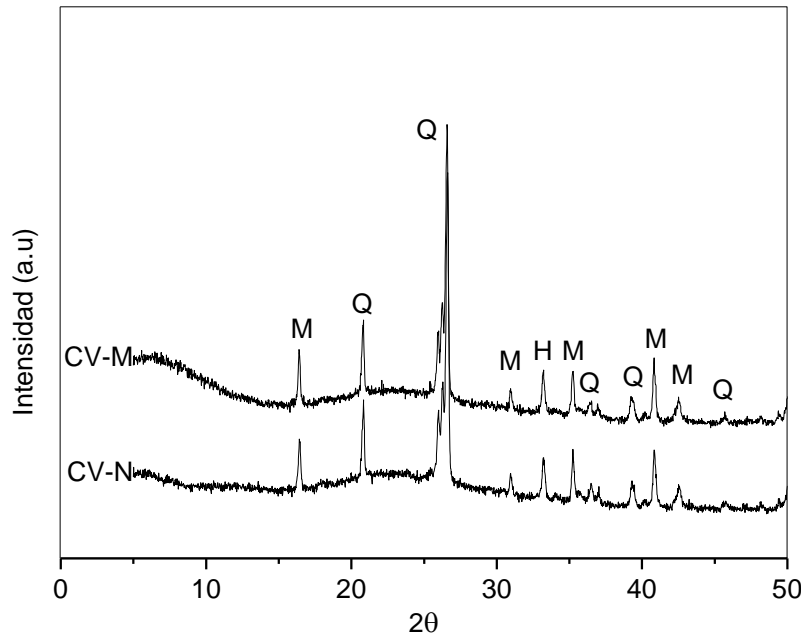


Figura 2.- DRX de CVN y CV-M (M=Mullita, Q=Cuarzo, H=Hematita)

RESULTADOS

Se obtuvieron pastas de geopolimero, con la finalidad de que en este trabajo se presente un estudio de cómo algunas variables (superficie específica y edad de curado principalmente) afectan al desarrollo químico de las cenizas volantes activadas alcalinamente. Cabe mencionar que además de estas variables, se pueden considerar otros parámetros como temperatura, naturaleza y concentración molar del activador, los cuales serán considerados para trabajos futuros.

DRX

Se obtuvo un difractograma (**figura 3**) en el cual se muestran los picos característicos de un material geopolimérico base CV sin moler (GN) y CV molida (GM) a los 7 y 28 días de curado.

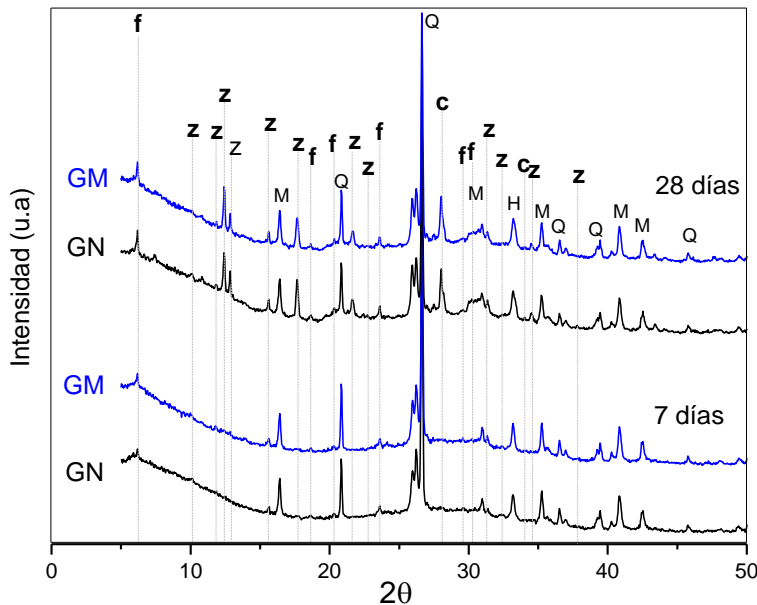


Figura 3.- DRX de compuestos geopoliméricos (z=zeolitas, f=faujasitas, c=carbonato de sodio).

La identificación de fases se llevó a cabo en las muestras de origen y en las activadas con hidróxido de sodio con la finalidad de determinar los compuestos cristalinos presentes.

Los difractogramas muestran diversos picos e intensidades, las fases cristalinas presentes son el cuarzo, hematita, mulita, las cuales se mantienen desde el material de origen hasta la geopolimerización. Por otro lado, los nuevos compuestos cristalinos (zeolitas) aparecen principalmente entre los 5° y $20^\circ = 2\theta$, las cuales son de tipo “y” y de tipo faujasita, debido al activador sódico utilizado.

Se puede observar un levantamiento en el difractograma entre los 20 y $33^\circ = 2\theta$, lo anterior es un comportamiento típico en materiales amorfos [9].

Figura 3 muestra como la intensidad de los picos aumentan conforme se aumenta el día de curado (de 7 a 28 días). La intensidad de los picos depende de la cristalización de las fases, en otras palabras se puede atribuir a la edad de curado, activador alcalino, molienda manual, temperatura, entre otros (mencionados al comenzar el capítulo).

FT-IR

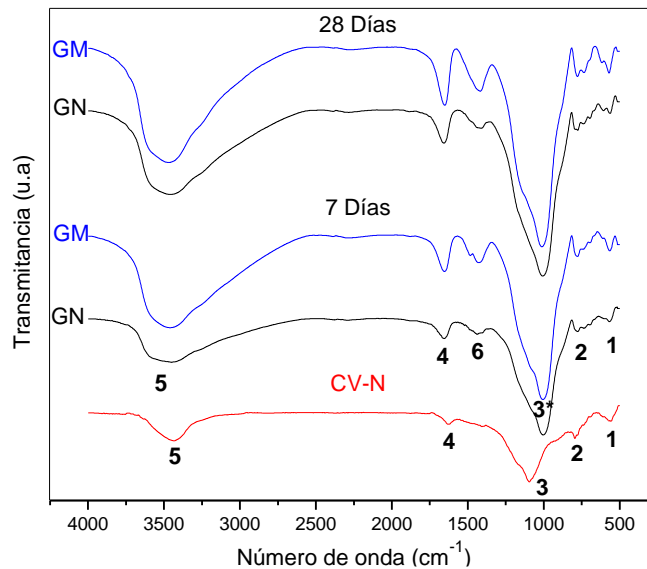


Figura 4.- Espectros de FTIR de CV-N y muestras geopoliméricas.

En el espectro de infrarrojo de la figura 4, existen diferentes bandas, las cuales son características en los materiales geopoliméricos.

En lo que respecta a CV-N se tiene que su principal banda (marcada con el número 3), se ubica a los 1100 cm^{-1} , la cual se atribuye a enlaces de Si-O o Al-O presentes en los materiales amorfos de la ceniza. Un hallazgo importante aparece en las muestras activadas, ya que dicha banda se desplaza hacia números de onda menores, la cual aparece entre 900 y 1000 cm^{-1} , y se atribuye a una tensión asimétrica de Si-O ó Al-O, pero ya no del material amorfo, si no de enlaces que están presentes en el gel N-A-S-H, la magnitud de esta banda se asigna fundamentalmente a la naturaleza amorfa del material, así como al ordenamiento de corto alcance de los tetraedros de Si y Al. Puede observarse una importante transimitancia en dicha banda, esto depende de factores como la edad de curado, grado de reactividad, entre otras [10].

Se muestran además bandas entre 600 y 650 cm^{-1} y otras de 790 a 800 cm^{-1} , estas pueden atribuirse a los enlaces que están presentes en la ceniza volante de origen (Si-O y Al-O), principalmente en los compuestos cristalinos como el cuarzo y la mullita. Por otro lado se encuentra dos bandas más, la primera entre 1600 y 1650 cm^{-1} y la segunda entre 3400 y 3500 cm^{-1} , dichas bandas pueden corresponder según la literatura a enlaces que están presentes en la hidratación del geopolímero, o en otras palabras corresponde a moléculas del agua presente en el material y en el gel N-A-S-H [11].

Haciendo una comparativa entre los espectros de una CV-N y la que representa un geopolímero podemos destacar que a partir de los 7 días de curado se forma una nueva banda ubicada a los 1400 cm^{-1} , la cual puede representar una banda de vibración de carbonatos y se atribuye a la tensión asimétrica de los enlaces O-C-O de grupos CO_3^{2-}

que posiblemente se encuentran en los bicarbonatos de sodio presentes por la interacción del medio externo con el sodio o calcio del activador alcalino.

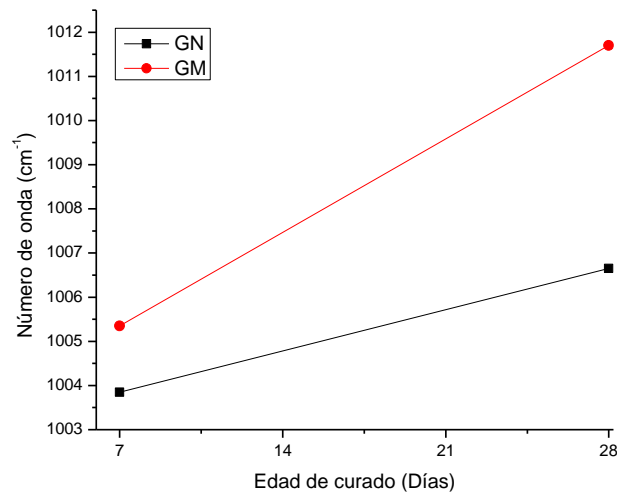


Figura 5.- Desplazamiento de la banda en FTIR, correspondiente a vibraciones de enlaces Al-O y Si-O presentes en el gel N-A-S-H.

En la figura 5 se observan los cambios en números de onda, atribuidos a las vibraciones de enlaces Al-O y Si-O presentes en el gel N-A-S-H de los geopolímeros [12], los cuales, fueron desplazados hacia números de onda menores, con respecto a las cenizas de origen. Los resultados muestran que al avanzar la edad de curado en combinación con la disminución del tamaño de partícula de la ceniza, los números de onda se desplazan hacia valores de onda mayores, esto producido por la mayor incorporación de silicio y aluminio a la cadena larga del gel N-A-S-H y, a su vez, ocasionado por la mayor reactividad de los geopolímeros provenientes de CV M. Los resultados arrojan valores que oscilan entre 1004 cm^{-1} y 1006 cm^{-1} para GN a los 7 y 28 días de curado respectivamente y 1005.5 cm^{-1} y 1012 cm^{-1} para GM a los mismas edades de curado [13].

CONCLUSIONES

CV-M obtuvo mayor reactividad que CV-N, esto en términos de desarrollo de fases cristalinas en los geopolímeros, además las muestras activadas a los 28 días de curado fueron las que mejor estructuración cristalina generaron, en comparación con las de 7 días. Los compuestos cristalinos presentes en las muestras de origen se mantienen en las muestras de geopolímero, sumándole la aparición de las nuevas fases, que están conformadas principalmente por agentes zeolíticos (faujasitas y de tipo zeolita tipo “y”).

En las muestras de geopolímero ocurre un desplazamiento de bandas en los espectros de FTIR (de los 1100 cm^{-1} a 1004 cm^{-1}), en relación con las muestras sin activar, lo cual obedece a la formación del gel N-A-S-H y las bandas desplazadas, aumentan en valores de números de onda para las muestras GM en comparación con GN, tanto a los 7 como a los 14 días de curado.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, al Centro de Investigación de Materiales Avanzados, a la Universidad Politécnica de Cataluña, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y a los alumnos colaboradores del servicio social.

REFERENCIAS

1. Davidovits J. Geopolymer: inorganic polymer new materials. *J Therm Anal* 1991;37:1633–56.
2. Akolekar, D., Chaffee, A., Russell, F.H., 1997. The transformation of kaolin to low-silica X zeolite. *Zeolites* 19 (5), 356–365.
3. Komnitsas, K. and D. Zaharaki, Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 2007. 20(14): p. 1261-1277.
4. Bakharev, T., 2005. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cem. Concr. Res.* 35 (4), 658–670.
5. Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., Sanz, J.: “Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87, (6), pp. 1141-1145 (2004).
6. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer J.S.J. “Geopolymer technology: The current state of the art. *J. Materials Science*, 42, pp. 2917-2933 (2007). <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
7. Luo, X., et al., Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system. *Construction and Building Materials*, 2012. 29: p. 482 486.
8. Rattanasak, U. and P. Chindapasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 2009. 22(12): p. 1073-1078.
9. Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A., Alkali Activation of Fly Ash. Parte III. Effect of Curing Conditions on Reaction and its Graphical Description/Fuel, 2010. 89: p. 3185-3192.
10. Fernández-Jiménez, A. and A. Palomo, Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. *Microporous and mesoporous materials*, 2005. 86(1): p. 207-214
11. Provis J.L., D.P., van Deventer J.S.J., Statistical thermodynamic model for Si/Al ordering in amorphous aluminosilicates. *Chemistry of Materials.*, 2005. 17.
12. Rodríguez Martínez, e.d., Efecto de la incorporación de materiales basados en sílice sobre las propiedades de matrices de cemento pórtland y activadas alcalinamente. Tesis doctoral 2012.

Palomo, A., et al., Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004. 87(6): p. 1141-1145.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO TRADICIONAL Y CONCRETO CON MATERIALES RECICLADOS DE CONSTRUCCIÓN

Suarez Suarez¹, H. Herrera Noriega¹, P. E. Santander Pasten¹, F. J. Olgúin Coca^{1,2}, J.R. Betancourt³, L. D. López León², L. G. Lizárraga Mendiola², F. Almeraya Calderon⁴, C. Gaona Tiburcio⁴, J. Acosta García¹

1.- Ciencias de la Tierra, Instituto Tecnológico de Pachuca. Carretera México-Pachuca Km. 87.5

C.P.42080 Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo

2.- Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

3.- Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n Fraccionamiento Filadelfia, 35010 Gómez Palacio, Durango México

4. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, CIIIA, Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 6645

RESUMEN

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado, y puede utilizarse en muchas obras y estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para los materiales necesarias. El concreto reciclado tiene su principal fuente de recursos en los residuos de construcción y demolición que proceden en su mayor parte de la demolición de edificios, pavimentos, excedentes en plantas concreteras, y como resultado urbanizaciones. Esto representa una pérdida de las materias primas que componen el concreto, principalmente del Agregado Natural (AN), ya que este es un recurso natural no renovable. Además, este desperdicio también implica la necesidad de un sitio para su disposición final. El concepto de construcción sostenible engloba la reducción, reutilización, y reciclaje de los residuos que genera la gran actividad de construcción. En este trabajo, se evalúa el desempeño de concretos fabricados con agregado reciclado(AR), a partir de cilindros de concreto con una resistencia especificada de 300 kg/cm². Las mezclas fueron elaboradas con 100% de reemplazo del Agregado Grueso Natural (AGN), por Agregado Grueso Reciclado (AGR). Los resultados muestran una variación considerable en la prueba de absorción de agua ya que las mezclas fabricadas con el AR requieren mayor inclusión de agua, esto evidencia que las mezclas elaboradas con AGR propician un concreto mas poroso y por ende más susceptible desde el punto de vista de la durabilidad; aun cuando los niveles de resistencia son similares a los del concreto tradicional.

ABSTRACT

Concrete is a 100% recyclable material, provided that it's not contaminated, and can be used in many works and different structures complying with the specifications for the materials necessary. The concrete recycling has its main source of resources in the construction and demolition waste that come from for the most part of the demolition of buildings, pavements, Concreteras surpluses in plants, and as a result urbanizations. This represents a loss of raw materials that make up the concrete, mainly of the added Natural (W), since this is a non-renewable natural resource. In addition, this waste also implies the need for a site to its final disposal. The concept of sustainable construction involves

the reduction, reuse, and recycling of the waste that it produces the large construction activity. In this work, we evaluate the performance of concrete manufactured with recycled aggregate (AR), from concrete cylinders with a specified resistance of 300 kg/cm². The mixtures were prepared with 100% replacement of natural coarse aggregate (AGN), by coarse aggregate Recycling (AGR). The results show considerable variation in the absorption test water already that the mixtures produced with the AR require greater inclusion of water, this is evidence that the mixtures produced with AGR favors a more porous concrete and therefore more susceptible from the point of view of the durability; even when the levels of resistance are similar to those of the traditional concrete.

Palabras clave: Residuo de construcción, concreto, mezclas de concreto, Concreto reciclado.

INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico es un compuesto que resulta de la mezcla de material cementante, arena, grava, agua y en algunos casos aditivos, que al fraguar y endurecer adquieren propiedades similares a las de las rocas naturales más resistentes. Cuando se utiliza concreto hidráulico en las construcciones, éste tiene que ser diseñado y elaborado bajo un estricto control de calidad, conforme a parámetros de las normas aplicables en el país, como lo es las normas NMX, ASTM y en su caso los Comités ACI.

Es por esto que en este apartado, se abordan los principales temas sobre el concreto, como son: cada uno de los componentes de la mezcla y sus características, el comportamiento en estado fresco del concreto, las etapas de fraguado, las propiedades del concreto en estado endurecido y finalmente se hace una descripción breve de los métodos más comunes para el diseño de mezclas de concreto[1].

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado, y puede utilizarse en muchas obras y estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para los materiales necesarias. El concreto reciclado tiene su principal fuente de recursos en los residuos de construcción y demolición que proceden en su mayor parte de la demolición de edificios, pavimentos, excedentes en plantas concretas, y como resultado de urbanizaciones. Esto representa una pérdida de las materias primas que componen el concreto, principalmente del Agregado Natural (AN), ya que este es un recurso natural no renovable. Además, este desperdicio también implica la necesidad de un sitio para su disposición final. El concepto de construcción sostenible engloba la reducción, reutilización, y reciclaje de los residuos que genera la gran actividad de construcción

El empleo del concreto reciclado data de tiempos posteriores a la segunda guerra mundial, donde europeos enfrentaban la problemática de la gran acumulación de escombros en sus ciudades destruidas, motivo por el cual se abocaron a reciclar dichos desperdicios y utilizarlos como material de construcción, dándoles muy buenos resultados.

Una investigación experimental en Estados Unidos, emprendida por [5] consistió en probar la resistencia a la fatiga de un material utilizado para base de pavimento, compuesto por agregados reciclados, pequeñas cantidades de cemento Pórtland y cenizas volantes, reforzado con fibra de acero. Las muestras preparadas alcanzaron límites de resistencia comparables con los materiales típicos utilizados en pavimentos para autopistas. En este mismo campo de la construcción, [7], de la Universidad Griffith en Australia, presentaron resultados de su trabajo con agregados reciclados de concreto (RCA) obtenidos por trituración. Los especímenes fueron sometidos a la prueba triaxial con repetición de carga un día después de su compactación.

Se determinó que la resistencia puede verse afectada significativamente debido al contenido de finos (10%) en las muestras por lo que su utilización en bases y sub bases de carreteras queda sujeta a un control efectivo de estándares de calidad del producto. Por su parte, Chini et al (2001) reportan desde la Universidad de Florida, una evaluación de materiales reciclados de concreto para base de pavimento con mezclas asfálticas en caliente y como agregado de cemento Portland en pavimentos rígidos. Comprobaron que en la medida que aumenta el porcentaje de RCA en las muestras disminuye la resistencia a esfuerzos de flexión y compresión. Sin embargo los valores alcanzados, del orden de 35 Mpa, se consideran aceptables. Similares resultados se hallaron en Corea, presentados por Park [3] al experimentar con material reciclado seco y húmedo para bases de pavimento rígido, y en [6] quienes estudiaron las características de esfuerzo deformación de los agregados reciclados de concreto sometidos a compresión triaxial.

La fabricación de elementos de concreto con material reciclado de residuos de la construcción, puede tener el inconveniente de valores altos de porosidad redundando en problemas de durabilidad, principalmente por la penetración de cargas ambientales como son los cloruros y carbonatos.

El ACI 318-02 define la durabilidad del concreto como la “capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente”. Las condiciones de exposición que acarrear los daños más comunes en el concreto provienen de los líquidos y gases que lo penetran, originando acciones químicas que derivan en la corrosión del acero de refuerzo.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

1. Identificación, de distintos laboratorios de construcción en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, y sus áreas circundantes; La selección será de acuerdo a la ubicación y aceptación de los propietarios donde se encuentren los residuos.
2. Acopio de material (especímenes de concreto) en forma selectiva.

3. Obtención por cuarteo y secado de muestras de materiales pétreos heterogéneos y trituración de los mismos en una planta industrial de producción de agregados de la localidad.

4. Caracterización física del material triturado de acuerdo a la normatividad oficial para muestreo y pruebas de materiales, como son:

a) Peso volumétrico seco suelto para obtener el peso de las partículas sólidas por unidad de volumen, expresado en Kg. por metro cúbico.

b) Análisis granulométrico para clasificar por tamaño las partículas del material pasándolo por una sucesión de mallas, obteniendo el peso de los retenidos como porcentaje de la muestra total.

c) Densidad relativa, a obtener como la relación de la densidad absoluta, incluyendo sus vacíos.

d) Porcentaje de absorción, para determinar la cantidad de agua absorbida por el material pétreo previamente saturado en agua a una temperatura entre 15° a 25° C durante 24 horas.

e) Equivalente de arena, cuyo objeto será determinar en lo que pasa la malla número 4.75, bajo condiciones de pruebas establecidas, la proporción volumétrica de partículas de tamaño mayor que el de las arcillas, con respecto al volumen de las partículas finas de tamaño similar al de las citadas arcillas.

f) Porcentaje de desgaste, a fin de conocer la calidad del material pétreo en cuanto al grado de alteración y presencia de planos de debilitamiento que pudieran provocar una desintegración de las partículas.

Los resultados mostraron poca diferencia entre ambos, tal y como se observa en la tabla 1 siguiente:

Tabla 1 Características de los materiales

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MATERIAL	
		NATURAL	RECICLADO
PESO VOL. SECO/SUELTO	KG/M3	1060	1126
PESO VOL. SECO/COMPACTO	KG/M3	1152	1181.5
DENSIDAD	KG/LT	2.01	1.98
ABSORCIÓN	%	12.54	14.14

5. Diseño de pétreo obtenido relación agua-obtener distintos valores

mezclas con el haciendo variar la cemento para especímenes con de resistencia a la compresión, lo mas cercanos posibles a 300 kg/cm². con una nomenclatura como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Siglas de nomenclatura de especímenes

NOMENCLATURA	
R	Reciclado

N	Natural
AG	Agregado Grueso
AF	Agregado Fino
20	Porcentaje

6. Pruebas de Resistencia a la compresión. Se efectuará en forma tradicional de acuerdo a la norma ASTM C 39-03 a 14 y 28.

7. Integración del informe final y conclusiones.

Figura 1 Triturado reciclado



de material

En la figura 2 se muestra el cribado del material en base a la norma ASTM para la elaboración de los especímenes de concreto empleando los residuos de concreto después del triturado del material.

Figura 2 materiales



Cribado de reciclados

RESULTADOS

En la figura 3 se muestran los resultados de compresión de todas las mezclas realizadas de los especímenes experimentados a los 3, 14 y 28 días de curado donde se muestra que el comportamiento de materiales con agregado grueso reciclado presentan resistencias a la compresión con valores mas altos que los que se realizaron con

agregado fino reciclado y donde los datos con agregado natural presenta la mejor resistencia a la compresión debido a que el agregado grueso está presentando un comportamiento como agregado mineral grueso presentando una mejor resistencia al igual una mejor mezcla con los materiales.

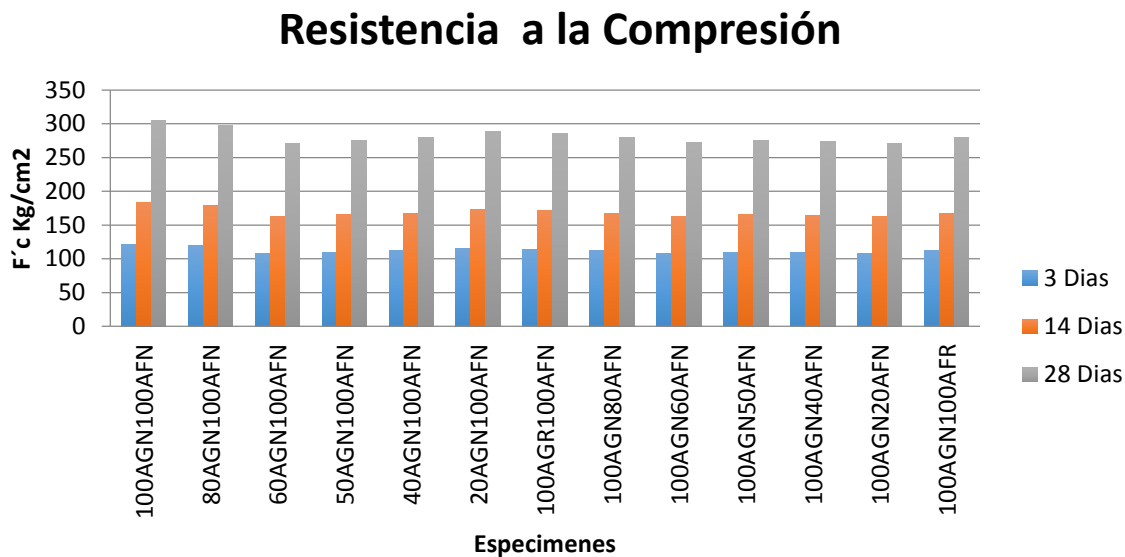


Figura 3 Resistencia a la compresión

En la figura 4 se muestra el comportamiento de los especímenes con agregado grueso reciclado donde se observa como la resistencia a la compresión tiene una tendencia a decrecer conforme al porcentaje de AGN aumenta hasta el 50%, cuando el AGR aumenta el porcentaje mayor al 50% la resistencia aumenta, debido al crecimiento de material cementante observando que el material fino no aporta a la resistencia a la compresión.

La figura 5 con materiales de agregado grueso es acercan de gran manera a la resistencia de diseño de 300kg/cm² debido a que los gruesos aportan un mejor comportamiento mecánico que casi igual que los agregados naturales.

Resistencia a la compresión AG reciclado

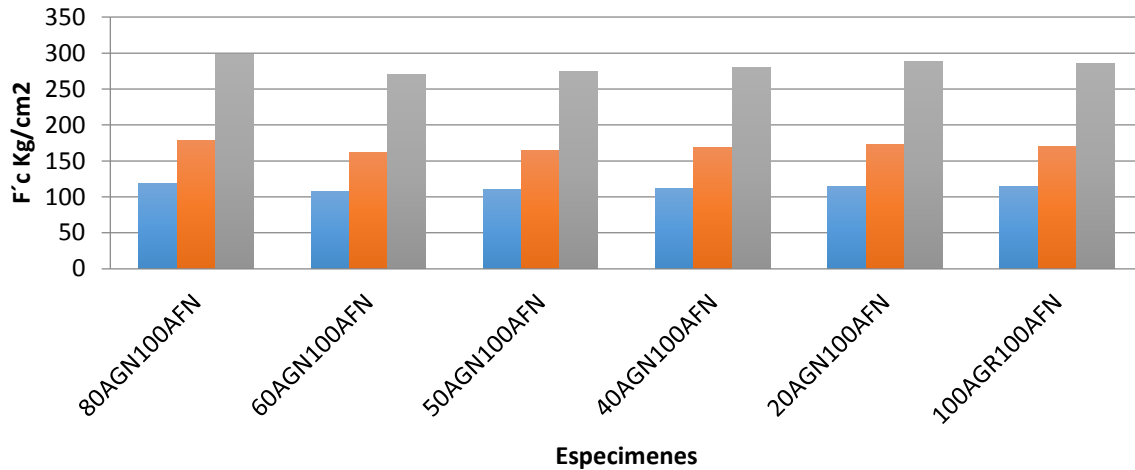


Figura 5 Resistencia a la compresión de agregado grueso reciclado

Resistencia a la compresión AF reciclado

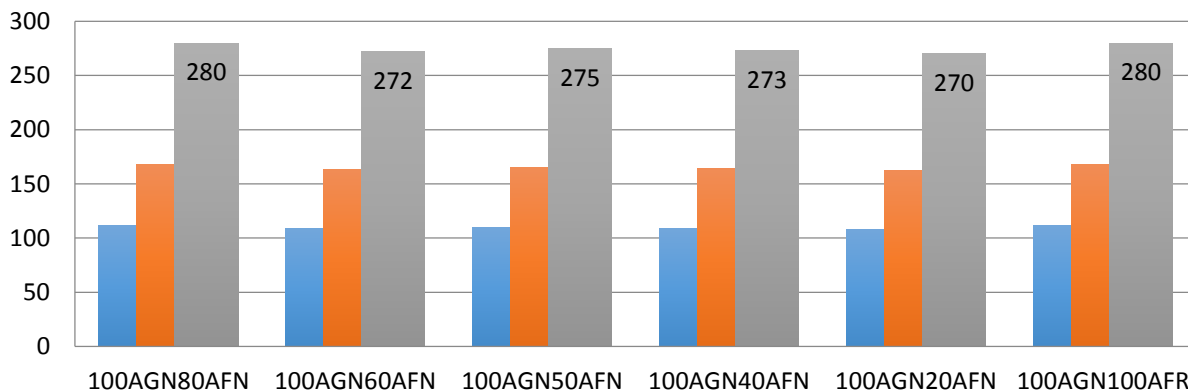


Figura 6 Resistencia a la compresión de agregado fino reciclado

En la grafica 3 se muestra la resistencia a la compresión del agregado fino reciclado en especimenes de concreto donde muestra que el agregado fino en su totalidad tanto de forma natural como de material reciclado tienen una resistencia superior que los 5 intermedios donde no existe una buena adhesión de los agregados finos generando una conclusión que el fino del cementante después de su vida útil no está aportando a la reacción para generar un mejor cementante para mejorar la resistencia a la compresión.

CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión de materiales reciclados no muestran una gran pérdida de la resistencia en comparación con los agregados naturales, también se observa un mejor comportamiento con agregados reciclados gruesos en comparación con los finos.

Los agregados reciclados gruesos presentan un comportamiento mecánico semejante a los agregados naturales el agregado reciclado grueso como tal es muy resistente y debido a su forma genera una buena cohesión con los materiales al realizar la mezcla originando una mejor resistencia a la compresión.

Los agregados finos no presentaron resultados hipotéticos donde se pensaba que el fino reaccionaría con el cemento y generaría una mayor dosificación de cemento lo cual no se presentó así, siendo que no aumenta la resistencia y presentan resultados de compresión menores que un agregado fino natural.

Los materiales reciclados de concreto pueden emplearse en elementos estructurales siendo que los resultados muestran que no existen gran variación con agregados naturales.

REFERENCIAS

Artículos

Michel, A., Solgaard, A., & Pease, B. J. (2013). Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete. *Corrosion Science*, 77, 308–321.

Baltazar-Zamora, M. A. (2005). *Comportamiento de la corrosión en acero al carbono e inoxidable embebido en concreto en presencia de NaCl y Na₂SO₄*. Chihuahua, Chih, México: CIMAV.

DURAR, O. T. (1998.). *Manual de inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Maracaibo, Venezuela: CYTED.

Krykowskia, T., & Zybura, A. (2013). Modelling of Reinforced Concrete Element Damage as a Result of Reinforcement Corrosion. *Procedia Engineering*, 57, 614 – 623.

México, I. d. (2006). *Anuario estadístico de la minería en el Estado de México, 2005*. Mexico, Mexico: Gobierno del Estado de México.

Retama V.J. y Ayala M.G., C. 2. (2013). Reinforced concrete modelling using enriched finite elements. *CFRAC 2013 The third international conference on computational modelling of fracture and failure of materials and structures*.

Yuxi Zhao, J. D. (2014). Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete. *Corrosion Science*, 85, 241–250.

Normas

ACI. Proporciónamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1, p. 29. Ed. IMCYC, México (2004).

Industria de la construcción - concreto hidráulico para uso estructural, NMX-C-403-ONNCCE-1999 Concreto Hidráulico de Uso Estructural

LÍMITES DE USO DE AGREGADO GRUESO RECICLADO DE ORIGEN CALIZO EN CONCRETOS ESTRUCTURALES A PARTIR DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y ELÁSTICAS

L. F. Jiménez^{1,2}, E. I. Moreno², A. I. Rosado-Gruintal²

1. Instituto Tecnológico de Chetumal, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Insurgentes No. 330, Colonia David Gustavo Gutiérrez, Chetumal, Quintana Roo, México.
2. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no contaminantes S/N x Anillo Periférico Norte, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

La variación en los resultados de pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad en concretos con agregados reciclados ha llevado a ensayar distintas tasas de reemplazo del agregado grueso, con el fin de encontrar un comportamiento consistente en comparación a un concreto normal. En el presente trabajo se reporta el comportamiento mecánico de concretos fabricados con agregado calizo grueso, normal y reciclado. La grava reciclada fue obtenida por trituración de escombros de concreto estructural completamente heterogéneo. El análisis estadístico de los resultados reveló un comportamiento mecánico-elástico consistente a partir del límite de 50% de reemplazo. Se comprobó que la tasa de reemplazo del agregado grueso tiene influencia significativa en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Quedaron demostradas las limitaciones de los agregados de origen calizo, debido a que los concretos tuvieron un peso unitario inferior a 2200 kg/m³.

Palabras clave: Concreto Reciclado, Resistencia a la Compresión, Módulo de Elasticidad.

ABSTRACT

The diversity of results obtained from compressive strength and modulus of elasticity tests, made with recycled aggregate concrete has led to test different rates of coarse aggregate replacement. This to find a consistent behavior compared to normal concrete. In this paper, the mechanical-elastic behavior of concrete made with limestone coarse aggregate, natural and recycled, is reported. Recycled coarse aggregate was obtained by crushing structural concrete debris which was heterogeneous. Statistical analysis of the results revealed a consistent mechanical-elastic behavior with at least 50% replacement. It was found that the rate of coarse aggregate replacement has significant influence on the compressive strength and modulus of elasticity. Limitations of limestone aggregate were demonstrated, because the unit weight of the concrete was less than 2200 kg/m³.

Keywords: Recycling Concrete, Compressive Strength, Modulus of Elasticity.

INTRODUCCIÓN

El reciclaje de escombros de concreto para la producción de nuevos agregados pétreos en la industria de la construcción ha aumentado de manera importante en las últimas décadas en países de la Comunidad Europea, Japón y Estados Unidos, entre otros. Sin embargo, en regiones con menor desarrollo tecnológico el proceso ha sido más lento. Algunos inconvenientes, como el bajo costo de los agregados normales que se sustituyen; el mayor control que debe tenerse durante la fabricación del concreto; la ausencia de normas técnicas específicas para su producción y aplicación; y sobre todo la falta de conocimiento efectivo de sus propiedades y desconfianza del sector industrial en cuanto a su comportamiento, hacen que su uso como material aún no sea ampliamente aceptado limitándose a trabajos secundarios como sub-bases de carreteras y rellenos.

La composición de los residuos de construcción y demolición es muy variada y depende de los procesos constructivos, materiales disponibles y costumbres de la población. Los componentes más comunes son: concreto, mortero, mampostería, pisos de cerámica, madera, plásticos y metales. Diferentes investigadores, coinciden en que predominan los tres primeros, mismos que constituyen la materia prima principal para procesos de reciclaje.^{1, 2}

Diversos estudios del estado del arte relativos al concreto reciclado en las últimas décadas^{3, 4, 5} han reportado que los principales problemas de los agregados reciclados provenientes de escombros de concreto se deben a factores como baja calidad de la materia prima de origen, contaminantes presentes, procesos de trituración inapropiados, elevada presencia de material fino y altos valores de absorción, que influyen negativamente en el diseño de mezclas de concreto.

Los concretos fabricados con agregados reciclados ofrecen una menor resistencia a la compresión que un concreto normal con la misma relación agua/cemento. Esta pérdida de resistencia usualmente aumenta en razón del incremento del porcentaje de reemplazo de los agregados. Dicho efecto se atribuye a factores como la cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa del agregado grueso, baja resistencia del agregado de origen, o por problemas de adherencia entre los agregados reciclados y el mortero nuevo, lo que hace que la disminución de la resistencia a la compresión entre un concreto normal y uno con agregados reciclados sea muy variable. Por otra parte, el módulo de elasticidad del concreto, considerado como un factor importante en el diseño de elementos estructurales, suele disminuir cuando se substituyen agregados normales por reciclados, lo cual puede deberse a la reducción del módulo de elasticidad del agregado grueso reciclado, ocasionado por la textura rugosa y la presencia de fisuras en el mortero adherido.⁶

Esta influencia de los agregados en los valores de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, ha llevado a investigar por separado el comportamiento del concreto con distintos porcentajes de reemplazo de los agregados, tanto grueso como fino, pero sin llegar a un consenso sobre la proporción adecuada. De hecho, la mayoría de los estudios indican que en las pérdidas de resistencia influye el empleo de partículas de agregado menores a 2 mm, lo que lleva a evitar el uso de agregados finos reciclados.

De acuerdo con el planteamiento anterior, el presente trabajo de investigación ha consistido en reciclar escombros de concreto provenientes de elementos como trabes, columnas y losas, producidos con agregados triturados, de alta absorción y de origen calizo, con el propósito de recuperar exclusivamente agregado grueso, para determinar límites recomendables de uso en la fabricación de concretos estructurales, a partir de sus propiedades mecánicas y elásticas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Acopio y preparación de materiales

La primera etapa del trabajo consistió en el acopio y preparación de la materia prima para la obtención del agregado grueso reciclado en vertederos al aire libre donde se seleccionaron en forma aleatoria escombros de concreto estructural, provenientes de trabes, columnas y losas, libres de residuos como plástico, acero, madera, cartón y vidrio. En una segunda etapa, se desmantelaron manualmente restos de armaduras de acero, cables y ductos de instalaciones eléctricas. El material fue cepillado para limpiar impurezas como arcilla y vegetales y finalmente conducido a una planta industrial para producir el agregado grueso reciclado mediante trituradora de molino de impacto. La grava recuperada mostró forma alargada, superficie rugosa y color desigual debido al mortero adherido a su superficie. Los agregados normales (grueso y fino) fueron obtenidos por trituración de piedra caliza provenientes de una cantera local. El cemento empleado fue de tipo CPC 30R comercial y el agua se obtuvo del sistema de abastecimiento municipal.

Caracterización de los agregados

Los agregados se caracterizaron siguiendo los métodos de prueba especificados en las normas ASTM.⁷ Los resultados completos de las pruebas físicas de los agregados se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados

<i>Propiedad</i>	<i>Agregado grueso</i>		<i>Agregado fino</i>
	<i>Reciclado</i>	<i>Normal</i>	
Peso unitario seco suelto (kg/m ³)	1102	1187	1146
Peso unitario seco compacto (kg/m ³)	1235	1401	---
Densidad Relativa	2.31	2.33	2.38
Absorción (%)	7.2	6.7	6.2
Desgaste (%)	30	28	---
Tamaño máximo	3/4"	3/4"	---
Módulo de finura (%)	---	---	2.4
Índice de lajas	0.15	0.14	---
Coefficiente de forma	0.26	0.12	---

De la comparación de los resultados en las pruebas efectuadas, para ambos tipos de agregado grueso, se observa que la grava reciclada es de propiedades ligeramente inferiores a la grava normal, lo cual revela que la calidad del agregado grueso en el concreto de origen no fue muy diferente de la grava normal seleccionada. Es de resaltar la escasa diferencia en cuanto a densidad, absorción y desgaste entre la grava normal y la reciclada. En resumen, la grava normal y reciclada, así como el agregado fino, se encuentran prácticamente en el límite entre materiales de buena y mala calidad, de acuerdo con los criterios establecidos por Solís y Moreno⁸ para agregados calizos triturados.

Diseño del experimento

El diseño del experimento fue de tipo factorial. Consistió en el establecimiento de dos factores: relación agua/cemento (a/c) y tasa de reemplazo del agregado grueso (%R), el primero con variación en dos niveles (0.5 y 0.7) con objeto de alcanzar resistencias para uso estructural en concretos comunes en la zona de estudio; el segundo con variación en cinco niveles (100%, 75%, 50%, 25% y 0%) con lo cual se obtuvieron diez familias de concreto. Los concretos con 0%R fueron considerados como muestras de control. Las variables estudiadas fueron dos: resistencia a la compresión ($f'c$) y módulo de elasticidad (E_c).

Diseño de mezclas

Se tomó como base el método de factores empíricos del ACI⁹. La nomenclatura utilizada para diferenciar cada mezcla se especificó con las siglas CN (concreto normal) o CR (concreto reciclado) seguido de la tasa de reemplazo del agregado grueso. El último dígito fue añadido para definir la a/c utilizada (5 para 0.5 y 7 para 0.7). Las cantidades relativas de los materiales para cada tipo de mezcla, sin correcciones por humedad, se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Composición de las mezclas de concreto (kg/m^3)

<i>Mezcla</i>	<i>Agua</i>	<i>Cemento</i>	<i>Grava normal</i>	<i>Grava reciclada</i>	<i>Arena</i>
CN5	205	410	987	0	527
CR25-5	205	410	719	240	556
CR50-5	205	410	465	465	580
CR75-5	205	410	226	677	609
CR100-5	205	410	0	874	635
CN7	205	293	987	0	615
CR25-7	205	293	719	240	644
CR50-7	205	293	465	465	669
CR75-7	205	293	226	677	698
CR100-7	205	293	0	874	723

RESULTADOS

Los resultados promedio de todas las pruebas efectuadas al concreto, tanto en estado fresco como endurecido, se incluyen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de las mezclas de concreto en estado fresco y endurecido

<i>Mezcla</i>	<i>Peso Volumétrico Kg/m^3</i>	<i>Revenimiento cm</i>	<i>Aire atrapado $\%$</i>	<i>$f'c$ MPa</i>	<i>E_c MPa</i>
CN5	2151	10.0	3.5	32.5	20118
CR25-5	2122	11.0	3.7	31.6	18646
CR50-5	2128	11.0	3.9	30.8	16923
CR75-5	2116	11.0	4.0	29.8	16092
CR100-5	2116	11.0	4.0	29.8	15010
CN7	2104	10.5	3.5	23.7	15876
CR25-7	2102	11.0	3.5	23.1	10858

CR50-7	2102	10.5	3.6	22.5	10895
CR75-7	2096	11.0	3.6	21.0	10738
CR100-7	2081	11.5	4.0	19.0	9186

Propiedades en estado fresco

Se observa una tendencia reductiva en el peso volumétrico de los concretos en la medida que aumentó el %R. Como se esperaba, el concreto con mayor peso volumétrico fue el de la mezcla CN5 y el de menor peso fue el de la mezcla CR100-7, lo cual se explica por la diferencia existente entre el peso unitario de los agregados. Todas las mezclas tuvieron buena trabajabilidad con revenimientos de 10 ± 1 cm. El contenido de aire atrapado en los concretos con agregado reciclado tuvo un aumento marginal en comparación con los concretos de control.

Resistencia a la compresión

Después de su fabricación, todos los especímenes de concreto fueron curados por inmersión durante un periodo de 28 días, al término del cual, se seleccionaron en forma aleatoria los especímenes de prueba. Cinco por cada mezcla para los ensayos de resistencia a la compresión y 3 por cada mezcla para los ensayos de módulo de elasticidad.

Los concretos diseñados con 0.5 a/c tuvieron una ligera reducción de su $f'c$ en la medida que aumentó el %R, con pérdidas de 3% a 8%; mejor a lo reportado por otros autores como: Bairagi et al.¹⁰ de 5% a 17%, y Xiao et al.¹¹ de 6% a 12% para 0.43 a/c. Los concretos diseñados con 0.7 a/c en esta investigación, tuvieron un desempeño a la compresión muy similar entre sí hasta el límite de 50%R, a partir del cual disminuyó perceptiblemente la resistencia hasta alcanzar una reducción del 21% en comparación con el concreto de control, parecido a lo reportado recientemente por Lovato et al.¹² con disminuciones que van de 6% a 23% para 0.65 a/c en promedio, y Topçu y Sengel¹³ de 17% a 26% para 0.6 a/c. Los resultados anteriores indican que la relación a/c tiene influencia preponderante en la pérdida de resistencia para cada %R del agregado grueso utilizado (Figura 1).

Módulo de elasticidad

En la Figura 2 puede observarse que los valores de E_c de los concretos con agregado reciclado son inferiores a los alcanzados por los concretos con agregado normal en la medida que aumentó %R del agregado grueso, con diferencias que van de 7% a 25% para 0.5 a/c, muy semejante a lo reportado por Bairagi et al.¹⁰ y Lovato et al.¹², para 0.5 a/c y 0.65 a/c, respectivamente. Reducciones mayores de E_c , fueron reportadas por Xiao et al.¹¹ de 39% a 46%, y por Rao et al.¹⁴ de 25% a 35%, ambos para 0.43 a/c. Los valores actuales de E_c para 0.7 a/c tuvieron disminuciones mucho mayores, de 32% a 42%. La principal razón de estas variaciones se atribuye a la reducción del módulo de elasticidad en los agregados reciclados utilizados.

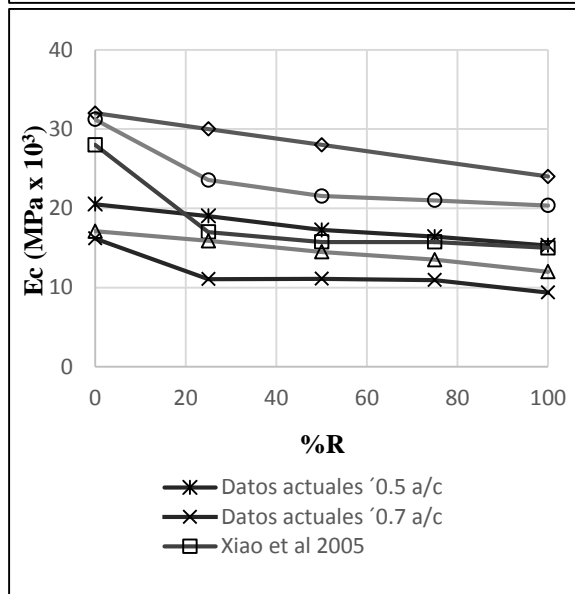
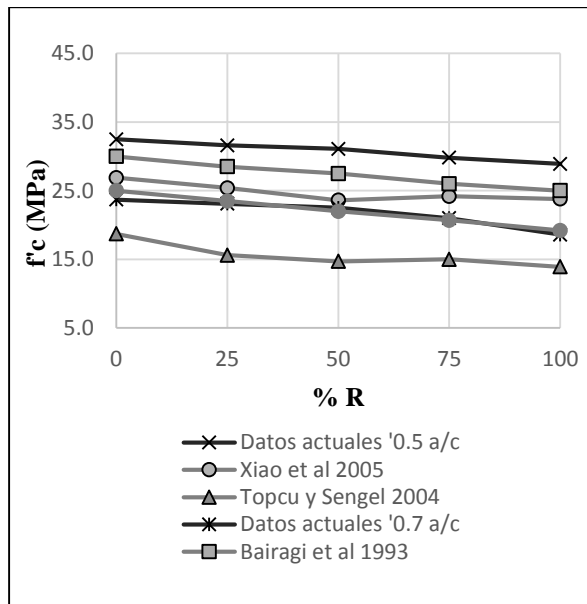


Figura 1. f'_c en función de %R de agregado grueso

Figura 2. E_c en función del %R de agregado grueso

Análisis estadístico

La validación estadística de la investigación consistió, de inicio, en la determinación de medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma para comprobar la normalidad de los datos como puede verse en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de normalidad de los datos

Parámetro	Resistencia a la compresión	Módulo de elasticidad
Frecuencia	50	30

Media	26.40	14434.2
Desviación estándar	4.82	3686.98
Coefficiente de asimetría	-0.29	0.03
Coefficiente de curtosis	-1.96	-1.56

En ambos casos, los coeficientes de asimetría y curtosis se ubicaron dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal (± 2). Posteriormente, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de tipo multifactorial. La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad fueron consideradas como variables dependientes en cada proceso y los factores %R y a/c como variables independientes. Para resistencia a la compresión se examinaron 50 casos completos y para módulo de elasticidad 30, ambos con 95% de confianza. Los resultados se concentran en la tabla 5.

Tabla 5. ANOVA multifactorial para f'c y Ec

Factores	Suma de cuadrados		Grados de libertad		Cuadrado medio		F		Significancia	
	f'c	Ec	f'c	Ec	f'c	Ec	f'c	Ec	f'c	Ec
%R	90.41	1.74E8	4	4	22.60	2.94E7	42.08	56.17	0.000	0.000
a/c	1016.01	2.56E8	1	1	1016.01	2.56E8	1891.59	490.72	0.000	0.000
Interacción	10.14	9.93E6	4	4	2.53	2.48E6	4.71	4.75	0.003	0.007
Residuos	21.48	1.05E7	40	20	0.54	522562				
Total	1138.04	3.94E8	49	29						

corregido

Con el análisis de varianza se comprobó la importancia de cada uno de los factores. La significancia resultó inferior a 0.05, tanto de manera individual como interactiva, lo que indica un efecto estadísticamente significativo de dichos factores en las variables dependientes. Por último, se aplicó el método de Diferencia Significativa Mínima¹⁵ a fin de determinar grupos homogéneos para %R, mediante una prueba de rangos múltiples, como puede verse en la tabla 6.

Tabla 6. Prueba de rangos múltiples para %R

% R	Resistencia a la compresión MPa		Módulo de elasticidad MPa		
	Media	Grupos homogéneos	Media	Grupos homogéneos	
0	28.12	X	17997	X	
25	27.36		14752	X	
50	26.73		13909	X	X
75	25.39		13415		X
100	24.39		12098		X

En esta tabla se refleja un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras con un nivel de confianza de 95%. Dentro de

cada columna los niveles con el signo X forman un grupo de medias entre las cuales no existe diferencia estadísticamente significativa. Para resistencia a la compresión, se identifican 4 grupos homogéneos donde existe similitud estadística entre 25%R y 50%R. Para módulo de elasticidad, se cuentan 3 grupos homogéneos con similitud existente entre 25%R, 50%R y 75%R.

CONCLUSIONES

Dentro del contexto de esta investigación y de acuerdo con los resultados obtenidos, puede concluirse lo siguiente:

- Se confirma que las propiedades elásticas y mecánicas del concreto disminuyen al aumentar el porcentaje de reemplazo del agregado grueso normal por agregado grueso reciclado.
- Se demuestran las limitaciones del agregado calizo de alta absorción, debido a que los concretos tuvieron un peso volumétrico inferior a 2200 kg/m^3 , y los valores de módulo de elasticidad para concretos con 0.7 a/c estuvieron muy por debajo de lo esperado.
- Se comprueba que los factores %R y a/c tienen influencia significativa en las variables resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.
- Estadísticamente, es posible inferir un comportamiento mecánico-elástico consistente a partir del límite de 50% de reemplazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento parcial para el desarrollo de la investigación, otorgado por la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, dependiente de la Secretaría de Educación Pública, mediante el programa SES-ANUIES.

Asimismo se agradece la colaboración de Triturados y Carpetas del Sureste, S.A. de C. V., en la producción del material pétreo reciclado.

REFERENCIAS

1. N. D. Oikonomou, "Recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites* 27 (2005): pp. 315-318.
2. A. Müller, "Recycling of construction and demolition waste-status and new utilization methods", *Committee on data for science and technology* (2006), Beijing: China.
3. T. C. Hansen, "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985", *Materials and Structures (RILEM)* 19, 111 (1986): pp. 201-246.
4. J. F. Lamond, "Removal and reuse of hardened concrete", *ACI Materials Journal* 99, 3 (2002): pp. 300-325.

5. J. Xiao, L. Wengui, F. Yuhui y H. Xiao, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Construction and Building Materials* 31 (2012): pp. 364-383.
6. M. Kakizaki, M. Harada, T. Soshiroda, S. Kubota, T. Ikeda, Y. Kasai, "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete" in: Y. Kasai (Ed.) *Demolition and Reuse of Concrete Masonry*, 2nd International RILEM Symposium, (1988): pp. 565-574, Tokyo, Japan.
7. ASTM Book of Standards 04.02, *Construction: Concrete and Aggregates* (U.S.A., 2010).
8. R. Solís y E. Moreno, "Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity", *Construction and Building Materials* 22 (2008): pp. 1225-1231.
9. American Concrete Institute, *Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete* (U.S.A: ACI 211.2, 1998).
10. N. Bairagi, K. Ravande y V. Pareek, "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates", *Resources, Conservation and Recycling* 9 (1993): pp. 109-126.
11. J. Xiao, L. Jiabin y Ch. Zhang, "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading", *Cement and Concrete Research* 35 (2005): pp. 1187-1194.
12. P. Lovato, E. Possan, D. Carpena, A. Masuero y J. Ribeiro, "Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes", *Construction and Building Materials* 26 (2012): pp. 437-447.
13. İ. Topçu y S. Sengel, "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate" *Cement and Concrete Research* 34 (2012): pp. 1307-1312.
14. M. Ch. Rao, S. K. Bhattacharyya y S. V. Barai, (2011) "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete" *Materials and Structures (RILEM)* 44 (2011): pp. 205-220.
15. D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos* (México: Limusa Wiley, 2011): p. 99.

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN CONCRETO LIVIANO, REMPLAZANDO EL AGREGADO GRUESO POR CÁSCARA DE NUEZ

F.J. De la Cruz¹, A. Sáenz¹, E. Favela¹

¹ Maestro investigador de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

RESUMEN

En este trabajo se investigó el comportamiento del concreto ligero cuando es combinado con cáscara de nuez y humo de sílice, en las proporciones de 10% hasta el 20% del peso del concreto. Las propiedades que se estudiaron fueron la densidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Entre los resultados que se obtuvieron están, que la resistencia de los cilindros en la prueba de compresión tiene un valor óptimo con el 15% de cáscara de nuez cuando esta se toma como un agregado grueso, mientras que la mezcla de 15% de cáscara de nuez con diferentes porcentajes de humos de sílice, muestran una tendencia creciente de la resistencia a la compresión en todo el intervalo de proporciones que se investigó. En la resistencia a la flexión no se encontró cambio alguno del concreto ligero con respecto al concreto de referencia.

ABSTRACT

In this work we investigated the behavior of the lightweight concrete when it is combined with walnut shells and silica fume, in the percentages of 10% up to 20% of the weight of concrete. The properties that were studied were the density, the compressive strength and tensile strength. Some of the results obtained are, the resistance to compression has an optimal value of 15% of walnut shells when added as coarse aggregate, while the mixture of 15% of walnut shells with different percentages of silica fume, show a growing trend of the compressive strength in the whole range of proportions that it was investigated. In flexural strength was not found no change in the lightweight concrete with respect to the reference concrete.

Palabras Clave: Concreto liviano, cáscara de nuez, humo de sílice, resistencia a compresión, resistencia a flexión

INTRODUCCIÓN

El concreto es generalmente considerado el material de construcción para edificios, puentes y otras grandes estructuras debido a su resistencia y su facilidad a adaptarse a las diferentes formas de las estructuras. Sin embargo existe una gran cantidad de concretos ligeros (lightweight concrete) que están siendo manufacturados hoy en día que pueden ser útiles para otro tipo de estructuras y no necesariamente las grandes obras. Después del desarrollo del concreto Portland por los 1800s, fue hasta los 1900s cuando se pudo desarrollar concreto ligero estructural. La idea principal de este concreto es reducir el peso del concreto para usarse en estructuras en las cuales permita

al diseñador reducir el tamaño de los elementos estructurales. El material ligero tiene la particularidad de reducir la masa sísmica de la estructura y por lo tanto reducir el nivel de las fuerzas sísmicas actuando en la estructura.

Muchos trabajos de investigación se han realizado para mejorar las propiedades del concreto ligero añadiendo nuevos materiales, entre estos se encuentran los materiales naturales, reciclados o sintéticos. La idea principal de estos materiales ligeros es reemplazar los agregados o el cemento, o también como aditivo, sin embargo, por generalidad estos materiales son usados como agregados en la fabricación del concreto ligero. Los principales agregados ligeros investigados hasta el momento son, la piedra pómez, las cenizas volantes, la escoria, cenizas volcánicas y roca volcánica ⁽¹⁾. Recientemente se han llevado a cabo trabajos de investigación usando la corteza de la palma de aceite como agregado ligero (LWA) para producir concreto con agregado ligero ^(2,3,4,5,6,7,8).

En el trabajo de Topcu ⁽⁹⁾, se llevó a cabo investigaciones con concretos semi-ligeros usando escoria volcánica como agregado grueso, encontrando que este material puede ser usado en la producción de concreto semi-ligero. Tukiman⁽¹⁰⁾ investigó el concreto ligero usando la corteza de coco como agregado ligero. Otros tipos de agregados ligeros incluyen piedra pómez, escoria, arcilla expansiva, ceniza volante. En este trabajo se usara cáscara de nuez como agregado grueso para producir concreto ligero.

Como mencionamos anteriormente, una gran cantidad de trabajos se han llevado a cabo utilizando agregados ligeros naturales y artificiales para producir concreto ligero, sin embargo hasta ahora no se ha utilizado la cáscara de nuez como un agregado ligero para la elaboración de este concreto. La gran cantidad de este material que se produce anualmente y que es considerado como desecho es un incentivo para la investigación del concreto con este subproducto natural.

MATERIALES

En la preparación del concreto liviano se usó un cemento Gris CPC 30r. Norma ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004, demás se consideró el uso de una arena de río y la cáscara de nuez, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 1.

La cáscara de nuez que fue empleada en la dosificación, fue triturada y luego tamizada. La **arena de río** es un conjunto de partículas de rocas disgregadas, la arena está compuesta de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm.

Tabla 1.- Características de los materiales arena de río y cáscara de nuez.

Arena de río		Cáscara de nuez	
Contracción lineal	1.5%	Contracción lineal	-
Materia orgánica	1.2%	Materia orgánica	-

Equivalente de arena	48.5%	Equivalente de arena	-
Módulo de finura	2.98	Módulo de finura	-
Peso vol. Suelto	1480 kg/m ³	Peso vol. Suelto	460 kg/m ³
Peso vol. Compacto	1535 kg/m ³	Peso vol. Compacto	510 kg/m ³
Perdida por Lavado	3.5%	Color	Marrón claro
Contaminación por Grava	1.8%	Forma	Angular
Densidad	2.62 kg/m ³	Densidad	0.7 g/cm ³
Absorción	7.25%	Absorción	37.5%

Cemento

El Cemento Portland Ordinario Gris cpc 30r, es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (Bancas, mesas, fuentes, escaleras), etc.

Humo de sílice (HS)

Es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferrosilíce. Su proceso es resultado de la reducción de cuarzo de pureza elevada (SiO₂) con carbón en hornos de arco eléctrico, a temperaturas mayores a 2000 °C. Debido a su finura varias veces superior a la del cemento, este compuesto mineral en la mezcla de concreto permite una mayor y mejor oclusión de los poros, ofreciendo de esta manera un producto más estable, resistente y duradero.

Agua

Agua Potable de la que se surte a la población de la ciudad de Gómez Palacio.

MÉTODO

El concreto se diseñó siguiendo el método de volúmenes absolutos del Instituto Americano de Concreto (ACI 211). Se utilizó una relación A/C de 0.45 que corresponde a un concreto de calidad. Los materiales constituyentes se mezclaron en seco. Se inició mezclando la arena y la cáscara de nuez, se homogenizaron, después se incorporó cemento y agua, en seguida el humo de sílice, para la homogenización de la mezcla se usó un mezclador eléctrico marca Controls. Que estuvo operando durante intervalos 5 minutos esto con el fin de ir checando la consistencia de la mezcla, después de tres intervalos de 5 minutos se pudo apreciar una buena consistencia de la mezcla. la temperatura ambiente y la humedad durante la elaboración de la mezcla fue de 32° grados centígrados y 30% de humedad, después de vaciar la mezcla en los cilindros y las vigas la temperatura de la mezcla inicio a 36° hasta llegar a los 39° centígrados. Las dimensiones de los cilíndricos fue de 100 x1500 mm y las vigas de 150x150x600 mm.

A excepto de los puentes y estructuras marinas las especificaciones para concretos livianos no tienen un requerimiento con respecto al coeficiente máximo agua/cemento (a/c). El coeficiente de a/c [agua/cemento] del concreto liviano no se puede determinar con precisión debido a la dificultad a la absorción del agua por el agregado liviano. En la tabla 2 se presentan la dosificaciones con el 15% de cáscara de nuez sin humo de sílice

de las muestras de concreto ligero que se elaboraron, mientras que en las tablas 3, 4, 5, se muestran las dosificaciones con cáscara de nuez y H.S.

Tabla 2: Datos de la dosificación de un concreto liviano.

Materiales	Peso en kg	Peso en kg
Cemento	500	6.885
Arena	848	11.448
Agua	240 lts	6.2 lts
Nuez	762	10.287

Tabla 3: Datos de la dosificación de un concreto liviano con el 10% de Humo de sílice

Materiales	Peso en kg	Peso en kg
Cemento	500	6.885
Arena	848	11.448
Agua	240 lts	6.2 lts
Nuez	762	10.287
Humo de sílice		895 gr

Tabla 4: Datos de la dosificación de un concreto liviano con el 15% de Humo de sílice

Materiales	Peso en kg	Peso en kg
Cemento	500	6.885
Arena	848	11.448
Agua	240 lts	6.2 lts
Nuez	762	10.287
Humo de sílice		1.340

Tabla 5: Datos de la dosificación de un concreto liviano con el 20% de Humo de sílice

Materiales	Peso en kg	Peso en kg
Cemento	500	6.885
Arena	848	11.448
Agua	240 lts	6.2 lts
Nuez	762	10.287
Humo de sílice		1.785

Las probetas fueron desmoldadas a 24 horas, el total se hicieron 60 probetas, fueron 20 vigas y 40 cilindros. Todas las probetas fueron probadas a 28 días.

Para el curado se sumergieron en agua en su totalidad las muestras de concreto liviano, durante 28 días, para después ser ensayadas en la maquina universal.

RESULTADO Y DISCUSIÓN.

Las pruebas a que fue sometido el concreto ligero desarrollado con cáscara de nuez y humo de sílice, fue la densidad, resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión, los resultados de estas pruebas se presentan a continuación.

Densidad

En la tabla 6, se muestra los resultados de la densidad de la mezcla de concreto con 15% de cáscara de nuez, con 10%, 15% y 20% de humo de sílice. El incremento en la densidad es debido al incremento en el peso del humo de sílice que se agrega al concreto pero conservando la misma cantidad de cemento que en la muestra de referencia. Estos valores de densidad corresponden a los concretos ligeros que se encuentran entre los 1400 kg/m³ y los 2000 kg/m³ que la literatura de esta área reporta como concretos de tipo ligero ⁽¹¹⁾. Los valores aquí obtenidos son 1,523.47, 1,549.02 y 1,601.19 para los porcentajes de 10%, 15% y 20% de humo de sílice respectivamente.

Tabla 6.- Densidad de concretos con 15% de cáscara de nuez y 10%, 15% y 20%, humo de sílice,

% de humo de sílice	Densidad en kg/m ³
10%	1,523.47
15%	1,549.02
20%	1,601.19

Resistencia a la compresión

Para las pruebas de resistencia a la compresión, se hicieron muestras cilíndricas de 100mm x 150 mm, con un tiempo de curado de 28 días, estas muestras fueron hechas de concreto con agregado ligero y sin agregado ligero. Las muestras sin agregado ligero sirvieron de referencia para las muestras con agregado ligero. La resistencia de compresión de las muestras de referencia dio un valor medio de 150 Kg/cm². Estas muestras de referencia contenían solamente cemento, agregado fino y agua. Todas las muestras fueron ensayadas en la Máquina Universal Hidráulica, modelo 70-C0820/CZ, serial 01104442 marca Controls. A una velocidad de 2.5 kg/cm²/seg. Los resultados de las muestras con los agregados ligeros se muestran en las Tablas 7, 8 y 9. En la tabla 7 tenemos las pruebas de concreto con 10%, 15% y 20% de cáscara de nuez sin contenido de humo de sílice, así como los valores de la desviación estándar de los resultados. Los porcentajes con respecto de la muestra de concreto de referencia (cemento, arena y agua), de esta tabla muestran que con el 10% de agregado ligero la resistencia disminuye un 26.5% de la mezcla del concreto pero ya con el 15% tenemos solamente una disminución del 8.16% para después caer al 14.06% con el 20% de la cáscara de nuez, esto nos indica que el 15% de cáscara de nuez es la cantidad con la cual tiene una menor disminución respecto a la resistencia a la compresión. La razón por la cual el 15% de cáscara de nuez incrementa un poco la resistencia a la compresión no hemos podido todavía explicar. En la última columna de la tabla 7 se muestra los valores de la desviación estándar, estos valores son parecidos a los reportados por otros trabajos de pruebas de concreto sin agregado ligero.

Tabla 7.- Resistencia a la compresión del concreto con 10%, 15% y 20% de cáscara de nuez, con un tiempo de curado de 28 días.

% de cáscara de nuez	Resistencia en kg/m ²	% Que disminuye con el concreto normal	Desviación Estándar
10%	118.50	-26.5	2.6378
15%	138.68	-8.16	2.0227
20%	131.50	-14.06	2.3765

En la tabla 8, se muestran los resultados de las pruebas de compresión a un concreto con 15% de cáscara de nuez y con 10%, 15% y 20% de humo de sílice, así como los valores de la desviación estándar de los resultados. Con el 10% de HS, vemos que se tiene una disminución en la resistencia a la compresión del 4.89% con respecto de la muestra de referencia, pero conforme se incrementa el contenido de sílice, hasta alcanzar un 5.57% de resistencia mayor que el valor de referencia cuando se agrega el 20% de humos sílice. Este comportamiento es el reportado por otras publicaciones ^(11,12) que mencionan que el humo de sílice incrementa la resistencia del concreto cuando este se mezcla con agregado ligero, sin embargo hasta ahora no se tenía conocimiento que este mismo comportamiento se llevara a cabo con la cáscara de nuez.

Tabla 8.- Resistencia a la compresión del concreto con 15% de cáscara de nuez y con 10%, 15% y 20% de humo de sílice en los porcentajes y con un tiempo de curado de 28 días.

% de humo de sílice	Resistencia en kg/m ²	% de incremento con el concreto normal	Desviación Estándar
10%	143.00	-4.89%	2.3344
15%	148.92	-0.72%	3.7520
20%	158.85	5.57%	1.5027

En la tabla 9, se muestran los resultados de las pruebas a un concreto sin cáscara de nuez y con 10%, 15% y 20% de humo de sílice, así como los valores de la desviación estándar. Aquí se observa que las muestras de concreto sufren un incremento en la resistencia, que es por arriba de la resistencia de la muestra de referencia, en la literatura ⁽¹²⁾ se reporta que los incrementos de la resistencia para un concreto normal con 10%, 15% y 20% de humo de sílice, es de 3.8% de incremento, mientras que en este trabajo se obtuvo un incremento (máximo) del 18.5% para un concreto ligero sin agregado grueso.

Tabla 9.- Resistencia a la compresión del concreto con humo de sílice en los porcentajes 10%, 15% y 20%, sin cáscara de nuez y con un tiempo de curado de 28 días.

% de humo de sílice	Resistencia en kg/m ²	% de incremento	Desviación Estándar
---------------------	----------------------------------	-----------------	---------------------

		con el concreto normal	
10%	155.7	3,8%	1.9121
15%	160.2	6.8%	3.5865
20%	177.8	18.5%	4.2948

Resistencia a la flexión

Las muestras para las pruebas de flexión fueron vigas prismáticas de 150x150x600 mm ensayadas en la misma maquina Controls, teniendo un tiempo de curado de 28 días, los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 10. Los resultados de la prueba de la viga que nos sirvió de referencia nos dan un valor de 17.13 kg/cm². De la tabla 10 vemos que con 10% de cáscara de nuez existe una disminución en la resistencia a la flexión del -7.7%, pero que se incrementa conforma se incrementa el contenido de cáscara de nuez, hasta llegar a un 2.7%, este último valor casi corresponde a los valores de resistencia a la flexión de la viga de referencia por lo podemos mencionar que aun cuando la cáscara de nuez disminuye la resistencia a la flexión el humo de sílice lo incrementa hasta alcanzar el valor de la muestra de referencia.

Tabla 10.- Resistencia a la Flexión del concreto con 15% de cáscara de nuez y con humo de sílice en los porcentajes 10%,15% y 20%, con un tiempo de curado de 28 días.

% de humo de sílice	Resistencia en kg/cm ²	% de incremento con el concreto normal	Desviación Estándar
10%	15.80	-7.7%	1.7595
15%	17.28	0.87%	0.8471
20%	17.60	2.7%	0.9435

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo de investigación en los concretos livianos serán los siguientes:

- 1.- La cáscara de nuez puede ser usado como un agregado ligero de un mortero, y con humo de sílice se puede obtener un mortero con características de resistencia a la compresión y a la flexión semejantes al mortero normal.
- 2.- Con un 15% de cáscara de nuez sin humo de sílice, se obtuvo un resultado sorprendente, el cual no se esperaba, ya que se obtiene un valor máximo en la resistencia a la compresión, que está por arriba de las dosificaciones con el 10% y 20%, por qué se obtiene este resultado, todavía no se puede explicar, ya que se esperaba que la resistencia a la compresión disminuyera conforme se agrega el porcentaje del agrega ligero
- 3.- Las mezclas con 15% de cáscara de nuez y con 10%,15% y 20% de humo de sílice, presenta un incremento creciente en la resistencia a la compresión, conforme se incrementa el porcentaje se sílice.

4.- En las pruebas de resistencia a la flexión para muestras con 15% de cáscara de nuez y 10%, 15% y 20% de humo de sílice, no se encontró alguna variación significativa con respecto al concreto normal, en la misma dosificación pero sin cáscara de nuez y humo de sílice.

REFERENCIAS

- (1) Neville A.M. and Brooks J.J. 2008. Concrete technology. Malaysia: Prentice Hall.
- (2) Abdullah A.A.A. 1984. Basic Strength Properties of Lightweight Concrete Using Agricultural Wastes as Aggregates. Proceedings of International Conference on Low-cost Housing for Developing Countries, Roorkee, India.
- (3) Okafor F.O. 1988. Palm Kernel Shell as a Lightweight Aggregate for Concrete. Cem. Con. Res. 18: 901-910.
- (4) Falade F. 1992. The use of palm kernel shells as coarse aggregate in concrete. Journal of Housing Science. 16(3): 213-219.
- (5) Basri H.B., Mannan M.A. and Zain M.F.M. 1999. Concrete using waste oil palm shells as aggregate. Cem. Con. Res. 29: 619-622.
- (6) Mannan M.A. and Ganapathy C. 2001. Mix design for oil palm shell concrete. Cem. Con. Res. 31: 1323-1325.
- (7) Mannan M.A. and Ganapathy C. 2004. Concrete from an agricultural waste oil palm shell (OPS). Build. Environ. 39: 441-448.
- (8) Teo D.C.L., Mannan M.A., Kurian V.J. and Ganapathy C. 2007. Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties. Buil. Environ. 42: 2614-2621.
- (9) Topcu I.B. 1997. Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags, Cem. Concr. Res. 27(1): 15- 21.
- (10) Tukiman S.A.B. and Sabarudin S.B. 2009. Investigate the combination of coconut shell and grained Palm kernel to replace aggregate in concrete: A technical Review, National Conference on Postgraduate Research (NCONPGR), Malaysia. pp. 49-58.
- (11) Javed Ahmad Bhat, Reyaz Ahmad Qasab and A. R. Dar, Machine crushed animal bones as partial replacement of coarse aggregates in lightweight concrete, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 7, NO. 9, SEPTEMBER 2012
- (12) Debabrata Pradhan, D. Dutta. Influence of Silica Fume on Normal Concrete. Debabrata Pradhan et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 3, Issue 5, Sep-Oct 2013, pp.79-82

BREVE RESUMEN DE LOS AUTORES.

M.C. FRANCISCO JAVIER DE LA CRUZ. PROFESOR-INVESTIGADOR DE LA FICA, AREA DE INVESTIGACION; MECANICA DE FRACTURA Y MODELOS DE TRANSPORTE.

DR. AGUSTÍN SÁENZ LÓPEZ, PROFESOR-INVESTIGADOR DE LA FICA, COORDINADOR DEL AREA DE INVESTIGACION, AREA DE INVESTIGACION: MECANICA DE FRACTURA Y MODELOS DE TRANSPORTE.

ESTUDIO A LA COMPRESIÓN DE CONCRETO TRADICIONAL VS CONCRETO CON RESIDUOS DE MÁRMOL COMO AGREGADOS

J.R. Betancourt¹, F.J. Olguín², L.G. Lizárraga², J.E. Cobos¹, G. Herrera¹

1.- Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n Fraccionamiento Filadelfia, 35010 Gómez Palacio, Durango México

2.- Área Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Col. Carboneras, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo México

RESUMEN

Los países productores de mármol en el mundo comparten el grave problema de los residuos que generan, países como España, Turquía, India, entre otros, han hecho esfuerzos por mitigar el problema. En la Comarca Lagunera, las áreas saturadas por los desechos de mármol se ha venido incrementando durante los últimos años, afectando al medio ambiente y afectando la salud de la población. La Comarca Lagunera es considerada como una de las zonas más importantes por su producción de mármol en México.

En este trabajo se muestra el comportamiento a la compresión y el revenimiento de mezclas de concreto tradicional y mezclas con diversos porcentajes de residuos, sustituyendo un 30% de arena por polvo de mármol y 20, 40 y 80% de grava por residuos de mármol.

El uso de estos residuos podría contribuir a mitigar los daños al medioambiente, y por consecuencia, la disminución del impacto negativo a los bancos de materiales.

Palabras clave: Residuos de mármol, concreto, mezclas de concreto, resistencia a la compresión

ABSTRACT

Marble producing countries in the world share the serious problem of waste generated, countries like Spain, Turkey, India, among others, have made efforts to mitigate the problem. In the Comarca Lagunera, saturated areas with marble waste has been increasing in recent years, affecting the environment and the health of the population. The Comarca Lagunera is considered one of the most important for its marble production areas in Mexico.

In this paper the compressive behavior and traditional slump concrete mixtures and blends with different percentages of waste sample was replaced substituting 30% of sand and marble dust 20, 40 and 80% of waste gravel. The use of this waste could contribute to mitigate the environmental damages, and consequently to reduce negative impact to the landfills of materials.

Palabras clave: Marble waste, concrete, concrete mixtures, compressive strength

INTRODUCCION

A lo largo de la historia el mármol ha sido utilizado por la humanidad para mejorar su hábitat, con usos muy variados en todo el mundo, la explotación y el aprovechamiento (Fig. 1) de este recurso natural ha sido aprovechado principalmente por los países que cuentan con las canteras más grandes como lo son: Italia, España, Portugal, Turquía, Grecia, China, Brasil y México.⁽¹⁾ Derivado de esta explotación, se generan millones de toneladas de residuos y sin embargo, empresas de este ramo en general no cuentan con programas de gestión de los mismos.



Fig. 1.- Cantera de mármol al aire libre en Macael, España,
publicado por JMG trabajos en vertical 644 34 87 37

En la actualidad se vive una revolución en el aspecto del cuidado al medioambiente, motivo por el cual muchos investigadores en el orbe han fijado sus ojos en los residuos de la industria del mármol. Diversos estudios se han realizado en varios países ^(2,3,4) tratando de encontrar un uso y/o elaborar un producto derivado de éstos residuos, que ayude a mitigar y/o revertir los efectos negativos que causan al medioambiente. Existen trabajos con resultados muy alentadores para su uso en la fabricación de otros materiales, tomando como materia prima dichos residuos ^(5,6) entre otros. Es importante comentar que la construcción es una de las industrias que más recursos naturales consume, como es el caso de los Estados Unidos que consume hasta un 40% de estos ⁽⁷⁾.

La Comarca Lagunera siendo una de las principales productoras de mármol ⁽⁸⁾, la cantidad de residuos del mármol ha ido en aumento de una manera muy considerable, esto se puede observar ya que diariamente se desechan alrededor de 450 toneladas de residuos de mármol ⁽⁹⁾, los cuales se depositan en sitios específicos que ya están por sobrepasar los niveles de acopio, esto sin contar que los residuos son colocados en los terrenos de las mismas empresas generadoras, por lo que se está convirtiendo en un problema urgente de resolver. Existe también una preocupación por los suelos de cultivo, ya que los depósitos de dicho residuo, saturan y contaminan el suelo donde están depositados por la acción del carbonato de calcio que contiene, provocando que el suelo sea dañado en sus propiedades fértiles y no permita así el alojamiento de vegetación. Lo más crítico, es que no se respeta la normativa oficial (SEMARNAT) y las empresas que producen este residuo lo depositan en lugares inapropiados de forma desordenada (ver figura 2), como en terrenos baldíos y zonas rurales, provocando así daños al medio ambiente, problemas de fertilidad en la tierra y males respiratorios en las personas.



Figura 2.- Residuos de mármol en la Comarca Lagunera

Características del mármol.-

En geología, el mármol es una roca metamórfica compacta formada a partir de rocas calizas que, sometidas a elevadas temperaturas y presiones, alcanzan un alto grado de cristalización. El componente básico del mármol es el carbonato cálcico, cuyo contenido supera el 90%; los demás componentes, considerados "impurezas", son los que dan gran variedad de colores en los mármoles y definen sus características físicas ⁽¹⁾, tiene una dureza en Mohs del orden de 3 a 4, su densidad varía entre 2.6 y 2.8 g/cm³. Las aplicaciones más usuales están destinadas a la aplicación en la construcción, sobre todo en las de revestimientos aunque también destacan su utilización en escultura y arte funerario.

Uso de residuos de mármol para concretos en el mundo.-

En países como la India, se han realizado proyectos que incluyen el uso del polvo de mármol en concretos ⁽¹⁰⁾ elaboraron mezclas utilizando como sustituto parcial del cemento el humo de sílice (8% fijo) y polvo de mármol en diferentes porcentajes (0,8,10 y 12 %) fabricaron elementos cúbicos de 150 mm por lado y elementos cilíndricos de 150X300 mm, para medir su resistencia a la compresión, se observó que la trabajabilidad disminuye un poco al agregar éstos elementos, encontraron una combinación óptima para incrementar la resistencia a la compresión al agregar humo de sílice al 8% en combinación con un 8% de polvo de mármol. En otro estudio se encontró que el polvo de mármol húmedo (masilla) tiene buen comportamiento sustituyendo un 10% por la arena, porcentajes mayores afectan su resistencia a la compresión.⁽¹¹⁾ Asimismo, en Turquía se encontró que la adición del polvo de mármol como filler no afecta la trabajabilidad, sin embargo, su resistencia a la compresión se ve afectada para en mezclas por encima de un $f'c=200$ kg/cm² ⁽¹²⁾

Por otro lado se ha encontrado que utilizar residuos de mármol como agregado grueso en concretos, tienen un desempeño similar al concreto tradicional en algunas de sus características físico mecánicas ⁽¹³⁾ principalmente en términos de durabilidad, descubriendo que es muy factible su uso. Existen otros estudios que experimentaron con el uso de polvo de cantera y de mármol además de piedra de mármol en sustitución de los agregados en el concreto ⁽¹⁴⁾ quienes llegaron a la conclusión que utilizar hasta un 75% de agregados producto de los residuos de mármol, es muy beneficioso en su resistencia a la compresión.

Recientemente se ha experimentado en mezclas para concreto auto-compactable, analizando sus propiedades mecánicas ⁽¹⁵⁾, inclusive el polvo de mármol se ha utilizado como filler en sustitución del cemento hasta un 30%, se evaluó su resistencia a la compresión y retracción, llegando a la conclusión que las características mecánicas son muy similares a los concretos de referencia, por lo que su uso puede representar un filler adecuado para concretos auto-compactables ⁽³⁾

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el presente trabajo de investigación, se obtuvieron los materiales necesarios de

varios “bancos”; el polvo de mármol se obtuvo de los residuos de la marmolería “MARMOLES PARRA S.A de C.V.” la cual se ubica en la ciudad de Lerdo Durango sobre la vialidad conocida como periférico; el residuo que se utilizó como grava se obtuvo de la marmolería “MINSÁ Mármoles Industrializados del Norte S.A. de C.V.” ubicada en el ejido “La Torreña” del Municipio de Gómez Palacio, Durango; la arena utilizada fue de los márgenes del lecho del río Nazas; la grava de río triturada se obtuvo de la criba “GRAVAMIL” ubicada en Lerdo, Durango. Se utilizó Cemento Portland tipo II Compuesto.

Una vez que se obtuvieron dichos materiales se procedió a realizar las pruebas necesarias para conocer características físicas, las cuales fueron: peso volumétrico, absorción, granulometría, densidad, composición química.

Posteriormente se realizó la dosificación de los materiales tomando como referencia la guía de proporcionamiento ⁽¹⁶⁾ para diferentes resistencias a la compresión, tomando como referencia la de resistencia mínima de 200 kg/cm², la cual considera las siguientes cantidades.

Tabla 1.- Dosificación base

MATERIAL	CANTIDAD kg/m ³
Cemento	323
Arena	705
Grava	812
Agua	210

Con éstas cantidades se elaboraron especímenes de control y las diferentes mezclas con residuos de mármol para comparar las resistencias. En las mezclas que se utilizaron residuos de mármol se mantuvo fija la sustitución de un 30% de arena por polvo de mármol, y se modificó la mezcla sustituyendo el agregado grueso en las siguientes proporciones 20, 40 y 80% por grava de residuos de mármol.

Cabe hacer mención que las mezclas se hicieron en seco y posteriormente se le agregó el agua, pudiéndose observar mejor trabajabilidad en las de menor cantidad de residuo de mármol, aunque esto no afecta significativamente dicha característica.



Fig. 3.- Mezcla y elaboración de cilindros

Las diferentes mezclas fueron elaboradas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, se obtuvo el revenimiento conforme a la norma mexicana NMX-C-156-1997-ONNCCE, los especímenes cilíndricos se elaboraron y curaron conforme a la norma mexicana NMX-C-159-ONNCCE-2004, fueron ensayados a la compresión en una máquina Universal Fabrexim de 180 toneladas, se utilizaron platos de neopreno para el cabeceo de los cilindros, los cilindros fueron curados en el laboratorio por el método de inmersión.

RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos, se presentan en primer término, los resultados de las características físicas de los materiales y posteriormente los resultados del revenimiento y de las pruebas de resistencia a la compresión. En todos los casos el P.V.S.V. corresponde al peso volumétrico seco varillado.

Características físicas del polvo de mármol:

Densidad= 2.78

Composición química:

CaCO₃= 95% , Fe= 0.038% , Al=0.10% , SiO₂= 1.02%

P.V.S.V.= 1,403 kg/m³

Tabla 2.- Granulometría, polvo de mármol

Malla #	Retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Que Pasa
8	28.45	3.00	3.00	97.00
16	52.10	5.49	8.48	91.52
30	65.65	6.91	15.39	84.61
50	95.5	10.06	25.45	74.55
100	166.30	17.51	42.96	57.04
200	250.20	26.35	69.31	30.69
230	55.60	5.85	75.16	24.84
325	67.95	7.15	82.32	17.68
400	40.25	4.24	86.55	13.45
450	119.30	12.56	99.12	0.88
500	3.05	0.32	99.44	0.56
PASA 500	5.35	0.56	100.00	0.00
TOTAL	949.70	100.00		

Características

grava triturada de mármol:

Densidad= 2.9

% de absorción = 2.165

P.V.S.V. = 1,460 Kg/ m³

Tabla 3.- Granulometría, grava triturada de residuo de mármol

Malla	Retenido (gr)	(%) Retenido	(%)Acumulado	(%) que pasa
1"	33	2.24	2.24	97.76
¾"	5930	39.53	41.77	58.23
½"	3870	25.81	67.58	32.42
3/8"	1890	12.62	80.20	19.80
4	1720	11.52	91.72	8.28
Pasa la 4"	1230	8.28	100	0

Características físicas de la grava triturada de río:

Densidad= 2.88

% de absorción = 2.15

P.V.S.V. = 1,522 Kg/ m³

Tabla 4.- Granulometría, grava triturada de río

Malla	Retenido (gr)	(%) Retenido	(%)Acumulado	(%) que pasa
1"	1330	6.33	6.33	93.67
¾"	6930	33.00	39.33	60.67
½"	4870	23.19	62.52	37.48
3/8"	2890	13.76	76.28	23.72

físicas de la

4	2670	12.71	88.99	11.01
Pasa la 4''	2310	11.00	99.99	0.01

Características físicas de la arena de río:

Densidad= 2.4

% de absorción = 2.35

P.V.S.V. = 1,450 Kg/ m³

Tabla 4.- Granulometría, arena de río

Malla	Retenido (gr)	(%) Retenido	(%)Acumulado	(%) que pasa
4	0.0	0.0	0.00	100
8	53	10.6	10.60	89.4
16	63	12.6	23.20	76.8
30	78	15.6	38.8	61.2
50	194	38.8	77.6	22.4
100	91	18.2	95.8	4.2
200	18	3.6	99.4	0.6
Pasa 200	3	0.6	100	0

Tabla 5.- Revenimiento

% Grava de mármol	Revenimiento 1 en cm	Revenimiento 1 en cm	Promedio en cm
80	9.0	9.5	9.25
80 2ª Etapa	8.5	9.5	9.00
40	9.0	10.5	9.75
20	9.5	10.5	10.00
0	10.5	11.0	10.50

Resistencia a la compresión.-

A continuación se muestran los resultados de los especímenes ensayados a distintas edades de curado (7,14, y 28 días)

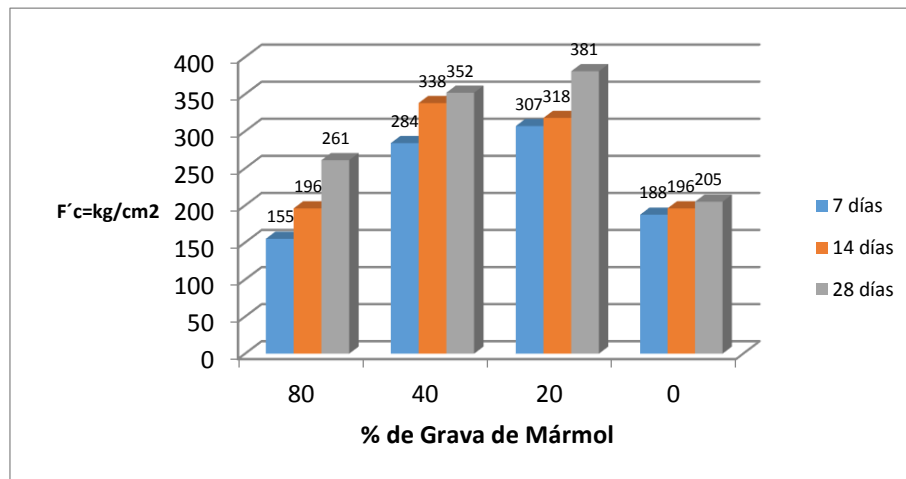


Fig. 4.- Resistencia a la compresión en función del % de sustitución de grava triturada de mármol.

Se puede ver en la fig. 4, como la resistencia a la compresión se va incrementando en función del tiempo de curado en todas las mezclas elaboradas, las mezclas con residuos de mármol muestran un mejor comportamiento a la compresión que la mezcla de control, pudiéndose observar mejores resultados en las que tienen menor porcentaje de grava triturada de mármol.

Tomando como referencia los resultados anteriores, se procedió a repetir la mezcla que incluye un 80% de residuo de mármol en sustitución del agregado grueso. Se elaboraron 5 cilindros por edad de curado, pero se ensayaron sólo 4 para dejar un elemento como testigo del experimento (Ver fig.5)

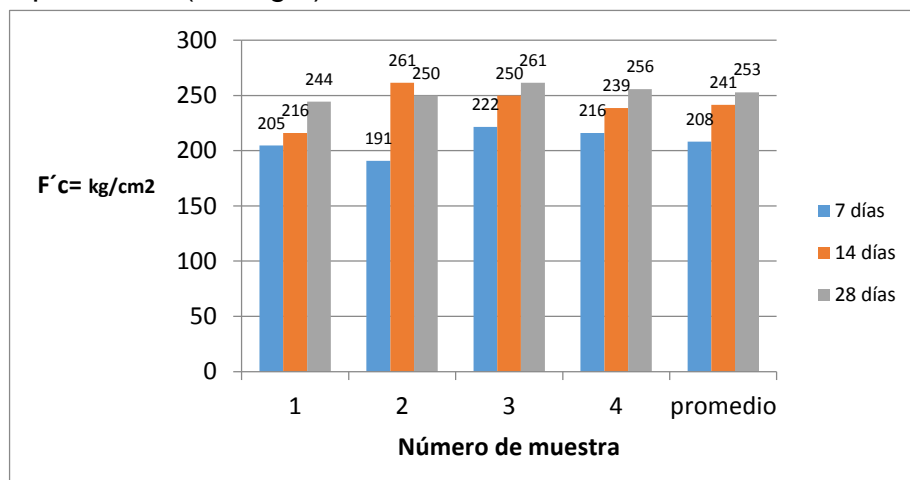


Fig. 5.- Resistencia a la compresión, especímenes con 80% de grava de mármol,

Tal como se esperaba, el comportamiento a la compresión es aproximadamente igual a los resultados obtenidos en la fase anterior, el revenimiento en esta etapa fue de 9 centímetros, por la tanto, está dentro de los parámetros esperados (10 ± 2 cm).

CONCLUSIONES

Como se pudo observar en los resultados mostrados, es factible utilizar cualquiera de las dosificaciones realizadas, ya que el residuo de mármol muestra buen desempeño a la compresión en las mezclas experimentadas. Se puede ver que los diferentes porcentajes de residuo utilizado como agregado grueso, tienen una resistencia a la compresión similar e inclusive mayor al del agregado grueso que se utiliza tradicionalmente en la Laguna. Es importante señalar que el polvo de mármol utilizado como sustituto de la arena en un 30 por ciento para todas las mezclas, contribuyó a este mejor desempeño, ya que ayuda a disminuir la porosidad y por consecuencia hay mayor consolidación en los especímenes.

Respecto a la trabajabilidad se concluye que el agregar los residuos en los porcentajes que se utilizaron en esta investigación, no afecta significativamente su desempeño, ya que el revenimiento en todos los casos estuvo dentro de los límites esperados.

Los resultados indican que puede utilizarse cualquiera de los porcentajes de sustitución de la grava con residuos de mármol, sin embargo, ya que la idea principal es utilizar la mayor cantidad de residuos, se recomienda utilizar el 80% de sustitución, pues tendría un mayor impacto en los problemas mencionados al inicio de este trabajo, principalmente en la contribución a revertir los efectos negativos al medio ambiente y la disminución en la explotación de bancos de materiales.

El presente trabajo de investigación continúa en desarrollo para caracterizar los materiales utilizados y las mezclas elaboradas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de las autoridades de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango por el uso de sus laboratorios y apoyo del personal. Asimismo, al Programa Integral de Fortalecimiento Institucional 2013 por el apoyo para la difusión de este trabajo en Foros y Congresos de investigación.

REFERENCIAS

1. Coordinación General de Minería, Perfil de mercado del mármol, (México: Dirección General de Promoción Minera, 2006): p. 5-8
2. Shalul, M. y Sekar, "Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate", ARPN Journal of Engeeniering and Applied Sciences, (2009): pp.83-89.
3. Valdez, P.; Barragán, B.; Girbles, I., et al. "Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones auto-compactantes", Materiales de construcción 61, 301 (2011): pp. 61-76.
4. Zhang, L. "Production of bricks from waste materials- A review", Construction and Building Materials, 47 (2013): pp. 643-655.
5. Hamza, R. A.; El-Hagggar, S., y Khedr, S. "Marble and Granite waste: Characterization and utilization in concrete bricks", American University of Cairo. (2011).
6. Kavas, T., y Olgún, A. "Properties of cement and mortar incorporating marble dust and crushed brick", Ceramics-Silikaty, 52, (2008): pp. 24-28.
7. Kibert, J., Sendzimir, J., y Guy, B. "Construction ecology and metabolism: natural system analogues for a sustainable built environment", Construction Management and Economics 18, 8 (2000) pp. 903-916.
8. Secretaría de Economía, Coordinación General de Minería. Estudio de la Cadena productiva del Mármol. (México: Dirección General de Promoción Minera, 2012): p. 5-6
9. Cámara Nacional de la Industria de la Transformación de Gómez Palacio, Durango
10. Shelke V.M., Pawde P.Y., Shrivastava R.R. "Effect of powder marble with and without silica fume in mechanical properties of concrete", Journal of mechanical and Civil Engineering. 1, 1 (2012): pp 40-45
11. Santos A. C. P.; Villegas, N., y Betancourt, J. R. "Residuos de mármol como insumo en la construcción civil-diagnóstico de la Comarca Lagunera", Revista de la Construcción 11, 2 (2012): pp. 17-26.
12. André, A.; De Brito J.; Rosa, A., et al. "Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste", Journal of Cleaner Production XXX (2013): pp. 1-8.
13. Hebhouh, H.; Aoun, H.; Belachia, M., et al. "Use of waste marble aggregates in concrete" Construction and Building Materials 25, 3 (2011): pp. 1167-1171.

14. Topcu, I. B.; Bilir, T., y Uygunoğlu, T. “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials* 23 (2009): 1947-1953
15. Tayeb, B.; Abdekbaki, B.; Madani, B., et al. “Effect of marble powder on the properties self-compacting sand concrete”, *The Open Construction and Building Technology Journal* 5 (2011): pp. 25-29
- 16.-Guía de proporcionamiento “Cementos Cruz Azul”

ANÁLISIS DE UNA PASTA CEMENTO CONDUCTORA ADICIONADA CON COQUE EN DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.

E. Garcés-Velázquez¹, E.E. Maldonado-Bandala¹, C.P.Barrios-Durstewitz², R. E. Núñez Jaquez²

¹Universidad Veracruzana- Facultad de Ingeniería, Campus Xalapa, Zona Universitaria, Lomas del estadio SN, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

² Universidad Autónoma de Sinaloa-Facultad de Ingeniería Mochis, Fuentes de Poseidón y Prol. Ángel Flores SN, C.U., C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México

RESUMEN

Una de las propiedades de las pastas de cemento que se puede modificar es la conductividad eléctrica, adicionando partículas eléctricamente conductoras, estas son menos eficaces que las fibras de carbono, por su baja relación de aspecto; Sin embargo, las partículas son más económicas que las fibras. En el presente estudio se desarrolló una pasta cemento conductora (PCC) para la protección y reparación de estructuras de concreto armado, se elaboraron especímenes de 40x40x160 mm para determinar la conductividad eléctrica de la PCC, para la elaboración de la mezcla se utilizó cemento portland compuesto 30-R, coque metalúrgico y agua, el coque se utilizó en cuatro tamaños de partícula y en proporcionamiento de 10-100% de acuerdo al peso del cemento; los especímenes se midieron durante la etapa de curado y en estado seco. Los resultados obtenidos mostraron valores por arriba de la mezcla control ya que la adición del polvo de coque modifica las propiedades de la pasta haciéndola conductora.

Palabras clave: Coque, Pasta Cemento Conductora, Conductividad Eléctrica, Curado.

ABSTRACT

One of the properties of the cement paste that can be modified is the electrical conductivity by adding electrically conductive particles, they are less effective than the carbon fibers due to its low aspect ratio; However, the particles are less expensive than fibers. In the present study we developed a paste cement conductive (PCC) for the protection and repair of reinforced concrete structures, specimens 40x40x160 mm were prepared to determine the electrical conductivity of the PCC, to prepare the mix portland cement compound was used 30-R, metallurgical coke and water, coke was used in four particle sizes and in proportioning of 10-100% according to the weight of cement; Specimens were measured during the curing stage and dry stage. The results showed values above the control mixture and the addition of coke powder modifies the properties of the paste making conductive.

Keywords: Coke, Conductive Cement Paste, Electrical Conductivity, Curing.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la línea de investigación de los materiales cementicios ha estado orientada al estudio de sus propiedades mecánicas y su durabilidad, debido a su principal y única función estructural¹.

En la actualidad existe la creciente demanda de estructuras inteligentes, capaces de detectar y responder a diversos factores, lo cual nos lleva a buscar que los materiales de construcción no solo tengan buenas propiedades mecánicas y sean durables, sino que tengan otras funciones².

La multifuncionalidad consiste en aprovechar el propio material, para realizar otras funciones, sin necesidad de ningún tipo de dispositivo externo. De esta forma se reduce el costo, se simplifica el diseño, mejora la durabilidad, aumenta el volumen funcional, puesto que la función la lleva a cabo toda la estructura, y se minimiza la degradación de las propiedades mecánicas que normalmente se produce al usar dispositivos embebidos².

La elevada resistencia eléctrica de los materiales cementicios se puede modificar o incluso disminuir al adicionar materiales como fibras o polvos. Una de estas propiedades que se puede modificar es la conductividad eléctrica³.

Fibras conductoras eléctricamente (por ejemplo, el carbono y fibras de acero), que son discontinuas son eficaces como mezclas de compuestos conductores eléctricamente en una matriz de cemento⁴. Partículas eléctricamente conductoras (por ejemplo, polvo de grafito) son menos eficaces, debido a su baja relación de aspecto. Sin embargo, las partículas tienden a ser mucho más económicas que las fibras y el bajo costo es importante para la viabilidad de la tecnología del concreto⁵.

En el presente estudio se desarrolló una pasta cemento conductora para la protección y reparación de la corrosión en estructuras de concreto armado, para lo cual se elaboraron 4 grupos de especímenes adicionados con polvo de coque en cuatro diferentes tamaños de partícula en porcentajes del 10-100% con respecto al peso del cemento, para las pruebas de conductividad se elaboraron especímenes de forma prismática con placas y alambres de cobre embebidos y especímenes cúbicos para las pruebas de resistencia a la compresión.

El objetivo principal es analizar el comportamiento eléctrico y mecánico de la pasta cementicia adicionada con material conductor carbonoso, mediante pruebas para determinar su conductividad eléctrica y resistencia a la compresión.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la elaboración de los especímenes se utilizaron los siguientes materiales:

- ✓ Cemento Portland compuesto CPC30R
- ✓ Agua potable
- ✓ Coque fue adquirido como Coke breeze en la empresa Minerales A.B.C. de México ubicada en San Nicolas de los Garza Nuevo León, en tamaño de partícula de 1/8" a finos.

- **Caracterización de materiales.**

El material caracterizado fue el coque, la caracterización se hizo mediante el Análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDX).

La microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDX) se basaron en los siguientes parámetros:

Se realizaron micrografías del coque, empleando un Microscopio Electrónico de Barrido JSM-6510 LV, mediante la emisión de electrones secundarios de baja energía (> 50 eV), esto con la finalidad de estudiar la estructura de este material, superficie, morfología y tamaño aproximado de las partículas y se realizaron difractogramas mediante la técnica de espectroscopia electrónica de energía dispersiva de rayos x (edx), con el objeto de realizar el análisis elemental de los materiales.

- **Dimensionamiento de especímenes**



Figura 1. Espécimen para pruebas de Conductividad de 40x40x160mm

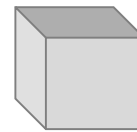


Figura 2. Espécimen para pruebas Mecánicas de 50x50x50mm

- **Proporcionamiento de las mezclas para pruebas de conductividad:**

Para las pruebas de conductividad se elaboraron especímenes de 40x40x160mm como se muestra en la figura 1, con polvo de coque en porcentaje desde 10-100%, se hicieron cuatro grupos con respecto a los cuatro tamaños de partícula, las proporciones se hicieron con respecto al peso del cemento, estas se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Dosificación para los diferentes tamaños de partícula (Granulometría de Arena

Bien Graduada(G-ABG), Retenido Malla 100 (R-M-100), Retenido Malla 200 (R-M-200) y Pasa malla 200(P-M-200)).

Grupos	Especímenes	Peso Cemento(g)	Agua(ml)	% Coque	Peso Coque (g)
G-ABG	1	366.99	192.67	10%	36.699
	2	366.99	192.67	20%	73.398
	3	366.99	192.67	30%	110.097
R-M-100 (0.149mm)	4	366.99	192.67	40%	146.796
	5	366.99	192.67	50%	183.495
R-M-200 (0.74mm)	6	366.99	192.67	60%	220.194
	7	366.99	192.67	70%	256.893
P-M-200 (0.74mm)	8	366.99	192.67	80%	293.592
	9	366.99	192.67	90%	330.291
	10	366.99	192.67	100%	366.99

- **Arreglo utilizado para la pruebas de conductividad**

La medición de la conductividad eléctrica de la pasta de cemento conductora se llevó a cabo utilizando un arreglo de cuatro puntas, como el que se muestra en la figura 4, este método consiste en hacer pasar una corriente eléctrica conocida, generada por una fuente CA, a través del circuito eléctrico, la intensidad de corriente se mide con el amperímetro. Para lo cual se embebieron 2 alambres de cobre separados entre si 40mm y dos placas separadas 120 mm como se muestra en la figura 4; con este se obtuvo la resistencia eléctrica y con el valor de la resistencia eléctrica se calculó el valor de la conductividad eléctrica del material empleando, mediante la siguiente ecuación.

$$k=L/(RA) \quad (1)$$

Donde k es la conductividad eléctrica de la pasta de cemento (S/cm), R es la resistencia eléctrica del espécimen de pasta de cemento (Ohm), L es la longitud (mm) entre los alambres donde se mide la diferencia de voltaje y A es el área de sección transversal del espécimen.

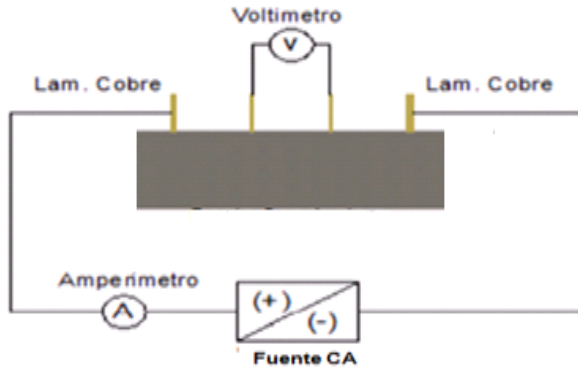


Figura 3. Arreglo conductividad

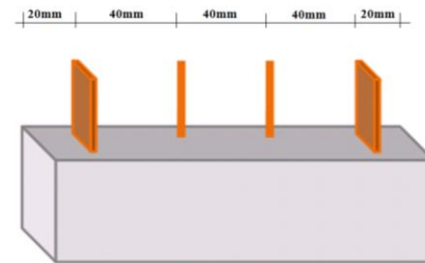


Figura 4. Colocación de alambres y placas.

- **Proporcionamiento de las mezclas para pruebas de resistencia a la compresión:**

Para las pruebas de resistencia a la compresión se elaboraron especímenes de 50x50x50mm con polvo de coque en porcentaje desde 10-100%, se hicieron cuatro grupos con respecto a los cuatros diferentes tamaños de partícula, las proporciones se hicieron con respecto al peso del cemento, lo anterior se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Dosificación para los diferentes tamaños de partícula (*Granulometría de Arena Bien Graduada(G-ABG), Retenido Malla 100 (R-M-100), Retenido Malla 200 (R-M-200) y Pasa malla 200(P-M-200)*).

Grupos	Especímenes	Peso Cemento(g)	Agua(ml)	% Coque	Peso Coque (g)
G-ABG	1	183.5	96.33	10%	18.35
	2	183.5	96.33	20%	36.7
	3	183.5	96.33	30%	55.05
R-M-100 (0.149mm)	4	183.5	96.33	40%	73.4
	5	183.5	96.33	50%	91.75
	6	183.5	96.33	60%	110.1
R-M-200 (0.74mm)	7	183.5	96.33	70%	128.45
	8	183.5	96.33	80%	146.8
P-M-200 (0.74mm)	9	183.5	96.33	90%	165.15
	10	183.5	96.33	100%	183.5

Los ensayos de resistencia a la compresión se hicieron durante la etapa de curado a los 7, 14 y 28 días, para lo cual se utilizó la **Máquina automática Pilot 4 ASTM 2000 kN (200 Ton)**.

RESULTADOS

En la figura 5 se muestra el difractograma de la partícula de coque en el cual se aprecia que el elemento más abundante es el carbón. La figura 6 se observan las micrografías del coque donde podemos observar que tiene formas angulares característico de un material triturado.

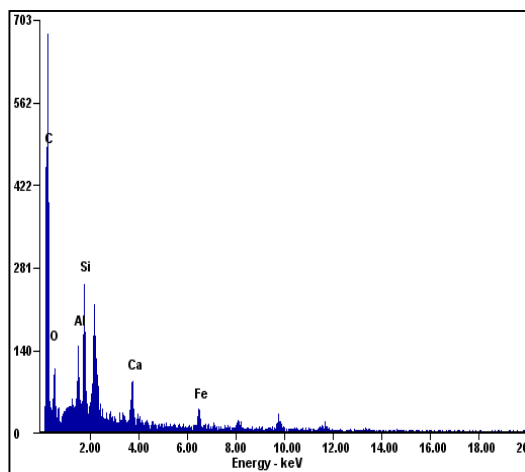


Figura 5. Difractograma de partícula de coque

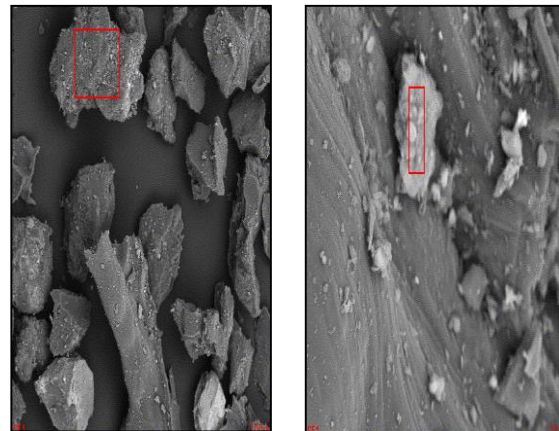


Figura 6. Micrografías de partícula de coque a

Los resultados obtenidos en la presente investigación se pueden observar en las siguientes figuras de la 7 a la 12, lo cual nos muestra que la adición del material carbonoso (coque) modifica la pasta haciéndola más conductora. En las figuras de la 7 a la 10 se encuentran graficados los resultados de las mediciones de conductividad durante la etapa de curado de los 4 diferentes tamaños de partícula en sus diferentes proporciones; En la figura 7 podemos observar que la conductividad más alta al final de la etapa de curado fue de 0.00102 S/cm para los especímenes con el 10% de coque y un tamaño de partícula de arena bien graduada mayor a la del espécimen control que no contiene coque el cual tuvo una conductividad de 0.00086 S/cm, para los especímenes de tamaño de partícula retenido en la malla 100 las conductividades más altas se obtuvieron en los porcentajes de adición del 100% y 40% ya que obtuvieron 0.001398 S/cm y 0.001320 S/cm respectivamente lo cual lo podemos ver en la figura 8, cabe destacar que en este tamaño de partícula fue en el que se obtuvo la mayor conductividad de los diferentes grupos la del 100% de coque retenido en la malla 100 con 0.001398

S/cm; en la gráfica 9 el espécimen con mejor conductividad fue el adicionado con coque en tamaño de partícula retenido en la malla 200 al 10% con un valor de conductividad de 0.001199 S/cm y para la gráfica 10 el mayor valor de conductividad se encontró con la adición del 60% obteniéndose un valor de 0.001080 S/cm.

En las figuras 11 y 12 se encuentran graficados los dos valores de conductividad más altos con respecto a los cuatro tamaños de partícula en sus diferentes proporciones, secos en horno; en la figura 11 se observa el valor más grande de 0.03561 S/cm obtenido con la adición del 100% en tamaño de partícula que pasa la malla 200 y en la figura 12 está ubicado el segundo valor más alto este es de 0.03112 S/cm obtenido con el 60% de adición de coque con tamaño de partícula retenido en la malla 100; ambos valores los comparamos con el control que obtuvo un valor de 0.02536 S/cm.

En cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión, se observan en las gráficas de la 13 a la 16 que los especímenes adicionados con coque en los diferentes tamaños de partícula al menos un porcentaje está por arriba del control que obtuvo 34.69 MPa los del grupo de tamaño de partícula de arena bien graduada con el 50% se obtuvieron 35.17MPa, en el tamaño de partícula que se retiene en la malla 100 con el 70% se obtuvieron 37.1MPa, para el tamaño de partícula que pasa la malla 200 el mayor resultado se obtuvo con adición del 90% obteniendo 38.73 MPa, la mayor resistencia a la compresión se obtuvo con el tamaño de partícula retenido en la malla 200 con el 70% de adición y fue de 39.31 MPa).

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CK	69.12	80.38
OK	15.07	13.16
AlK	02.92	01.51
SiK	05.74	02.85
CaK	03.20	01.11
FeK	03.95	00.99
Matrix	Correction	ZAF

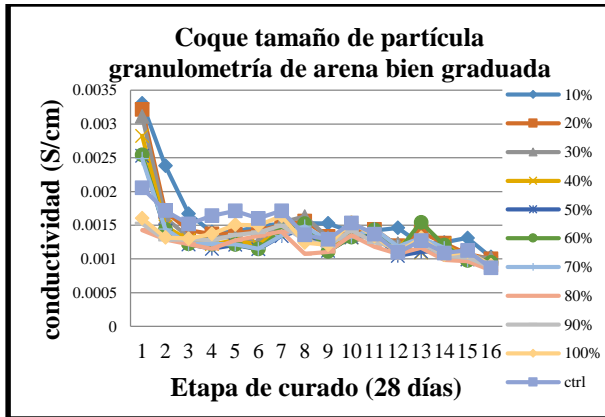


Figura 7. Grafica de conductividad para el tamaño de partícula de coque de arena bien graduada.

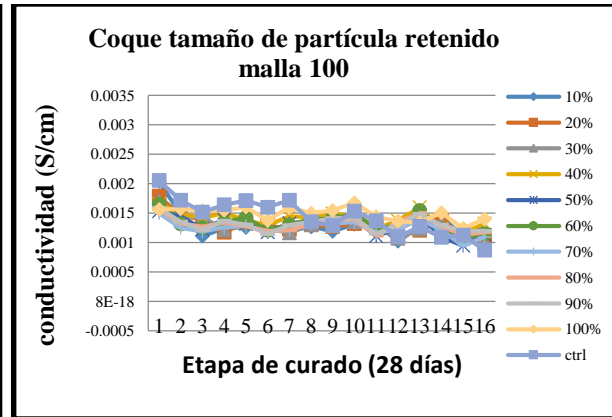


Figura 8. Grafica de conductividad para el tamaño de partícula de coque retenido en la malla 100 (0.149mm).

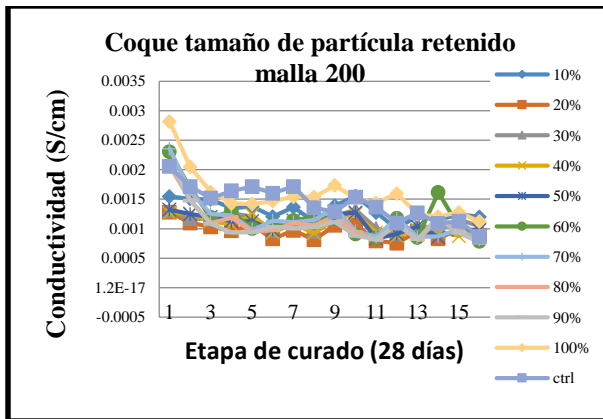


Figura 9. Grafica de conductividad durante la etapa de curado para el tamaño de partícula de coque retenido en la malla 200 (0.074mm).

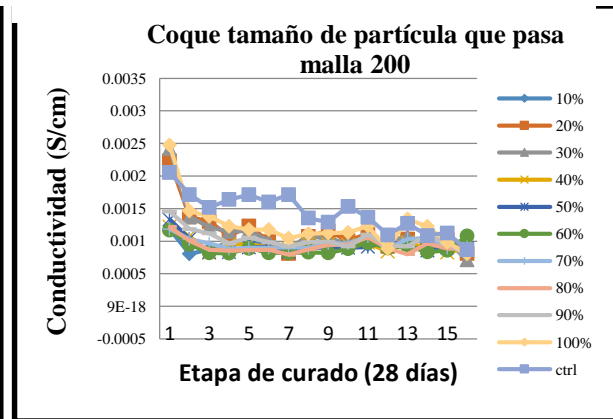


Figura 10. Grafica de conductividad para el tamaño de partícula de coque que pasa la malla 200 (0.074mm).

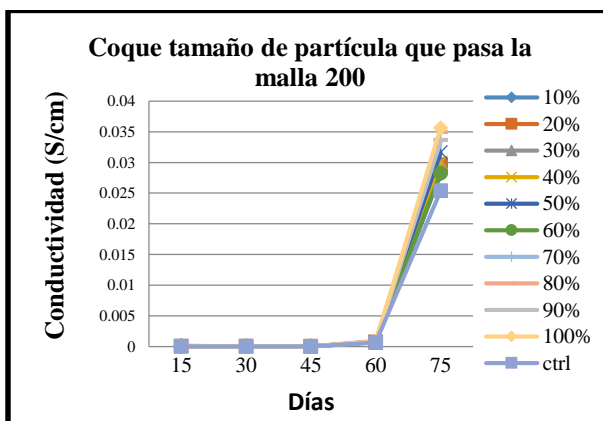


Figura 11. Grafica de conductividad especímenes secos en horno para el tamaño de partícula de coque que pasa la malla 200 (0.074mm).

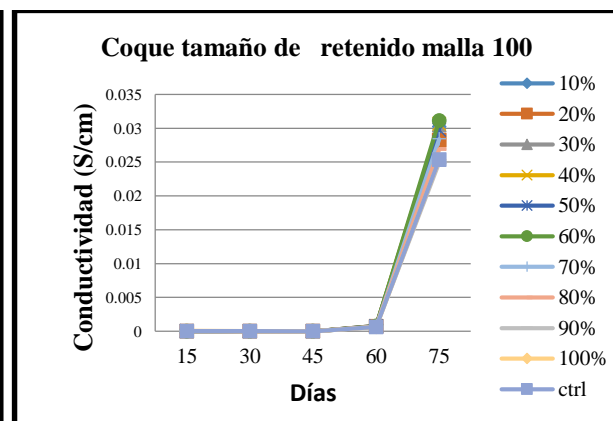


Figura 12. Grafica de conductividad especímenes secos en horno para el tamaño de partícula de coque retenido en la malla 100 (0.149mm).

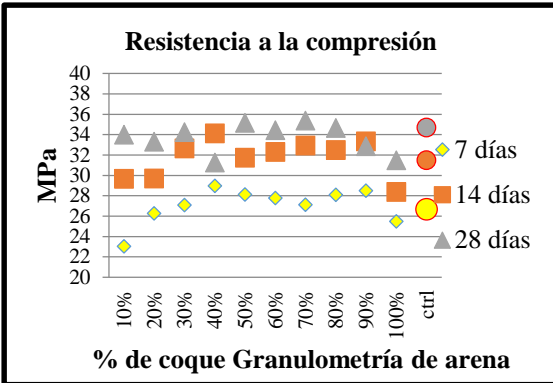


Figura 13. Grafica de resistencia a la compresión durante la etapa de curado a los 7, 14 y 28 días en porcentajes de 10-100% para coque tamaño de partícula de arena bien graduada.

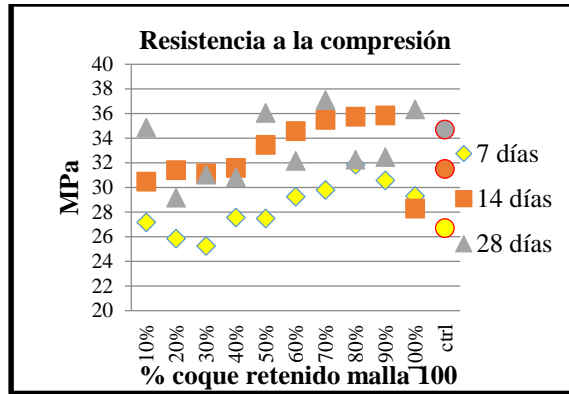


Figura 14. Grafica de resistencia a la compresión durante la etapa de curado a los 7, 14 y 28 días en porcentajes de 10-100% para coque tamaño de partícula retenido en la malla 100.

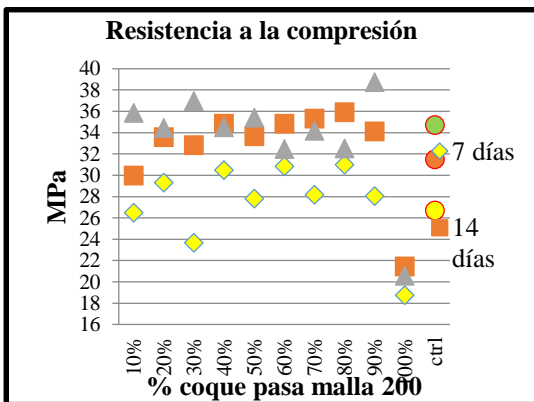


Figura 15. Grafica de resistencia a la compresión durante la etapa de curado a los 7, 14 y 28 días en porcentajes de 10-100% para coque tamaño de partícula que pasa la malla 200.

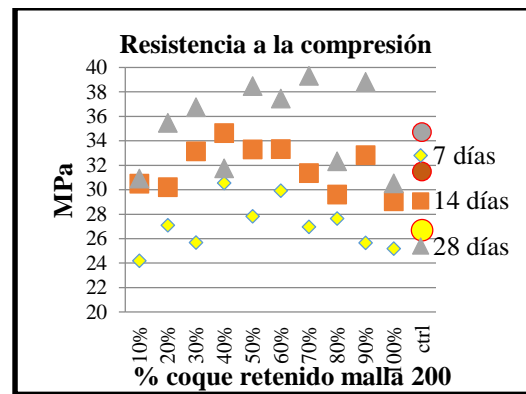


Figura 16. Grafica de resistencia a la compresión durante la etapa de curado a los 7, 14 y 28 días en porcentajes de 10-100% para coque tamaño de partícula retenido en la malla 200.

CONCLUSIONES

La adición de coque en los diferentes especímenes incremento la conductividad, en la pasta cemento conductora, en la etapa de curado se incremento de 0.00086 S/cm a 0.001398 S/cm en comparación con el espécimen control, para el espécimen con 100% de adición de coque de tamaño de partícula retenido en la malla 100, al mismo tiempo se observo que en todos los tamaños de partícula había cuando menos un espécimen por arriba del control, la conductividad más alta se alcanzó en el grupo de tamaño de partícula retenido en la malla 100(0.149mm), con un valor de 0.001398 S/cm en cuanto a los especímenes medidos durante la etapa de curado, para los especímenes medidos secos en horno la mayor conductividad estuvo con el tamaño de partícula que pasa la malla 200(0.074mm) con un valor de 0.03561 S/cm. En cuanto a la resistencia a la compresión se obtuvieron valores mayores que el espécimen control en todos los tamaños de

partícula destacando el que se adiciono al 70% de tamaño de partícula retenido en la malla 200(0.74mm), con 39.31 Mpa.

REFERENCIAS

[1] D. D. L. Chung “Multifunctional cement-based materials”, Marcel Dekker Inc. New York, 2004

[2] D. D. L. Chung “Functional Properties of Cement-Matrix Composites”, J. Mater, Sci. 36, 1315-1324, 2001

[3]P. Garcés, L. Andión, Memorias 3er Congreso Nacional ALCONPAT, ISBN 978-607-95042-0-5, Chihuahua, México (2008).

[4] Barrios-Durtewitz C. et al, “Electrical Percolation Threshold in a Conductive Cement Paste with Carbon Fiber”, NACE INTERNATIONAL, (2010).

[5] Wen, S. y Chung, D., Partial Replacement of Carbon Fiber by Carbon Black in Multifunctional Cement–matrix Composites. Carbon, vol. 45, 505–513 (2007).

ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA DE PASTAS DE CEMENTO: ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE RELACIÓN A/C, CENIZA VOLANTE Y SUPERPLASTIFICANTE

P. Pérez-Cortes¹, P. Montes-García²

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Estudiante de la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Calle Hornos No. 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, CP 71230, Oaxaca, México, email: pperezc1400@alumno.ipn.mx.

² Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Profesor Investigador. Calle Hornos No. 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, CP 71230, Oaxaca, México, email: pmontes@ipn.mx.

RESUMEN

El mini-cono de revenimiento es una prueba que se utiliza para evaluar la extensibilidad de pastas de cemento en estado fresco. Estudios previos establecen una relación inversa entre el área relativa de flujo (ARF) obtenida en esta prueba y el esfuerzo de fluencia (τ_0) obtenido en una prueba reológica. En la presente investigación, se estimó el τ_0 de pastas utilizando una versión modificada de la relación anterior. Se elaboraron 20 pastas simples con cinco relaciones agua/cemento (a/c) y cuatro concentraciones de superplastificante (SP), y 80 pastas binarias con cinco a/c, cuatro concentraciones de SP y cuatro porcentajes de ceniza volante (CV). Los τ_0 estimados permiten apreciar la interacción entre los factores estudiados.

Palabras claves: Área relativa de flujo, ceniza volante, esfuerzo de fluencia, mini-cono, reología.

ABSTRACT

The mini-slump cone test is used to evaluate the extensibility of cement pastes in their fresh state. Previous studies established an inverse relationship between the relative flow area (RFA) obtained from that test and the yield stress (τ_0) obtained from a rheological test. In the present research, the τ_0 of pastes were estimated using a modified version of the previous relationship. Twenty simple pastes were prepared considering five different water/cement ratios (w/c) and four dosages of superplasticizer (SP), and 80 binary pastes including five w/c, four dosages of SP and four percentages of fly ash (FA). The estimated τ_0 allow note the interaction between the studied factors.

Keywords: Fly ash, mini-slump cone, relative flow area, rheology, yield stress.

INTRODUCCIÓN

La trabajabilidad es una propiedad indispensable en el concreto hidráulico. Este material debe, en estado fresco, poseer ciertas propiedades de flujo, de manera que pueda ser transportado, colocado, compactado y acabado¹. Dichas propiedades de flujo

son definidas por el esfuerzo de fluencia (τ_0) la viscosidad, y pueden ser descritas por la reología².

La interacción entre los materiales puede causar variaciones amplias en la trabajabilidad, las cuales dependen de los materiales específicos y las proporciones usadas^{3,4}. Los aditivos afectan principalmente el comportamiento del flujo de la pasta de cemento sin alterar la composición o el comportamiento de los agregados, por lo que es razonable seleccionar los aditivos químicos y minerales sólo probando la pasta de cemento³. El estudio del flujo de pastas se realiza con un reómetro; sin embargo, éste no está ampliamente disponible en la industria de la construcción, debido a que el instrumento es relativamente caro. Por esta razón, es conveniente utilizar pruebas más sencillas que permitan estimar parámetros del flujo de la pasta.

Estudios previos relacionan parámetros de flujo, obtenidos mediante pruebas de reología, con valores obtenidos en pruebas empíricas^{3, 5-11}. Recientemente, Jiménez-Quero, et al. (2013)⁸ realizaron comparaciones entre pruebas reológicas y del mini-cono. Utilizaron pastas de cemento que contenían cinco concentraciones de SP en sistemas simples y tres niveles de CV en sistemas binarios. En todos los casos, la a/c se mantuvo constante en 0.5. Establecieron una relación inversa entre el τ_0 obtenido de las pruebas reológicas, y el ARF, obtenido de la prueba del mini-cono. Encontraron que valores altos de τ_0 corresponden a valores bajos de ARF; en consecuencia, propusieron una ecuación que correlaciona los valores obtenidos de τ_0 y ARF en las diferentes pastas de cemento. Sin embargo, los datos utilizados en esa investigación son susceptibles a un análisis más profundo; esto debido a que frecuentemente, las pastas en un sistema binario tienen un comportamiento de flujo diferente al de un sistema simple^{3, 12}.

El presente estudio estima el τ_0 de pastas de cemento en sistemas simples y binarios a partir de resultados de extensibilidad utilizando la expresión modificada⁸. Se analiza el efecto interactivo entre las diferentes a/c, los porcentajes de CV y las concentraciones de SP.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Jiménez-Quero, et al. (2013)⁸ proponen en una investigación previa una ecuación general para estimar el τ_0 en pastas de cemento con base en lecturas de extensibilidad (Ec. 1 en la Figura 1). En donde: τ_0 es el esfuerzo de fluencia en pascales (Pa) y ARF es el área relativa de flujo en milímetros cuadrados (mm²).

El coeficiente de determinación de la ecuación (1) es muy alto; sin embargo, si los datos de esa investigación se analizan separando las pastas como sistemas simples y binarios, se obtienen las ecuaciones 2 y 3, las cuales también tienen coeficientes de determinación altos.

En la presente investigación, las ecuaciones 2 y 3 se utilizaron para estimar los τ_0 de pastas sin y con CV, en sistemas simples y binarios, respectivamente.

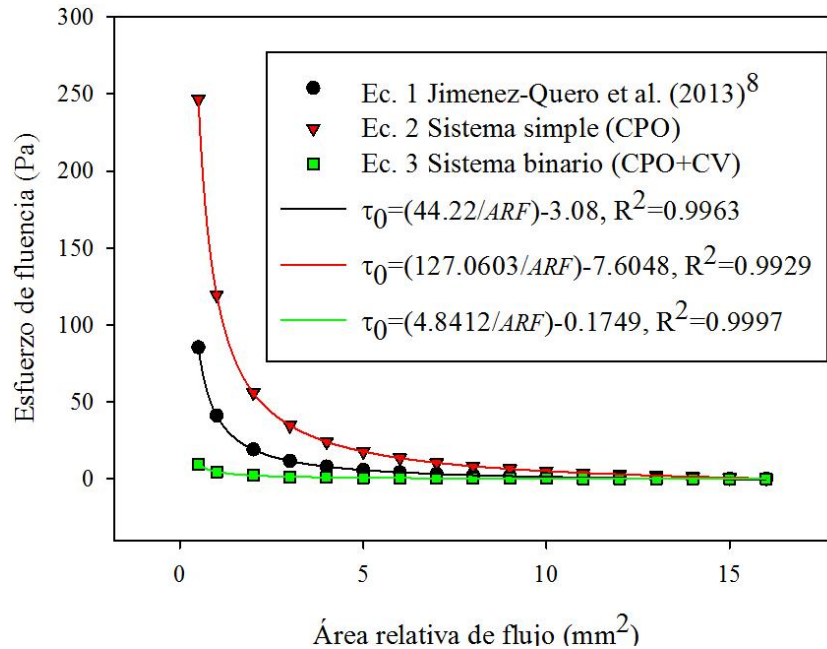


Figura 1. Análisis de correlación entre ARF y τ_0 en pastas de sistemas simples y binarios

Diseño del experimento

Se elaboraron 20 pastas de cemento para el sistema simple y 80 para el binario. Los factores fueron la a/c, la concentración de SP y el porcentaje de CV (Tabla 1). Se determinaron las ARF de las pastas mediante la prueba del mini-cono, y posteriormente se estimaron sus τ_0 utilizando las ecuaciones 2 y 3, para las pastas que no contenían y que sí contenían adiciones minerales, respectivamente. Finalmente, se analizaron las interacciones entre los factores.

Tabla 1. Diseño experimental

Factores	Niveles	Tipo de mezclas	No. de mezclas
Relación agua/cemento	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7	Simple, Solo CPO (5 a/c)	5
Concentración de superplastificante (ml/kg de material cementante)	0, 4.5, 7.25, 10.0	Simple, CPO+SP, (5 a/c x 3 conc. de SP)	15
Reemplazo de CV (%)	0, 10, 20, 30, 40	Binaria, CPO+CV, (5 a/c x 4 porcentajes de CV)	20
		Binaria, CPO+CV+SP, (5 a/c x 4 porcentajes de CV x 3 conc. de SP)	60
Total de mezclas			100

Materiales y métodos

Los materiales empleados fueron agua potable, cemento portland ordinario (CPO), SP y CV. El CPO fue de la marca Tolteca del tipo CPO 30, según la clasificación de la Norma NMX-C-414-ONNCCE-1999. El SP fue de la marca Admix Tech base policarboxilatos con una densidad igual 1.1 g/cm^3 y cumple con los requisitos de ASTM 494, tipo F y D, con un contenido de sólidos del 50% en peso. En cuanto a la CV, se utilizó la marca Admix Tech Fly Ash clase F según la ASTM C 618. Se determinó la composición química de los materiales cementantes, así como su morfología y distribución de tamaños de partícula (DTP) (figura 2). La morfología se realizó mediante el empleo de un microscopio electrónico de barrido de alto vacío JEOL® modelo JSM-6490LV; mientras que la DTP se llevó a cabo con la técnica de difracción de rayos láser. La prueba se realizó por vía húmeda empleando un analizador de partículas tri-láser marca MICROTRAC® modelo S3500.

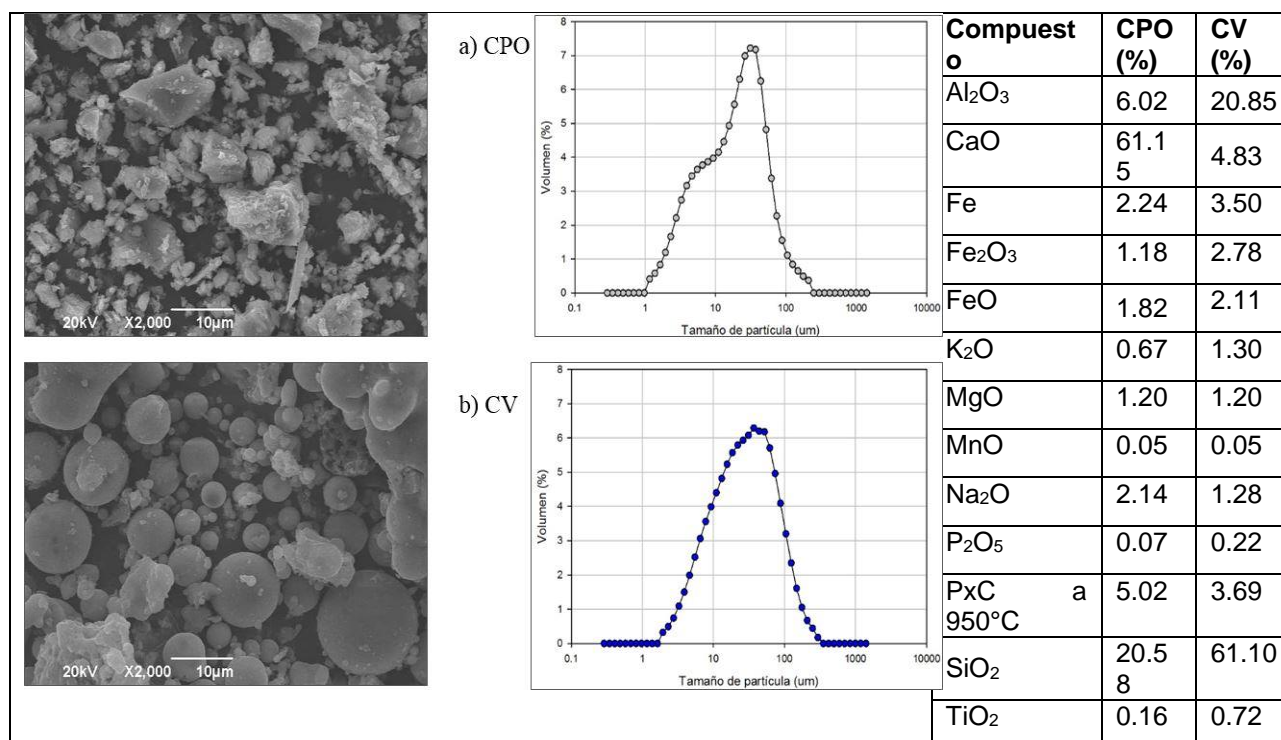


Figura 2. Morfología, distribución de tamaños de partículas y composiciones químicas del CPO y la CV

Se utilizó la prueba del mini-cono de acuerdo con la propuesta de Kantro¹³ para evaluar la extensibilidad de las pastas (figura 3). Mientras que para calcular las ARF, se usó la ecuación propuesta por Okamura y Ouchi¹⁴.

$$ARF = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \dots \dots \dots (4)$$

En donde: d_0 es el diámetro del molde en milímetros (mm), y d_1 y d_2 son los diámetros obtenidos de la prueba, también en milímetros (mm).



Figura 3. Prueba del mini-cono y medición de los diámetros d_1 y d_2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 4 muestra los resultados de las ARF obtenidas y los τ_0 estimados en las pastas del sistema simple con concentraciones de SP de 0, 4.5, 7.25 y 10 ml/kg de material cementante (incisos a y b), y del sistema binario sin SP con porcentajes de CV de 0, 10, 20, 30 y 40% (incisos c y d). En el inciso b, se ajustó la escala a fin de realizar el análisis comparativo con los τ_0 del inciso d. La figura 4a muestra que cuando se incrementa la a/c aumentan las ARF. De la misma forma, cuando se incrementa la dosis de SP también aumentan las ARF. Un comportamiento similar se observa para los τ_0 estimados. En la figura 4b, se observa que la combinación de 0 ml de SP y menor a/c genera los más altos τ_0 . Sin embargo, los valores más bajos de τ_0 no necesariamente corresponden a la mayor cantidad de SP y a la mayor a/c. Los resultados indican que tanto la concentración de SP como la a/c afectan la fluidez de las pastas; no obstante, se observa un efecto más significativo del SP. En las pastas con a/c de 0.3 ó 0.4 y sin SP, prácticamente no se generan ARF y los τ_0 toman valores muy altos; no obstante, cuando se adiciona SP, las ARF tienden a crecer y los τ_0 a disminuir con el incremento de la concentración de SP. Estos resultados son congruentes con lo demostrado en investigaciones recientes^{4, 11}.

La figura 4c muestra que cuando se incrementa la a/c aumentan las ARF. En cambio, es difícil apreciar alguna variación con los diferentes niveles de CV. En la figura 4d, se observa un comportamiento similar al de la figura 4c. No obstante, en la figura 4d se observa que la adición de CV reduce los τ_0 , aunque no se aprecian cambios en este parámetro al variar los porcentajes de CV. Por ejemplo, los mayores τ_0 , ubicados en las a/c de 0.3 y 0.4 con 0% de CV, disminuyen con la adición de CV pero no se aprecian cambios en los diferentes porcentajes de CV. La falta de apreciación se atribuye a que la fluidez de estas pastas es gobernada por el contenido de agua.

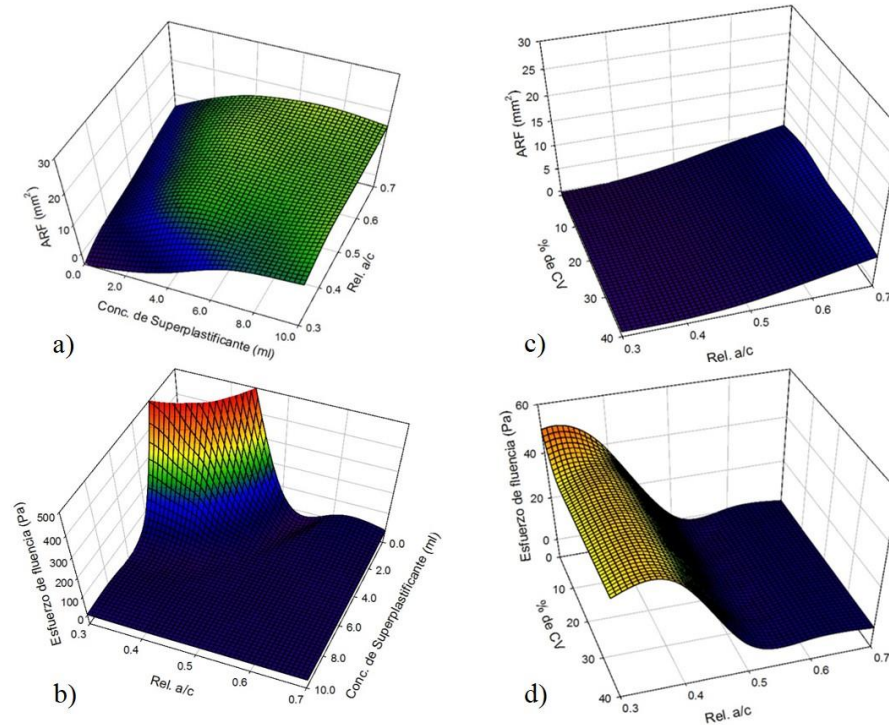


Figura 4. ARF obtenidas y τ_0 estimados en pastas; a) y b) sistema simple con concentraciones de SP de 0, 4.5, 7.25 y 10 ml/kg cemento; c) y d) sistema binario con porcentajes de CV de 0, 10, 20, 30 y 40% y sin SP.

Al comparar los τ_0 obtenidos en el sistema simple con los obtenidos en el sistema binario (incisos b y d), se observan valores distintos en las pastas que contienen 0 ml de SP y 0% de CV aun cuando las ARF son similares. Estas diferencias son más visibles en las ARF cercanas a cero, es decir, cuando la pasta prácticamente no fluye debido a que el esfuerzo producido por su peso es menor que el τ_0 y se asume un comportamiento parecido al de un sólido.

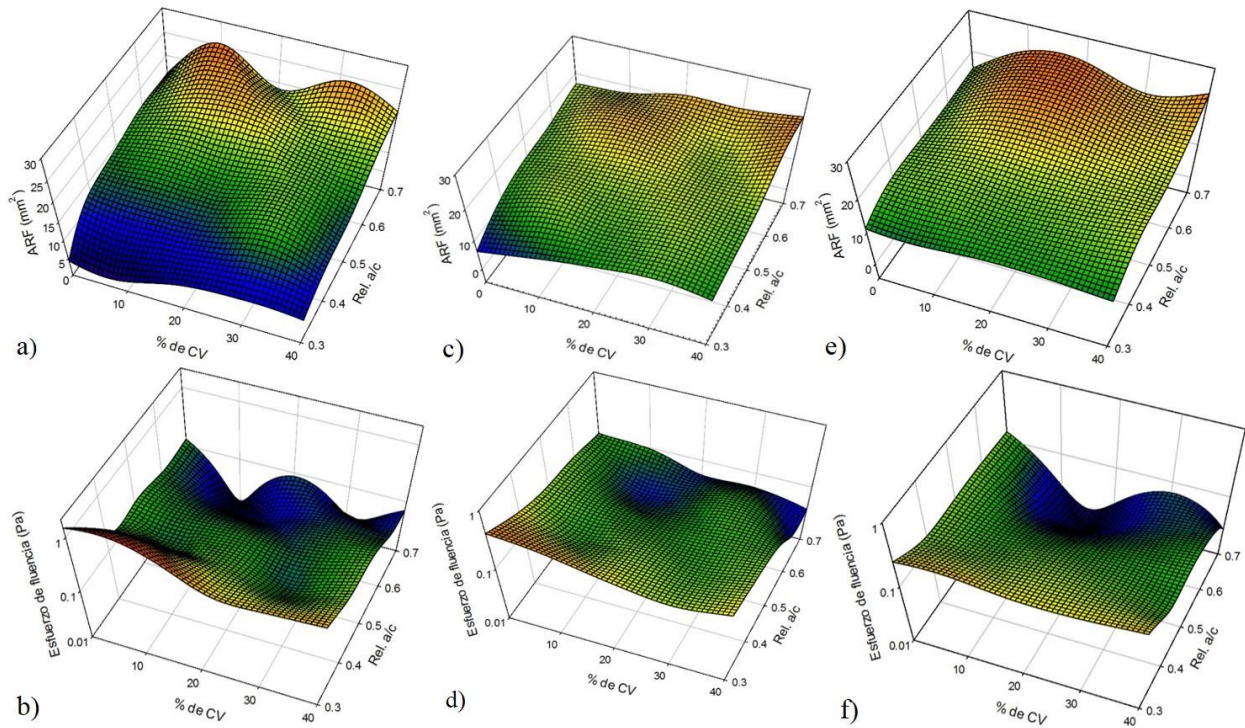


Figura 6. ARF obtenidas y esfuerzos de fluencia estimados en pastas de sistemas binarios con diferentes concentraciones de SP. a) y b) 4.5 ml de SP, c) y d) 7.25 ml de SP, e) y f) 10 ml de SP.

La figura 5 muestra los resultados de las ARF obtenidas y los τ_0 estimados en las pastas del sistema binario con los porcentajes de CV de 0, 10, 20, 30 y 40%; a/c de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7, y dosis de SP de 4.5, 7.25 y 10 ml/kg de material cementante. En los incisos a, c y e, se observa que cuando se incrementa la a/c aumentan las ARF. También se observa que la adición de CV aumenta las ARF. No obstante, se observan efectos interactivos entre a/c y CV. Un comportamiento similar se observa en los incisos b, d y f; aunque en estas figuras es más apreciable la interacción entre a/c y CV. El inciso b muestra que la combinación de 4.5 ml de SP con 0.3 de a/c y 0% de CV genera el valor más alto de τ_0 . En esta misma a/c, la adición de CV reduce los τ_0 , encontrándose el valor más bajo en un porcentaje de reemplazo de CV de 20%. Las a/c mayores también muestran que la adición de CV reduce los τ_0 aunque los menores se ubican en porcentajes de CV de 30% para las a/c de 0.4 y 0.5, y 10% para las de 0.6 y 0.7. Al parecer, todas las a/c con porcentaje de 40% de CV tienden a disminuir las ARF e incrementar los τ_0 en las pastas. En el inciso d, se muestra un comportamiento similar al inciso b. La combinación de 7.25 ml de SP con 0.3 de a/c y 0% de CV genera el más alto τ_0 . También, la adición de CV reduce los τ_0 de forma diferente en las distintas a/c. En las a/c de 0.3, 0.4 y 0.5 los menores se ubican en un porcentaje de 30%, en la a/c de 0.6 en 10% y en la a/c de 0.7 en 20%. Al igual que el inciso b, el porcentaje de CV de 40% tiende a disminuir las ARF e incrementar los τ_0 en las pastas. Por su parte, el inciso f muestra que 10 ml de SP en combinación con 0.3 de a/c y porcentajes de CV de 0 y 40% generan

los más altos τ_0 . El valor más bajo de τ_0 en esta a/c se obtiene con 20% de CV. Este porcentaje de CV genera en todas las demás a/c los más bajos τ_0 , encontrándose los más pequeños en combinación con las a/c de 0.6 y 0.7. En todas las a/c se aprecia que el incremento de CV de 30 y 40% tiende a incrementar los τ_0 .

De acuerdo con los resultados, los tres factores estudiados afectan la fluidez de las pastas, solo que en diferente medida. En primer lugar, la adición del SP mejora la habilidad para fluir reduciendo la fricción entre partículas y disponiendo un mayor contenido de agua libre en la mezcla. Esto es atribuido a su repulsión histérica, la cual provoca una acción dispersiva en las partículas del cemento que dificulta su floculación y las dispersa uniformemente⁴. No obstante, estudios previos como el de Safiuddin, West y Soudki¹⁵ sugieren el uso de dosis de SP por debajo del nivel de saturación a fin de mejorar la uniformidad de las mezclas sin provocar cualquier forma de segregación. En segundo lugar, el incremento de la a/c aumenta la fluidez debido a que genera mayor contenido de agua en la mezcla, lo cual disminuye la cohesión y aumenta el espaciamiento entre partículas¹¹. En tercer lugar, la adición de CV mejora la fluidez al reducir la fricción entre partículas. En la figura 2, las micrografías muestran formas esféricas en las partículas de CV, y angulares y prismáticas en las de CPO. Estas propiedades de la CV probablemente son las responsables del “efecto cojinete” en las pastas^{8, 16}. Este efecto es atribuido a la forma globular de las partículas de CV, las cuales actúan como esferas que reducen la fricción entre las partículas angulares y prismáticas del CPO.

CONCLUSIONES

Las ecuaciones propuestas son útiles para estimar los esfuerzos de fluencia en las pastas de cemento hidráulico que contienen superplastificante y ceniza volante. Sin embargo, el uso de dichas ecuaciones se limita a pastas capaces de fluir por su propio peso, debido a que cuando en la prueba del mini-cono no se genera área relativa de flujo o el valor de este es cercano a cero se asume un comportamiento parecido al de un sólido, lo cual provoca un crecimiento indeterminado en los esfuerzos de fluencia estimados.

Tanto la relación agua/cemento como la concentración de superplastificante tienen un efecto directo en la fluidez de las pastas. El incremento de estos factores aumenta el área relativa de flujo y disminuye el esfuerzo de fluencia. No obstante, es más significativo el efecto del superplastificante debido a su repulsión histérica.

La sustitución parcial de cemento portland ordinario por ceniza volante mejora la fluidez en las pastas de cemento; sin embargo, en ausencia de superplastificante, su efecto es poco evidente debido a que en estas pastas, la fluidez es gobernada por el contenido de agua.

La combinación de ceniza volante y superplastificante mejora de forma significativa la fluidez de las pastas. Además, existen interacciones entre estos factores en las diferentes relaciones agua/cemento. Los porcentajes de ceniza de 10 y 20% en combinación con superplastificante incrementan las áreas relativas de flujo y disminuyen los esfuerzos de fluencia; mientras que porcentajes mayores tienden a disminuir las áreas relativas de flujo e incrementar los esfuerzos de fluencia. Las pastas que contienen la combinación de 20% de CV y 10 ml de superplastificante presentan buenas propiedades de fluidez; además, esta combinación genera una interacción uniforme en todas las relaciones agua/cemento.

REFERENCIAS

1. S. T. Erdoğ an, N. S. Martys, C. F. Ferraris and D. W. Fowler, "Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension", *Cement and Concrete Composites* 30, 5 (2008): pp. 393-402.
2. O. H. Wallevik and J. E. Wallevik, "Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes", *Cement and Concrete Research* 41, 12 (2011): pp. 1279-1288.
3. C. F. Ferraris, K. H. Obla and R. Hill, "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", *Cement and Concrete Research* 31, 2 (2001): pp. 245-255.
4. M. Şahmaran, Z. Bilici, E. Ozbay, T. K. Erdem, H. E. Yucel and M. Lachemi, "Improving the workability and rheological properties of engineered cementitious composites using factorial experimental design", *Composites Part B: Engineering* 45, 1 (2013): pp. 356-368.
5. A. Gram, J. Silfwerbrand and B. Lagerblad, "Obtaining rheological parameters from flow test — analytical, computational and lab test approach", *Cement and Concrete Research* 63, 0 (2014): pp. 29-34.
6. N. Roussel, "Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 39, 288 (2006): pp. 288, 501-509.
7. A. W. Saak, H. M. Jennings and S. P. Shah, "A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow", *Cement and Concrete Research* 34, 3 (2004): pp. 363-371.
8. V. G. Jiménez-Quero, F. M. León-Martínez, P. Montes-García, C. Gaona-Tiburcio and J. G. Chacón-Nava, "Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars", *Construction and Building Materials* 40, 0 (2013): pp. 691-701.
9. A. Bouvet, E. Ghorbel and R. Bennacer, "The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study", *Cement and Concrete Research* 40, 10 (2010): pp.1517-1523.

10. N. Roussel, C. Stefani and R. Leroy, "From mini-cone test to abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests", *Cement and Concrete Research* 35, 5 (2005): pp. 817-822.
11. A. K. H. Kwan and W. W. S. Fung, "Roles of water film thickness and sp dosage in rheology and cohesiveness of mortar", *Cement and Concrete Composites* 34, 2 (2012): pp. 121-130.
12. E. Tellez-Girón, A. N. Martín-Acosta, A. Pérez-Hernandez and U. Verdecia-Rodriguez, "Reología, comportamiento físico-mecánicos y de durabilidad de hormigones con nanosílice", *Revista ALCONPAT* 2, 2 (2012): pp. 85-92.
13. D. L. Kantro, "Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste, a miniature slump test", *Cement, Concrete and Aggregates CCAGDP* 2, 2 (1980): pp. 95-102.
14. H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, 1 (2003): pp. 5-15.
15. M. Safiuddin, J. S. West and K. A. Soudki, "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash", *Construction and Building Materials* 25, 2 (2011): pp. 973-978.
16. A. K. H. Kwan and J. J. Chen, "Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste", *Powder Technology* 234, 0 (2013): pp. 19-25.

REDUCCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIANTE LA ADICIÓN DE UN CO-POLÍMERO A MICRO-MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND CON CENIZA VOLANTE.

J. K. Campos^A, A. Durán^{AB}, P. Valdez^{AB} and D.P. Bentz^C.

^A Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N.L., 66450 México.

^B Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT)

^C Materials and Structural Systems Division, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Stop 8615, Gaithersburg, MD 20899 USA.

ABSTRACT

In this study, different Portland cement-based mortars with type F fly ash were evaluated, using as unique aggregate a micro-copolymer with average size of 80 micrometers, the water/binder ratios used was 0.4, 0.5 and 0.6, for which compressive strength was measured and thermal conductivity was determined by the Transient Plane Source Technique (TPS). The thermal optimization of the mortar led to minimum values of 0.16 and 0.31 W/(m·K) for the dry and saturated conditions respectively, this value represent a decrease of around 70% compared with the reference paste or control for its respectevly wáter/cement ratio. In comparison with a commercial cellular concrete, the reduction was about 33% for saturated samples; meanwhile, the dry samples presented an increase of 23%.

RESUMEN

En este estudio, se evaluaron diferentes morteros base de cemento Portland con ceniza volante tipo F según ASTM C 618, usando como único agregado un copolímero de tamaño promedio 80 μm , las relaciones agua/cementante utilizadas fueron 0.4, 0.5 y 0.6, las propiedades evaluadas fueron resistencia a compresión y conductividad térmica mediante la técnica de fuente de plano transitorio (TPS). La optimización térmica del mortero condujo a la obtención de valores mínimos de conductividad térmica de 0.16 y 0.31 W/mK para las condiciones seca y saturada respectivamente, este valor representa una disminución de alrededor del 70% comparado con la pasta de referencia o control respectiva a su relación a/c. En comparación con un hormigón celular comercial la reducción del valor de la conductividad térmica fue de alrededor de un 33% para las muestras saturadas, por su parte las muestras secas presentaron un aumento del 23% en este valor.

Palabras clave: conductividad térmica; ceniza volante; co-polímero; micro morteros.

INTRODUCCIÓN

Uno de los términos más utilizados para definir la capacidad aislante de un material sólido por mecanismo de transferencia denominado conducción es la conductividad térmica (k), esta propiedad intrínseca del material representa la cantidad de energía en forma de calor que puede ser transmitido a través del mismo. En el caso de materiales compuestos como los base cemento portland ya sean concreto o mortero, la conductividad térmica es sumamente dependiente del material con mayor volumen en la mezcla, como se sabe el concreto está conformado en casi un 70-80% por agregado (1), lo que trae como consecuencia que las propiedades termicas del compuesto se vean en gran manera influenciadas por las características del agregado. Existen también otros factores que pueden influenciar considerablemente la conductividad térmica como la estructura porosa, contenido de humedad del material, temperatura al momento de la prueba, grado de cristalinidad del agregado, entre otras (2,3).

Con respecto al tipo de agregado utilizado, es reportado en la literatura que el remplazo de materiales convencionales por materiales de peso ligero como el corcho, pumicita, arcilla expandida, poli-estireno trae consigo una reducción de la conductividad térmica de compuesto, lo que es atribuible a la estructura porosa y en algunos casos su grado de amorficidad (4-7). En otras investigaciones se ha reportado que el uso de materiales cementantes alternativos como la ceniza volante o el humo de sílice, reducen la conductividad térmica (8,9)

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un mortero ligero que posea una conductividad térmica reducida, al grado que resulte competitivo con similares actualmente comercializados como aislantes térmicos.

Justificación del Proyecto

En los últimos años, el aumento de la temperatura superficial en todo el mundo han sido un problema grave, en México esto es fenómeno notorio especialmente en la zona noreste del país (10-11). La predicción de las diferentes asociaciones como IPPC (12), CONAGUA (10) y INECC (13) es un aumento en el consumo de energía debido al aumento de sistemas de ventilación y unidades de climatización tener una temperatura de confort al interior de los edificios. Entre algunos de los esfuerzos para tratar de cambiar los futuros escenarios está el desarrollo de nuevos materiales aislantes, con conductividad térmica reducida, que puedan mejorar la calidad humana de vida.

Cabe mencionar que este estudio se basa en el concepto de transferencia de calor por conducción, y aunque la convección y radiación estén presentes la transferencia de energía por estos modos es de menor relevancia y que constituye, por otro lado se decidió estudiar el estado estacionario del sistema, sin tomar en cuenta parámetros como el calor específico y la difusividad, que son usados con mayor frecuencia en análisis de enfriamiento (no estacionarios), en los cuales se involucra el registro de la temperatura

en cada punto del sistema y en donde resulta mas difícil la comparación entre la capacidad aislante de los diferentes materiales evaluados.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Un total de 15 morteros con copolimero fueron evaluados en las diferentes etapas de esta investigación. La identificación de los mismos se muestra en la tabla 1. Esta investigación se llevó a cabo en dos etapas.

- a) Medición de la resistencia a la compresión a diferentes edades 3, 7 y 28 días, sobre especímenes cúbicos de 5x5 cm, sometidos a un régimen de curado estándar según la ASTM C 511 (14). De esta etapa se tomaron solo aquellas mezclas que cumplieron con el requisito de resistencia mínima (35 kg/cm^2) de acuerdo a la normativa NMX-C-441-ONNCCE-2005 (15) para proceder a la medición de su conductividad térmica, esto debido a que la fabricación de piezas de mampostería es la principal aplicación planeada para este tipo de morteros.

Análisis de la conductividad térmica para muestras cilíndricas (figura 1) en estado seco al horno a 100°C por 24h y para muestras en estado saturado superficialmente seco con agua destilada por 24h. La temperatura a la cual se llevaron a cabo los análisis fue 23°C . Las constantes térmicas utilizadas para medir la conductividad térmica por medio de la técnica de fuente de plano transitorio se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Identificación de las muestras evaluadas.

ID	w/cm	Contenido de CV % en masa	Copolimero % en volumen	Densidad (kg/m ³)	
1A	0.6	0	43	615	
1B			45	---	
1C			47	---	
1A-CV1		25	43		621
1A-CV2					---
1A-CV3					---
1A-CV4					---
2A-CV2		0.5	35	43	637
2B-CV2	45			---	
2C-CV2	47			---	
2D-CV2	50			565	
3A-CV2	0.4	35	43	739	
3B-CV2			45	---	
3C-CV2			47	---	
3D-CV2			50	672	
H	Material aislante comercial				

Figura 1. Especímenes utilizados en el análisis de las propiedades térmicas.



Tabla 2. Constantes térmicas utilizadas en la medición de la conductividad térmica.

Técnica	TPS
Analizador	Hot disk
Sensor	5501 kapton
Poder, Watts	0.8
Tiempo, s	80
Profundidad de medición, mm	7-10
Temperatura de medición, °C	23±1
Descripción de especímenes	Cilíndricos de 8 cm diámetro y 2 cm ancho

RESULTADOS

Materiales utilizados

Cemento Portland Ordinario (OPC) de acuerdo a la NMX C 414 (16)/ cemento tipo 1 según ASTM C 150 (17) se utilizó para la fabricación de todas las mezclas; también ceniza volante tipo F según ASTM C 618 (18) se utilizó como material cementante suplementario del OPC en masa. Un co-polímero se utilizó como agregado; el tamaño de partícula estaba en el intervalo de 5 a 200 micrómetros como se muestra en el figura 2. Además un súper-plastificante (ASF) fue utilizado para mejorar la trabajabilidad de los diferentes morteros. Las propiedades físicas de los diferentes materiales se muestran en la tabla 3.

Figura 2. Distribución del tamaño de partícula de los materiales en polvo utilizados en la fabricación de los morteros

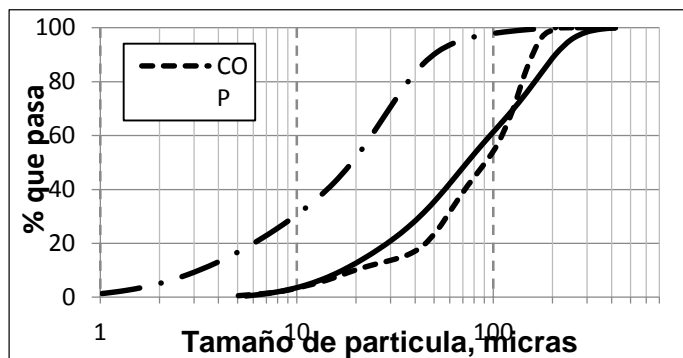


Tabla 3. Propiedades físicas de los diferentes materiales utilizados.

Material	Densidad (kg/m ³) ASTM C 188	Índice de actividad a la resistencia ASTM C 618 (18)	Tamaño de partícula promedio (µm)	Conductividad térmica (W/m K) por TPS,
OPC	3030	---	20	1.050
FA	2020	78%	70	0.816
COP	120 *	---	90	0.043
ASF	1090 *	---	---	---

*valor obtenido de ficha técnica del fabricante

Por otro lado en la figura 3 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los componentes por medio de difracción de rayos X, donde se puede observar que el material denominado copolímero posee un grado de amorficidad mayor que el de los otros materiales utilizados, lo que ha sido reportado como una característica de los materiales aislantes. Se tomaron también imágenes por microscopio óptico para justificar el bajo valor de conductividad térmica obtenido por medio de TPS que posee el copolímero que se muestra en la tabla 3, en la figura 4 se puede observar que este material está conformado por esferas huecas con aire en su interior, esto sugiere, que este es la principal razón de su naturaleza aislante, cabe mencionar que los análisis realizados para la obtención de la conductividad térmica del co-polímero se realizaron sobre el material y no solo sobre el compuesto polimérico.

Figura 3. Difracción de rayos para los diferentes materiales utilizados

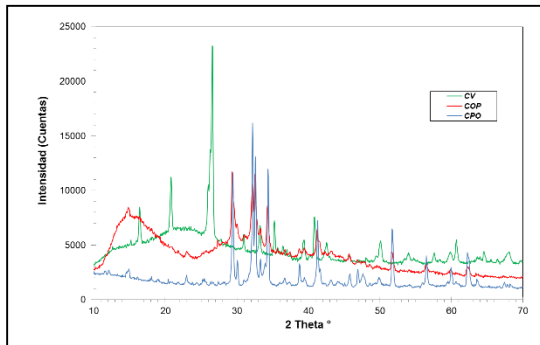
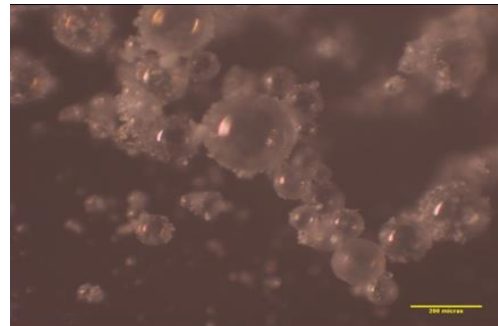
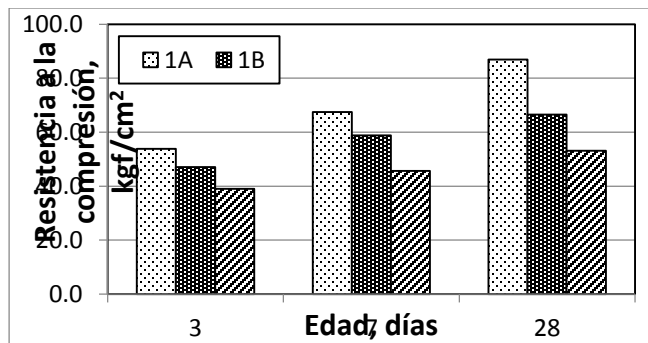


Figura 4. Imágenes por microscopio óptico del co-polímero



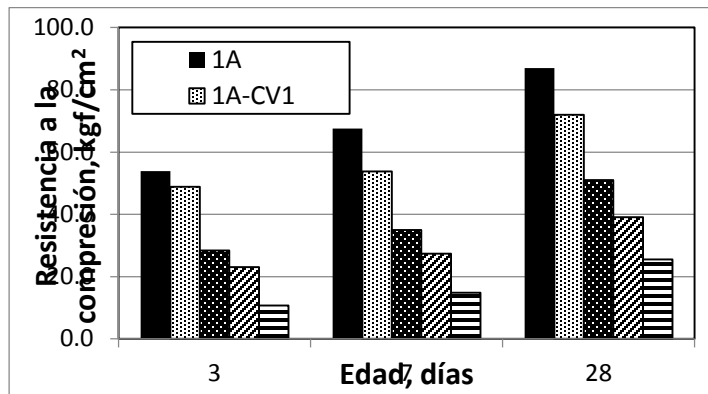
En la figura 5 se muestran los resultados de resistencia a la compresión de mezclas con co-polímero y sin ceniza volante para una relación agua/cemento 0.6, en este se observa que la resistencia a compresión disminuye con el incremento del porcentaje de co-polímero en volumen, lo que es atribuible a la estructura del co-polímero como se mostró en la figura 4, al ser una micro esfera hueca su resistencia mecánica es más baja. El contenido de co-polímero que mostro mejor desempeño de esta relación fue del 43% (1A), ya que su resistencia a la compresión de los morteros, nos permitiría sustituir una mayor cantidad cemento por ceniza volante.

Figura 5. Resistencia a la compresión de mezclas con a/c 0.6, sin ceniza volante.



Por otra parte, la resistencia a compresión de mezclas con relación agua/cementante 0.6 con diferentes porcentajes de ceniza volante se muestra en la figura 6. De acuerdo con NMX-C-441-ONNCCE-2005 (15) el mejor desempeño de acuerdo esta norma se obtuvo con un 35% de sustitución (1A-CV2), además se puede observar que la resistencia a la compresión disminuye con el incremento de la fracción de ceniza volante.

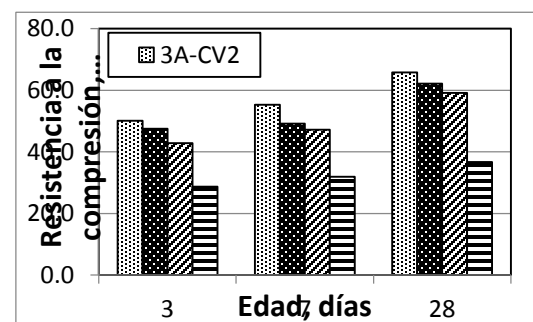
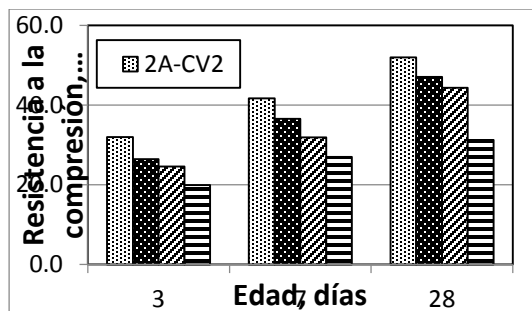
Figura 6. Resistencia a la compresión de mezclas con a/cm 0.6, para diferentes contenidos de CV.



Por otro lado, el desarrollo de resistencia de mezclas con relación agua/cementante 0.5 y 0.4 se muestran en la figuras 7 y 8 respectivamente. Como era de esperar con la disminución de la relación a/cm la resistencia a la compresión aumentó, esto permitió incrementar el volumen de sustitución de la pasta por co-polímero, la hipótesis es que la conductividad térmica disminuirá, sin embargo, la densificación de la matriz causada por la reducción de la red de poros es significativa y la conductividad térmica puede aumentar, en este escenario el efecto benéfico del aumento del contenido de co-polímero tal vez podría ser oscurecido. Para las mezclas con a/cm 0.5, el mejor comportamiento se obtuvo con la mezcla con 45% de co-polímero (2B-CV2). Mientras que para las mezclas a/cm 0.4 el mejor comportamiento se obtuvo con la mezcla 50% de co-polímero (3D-CV2).

Figura 7. Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.5

Figura 8. Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.4



Conductividad térmica

Las mezclas con el mejor comportamiento mecánico fueron 1A, 1A-CV2, 2A-CV2, 2B-CV2, 3A-CV2 y 3D-CV2, las cuales fueron seleccionadas para medir su conductividad térmica.

En la figura 9 se muestran los valores de conductividad térmica para muestras secas y saturadas, podemos ver que el comportamiento de todos los especímenes con co-polímero en estado seco fueron mejores que para el estado saturado. Comparado con H se observa un mejor desempeño en muestra saturadas por parte de aquellas que fueron adicionadas con co-polímero, esto es atribuible a la baja absorción de agua de las muestras con co-polímero, porque la partícula co-polímero actúa como barrera aislante a prueba de agua en estado endurecido como podemos ver en la figura 10, este aumento es atribuible a que el valor de la conductividad térmica del agua es 30 veces mayor que la del aire (19). Con la figura 10 también se demuestra que la morfología de la partícula de co-polímero no es afectada durante el proceso de mezclado.

Figura 9. Conductividad térmica de morteros con co polímero

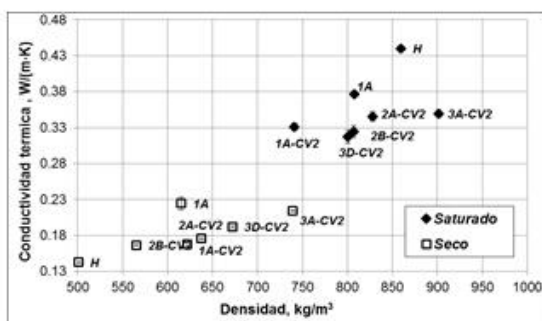
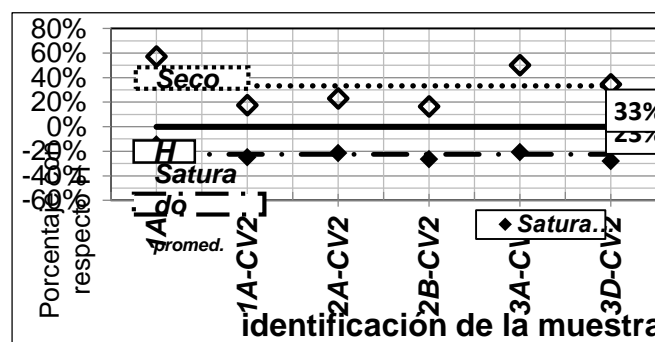


Figura 10. Imagen de microscopio óptico de mezcla de mortero con co-polímero



Figura 11. Porcentaje de conductividad térmica con respecto a H.



En comparación con la referencia H en estado seco todas las muestras con co-polímero tuvieron una conductividad térmica superior en promedio del 33%, sin embargo, para las muestras en estado saturado la conductividad térmica tuvo un

mejor comportamiento con un promedio del 23% por debajo de H, como se puede ver en la figura 11.

CONCLUSIONES

En base a los resultados de esta investigación y el procedimiento de investigación utilizado se desprenden las siguientes conclusiones:

1. Las mezclas con mejor desempeño de acuerdo NMX-C-441-ONNCCE-2005 fueron 1A, 1A-CV2, 2A-CV2, 2B-CV2, 3A-CV2 y 3D-CV2.
2. Se logró un 35% de sustitución de cemento por ceniza volante para mezclas con un 43% de contenido de copolímero para la relación de 0.6 agua/cementante.
3. La reducción de la relación agua/cementante, permite aumentar el porcentaje de copolímero debido a la ganancia de resistencia, sin embargo, la densificación de la matriz cementante (ver tabla 1) incrementa la conductividad térmica del compuesto, esto es visible en muestras secas.
4. Con el análisis térmico se demostró que la conductividad térmica está directamente asociada con el contenido de humedad.
5. En comparación con la referencia H, los resultados de conductividad térmica muestran que los morteros con adición de co-polímero tienen un mejor comportamiento en estado saturado que en estado seco.

AGRADECIMIENTOS

A las instituciones que nos brindaron apoyo para la realización de esta investigación: National Institute of Standards and Technology (NIST), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Facultad de Ingeniería Civil (FIC), CONACyT, PROINSA. Así también a los estudiantes de licenciatura que brindaron su apoyo voluntario para la realización de pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

Libro

1. Mark Alexander, Sidney Mindess, "Aggregates in Concrete", Taylor & Francis editorial, First edition, 2005, pp. 3-4.
2. J. P. Holman, "Transferencia de calor", 10 edición 2010, McGraw-Hill Science, pp. 272.
3. Kenneth J. Anusavice, "Ciencia de los materiales", 11va ed. Elsevier pp. 52-55.
19. J. P. Holman, "Transferencia de calor", 10 edición 2010, McGraw-Hill Science, pp. 272

Revista

4. H.K. Kim, J.H. Jeon, H.K. Lee, "Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air", Construction and Building Materials 29 (2012) pp.193-200.

5. Ozkan Sengu , Senem Azizi , Filiz Karaosmanoglu , Mehmet Ali Tasdemir, "Effect expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete", *Energy and Buildings* 43 (2011) pp.671–676.
6. A. Benazzouk , O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Quéneudec, "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modeling", *Construction and Building Materials* 22 (2008), pp. 573–579.
7. D.K. Panesar, B. Shindman, "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork", *Cement and Concrete Composites* 34 (2012), pp. 982–992.
8. Ramazan Demirboga, Rustem Gul, "The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete", *Cement and concrete research* 33, 2003, pp. 723-727.
9. D.P. Bentz, M.A. Peltz, A. Durán Herrera, P. Valdez, C.A. Juárez,"Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes", *Journal of Building Physics* 34(3), 2011, pp. 263–275.

Ligas Electronicas

10. Comision Nacional del agua, registros de temperaturas maximas promedio mensuales2003-2014, <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip>
11. Instituto Nacional de estadística y geografía,Cambio climatico estadistica oficial2010, http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/especiales/revistainter/num_1_2010/Doctos/RDE_Num01_Nov2010_Art01.pdf.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2014, <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
13. V. Magaña y E. Caetano, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2007, Pronostico Climático estacional regionalizado para la república mexicana, <http://www.ine.gob.mx>.

Normatividad

14. ASTM C 511-98, Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.
15. NMX-C-441-ONNCCE-2005, Industria de la construcción de bloques, tabiques y ladrillos para uso no estructural-especificaciones.
16. NMX-C-414-ONNCCE-2004, Industria de la construcción-Cementos Hidraulicos-Especificaciones y Metodos de Prueba.
17. ASTM C150-05, Standard Specification for Portland Cement.
18. ASTM C618-05, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

INCREMENTO DE LA REACTIVIDAD DE NANOPARTÍCULAS BASE SILICIO Y SU EFECTO EN EL MEJORAMIENTO DEL EFECTO BARRERA EN MATRICES CEMENTANTES.

J.R. Madrigales Ubaldo, A. Cruz López, G. Fajardo

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

RESUMEN

El presente trabajo analizará el efecto de la morfología y tamaño de nanopartículas base Silicio sintetizadas vía Sol-Gel en la reactividad con matrices cementantes endurecidas. Con las siguientes condiciones empleando el método Stober: temperatura ambiente, una relación Etanol/ TEOS = 33.34 y modificando el nivel de hidratación (10 – 50mL) se obtuvieron tamaños de partícula con promedio de 200nm. La introducción de las nanopartículas se hará por medio de la aplicación de 10 y 20 V durante 1 y 2 horas en morteros fabricados con CPO y una relación a/c de 0.5. Las nanopartículas serán caracterizadas por FTIR, SEM y TEM. La caracterización de los morteros se realizará por técnicas de Porosidad, Resistividad Eléctrica, SEM, DTA-TGA, RDX para determinar fases presentes y transformaciones, permitiendo demostrar que las nanopartículas ayudan a obtener una matriz cementante más densa, con menor porosidad y mayor impermeabilidad, dando una barrera protectora contra los agentes agresivos.

Palabras Clave: Silica, Nanoparticulas, Síntesis, Cemento, Electroforesis

ABSTRACT

This study investigated the effect of the morphology and sizes of nanoparticles Silicon base, synthesized by Sol-Gel method on the reactivity with hardened mortars. To the following conditions using the Stober method: room temperature, ethanol / TEOS ratio = 33.34 and modifying the hydration level (10 - 50 mL) particle sizes were obtained with average 200nm. The nanoparticles will be introduce by the application of 10 V and 20 V during 1 and 2 hours on mortars make it whit Ordinary Portland Cement (OPC) and a relation w/c = 0.5 The particles will be characterized by FTIR, SEM and TEM. The characterization of mortars will be done by technical of Porosity, Electric Resistivity, SEM, DTA-TGA and DRX to determinate the present phases allowing demonstrate than the nanoparticles help to do a mortar more dense, with less porosity and a higher impermeability, doing an barrier to be penetration of aggressive agents.

Key words: Nano particles, Synthesis, Silica, Cement, Electrophoresis.

INTRODUCCIÓN

El uso del concreto comprende elementos estructurales, en presas, silos, edificios, carreteras, puentes, puertos, etc. y su utilización se justifica debido a que es un material que cumple los requisitos mecánicos en un periodo determinado, llegando a ser un material difícil de reemplazar¹. Adicionalmente, cuando el concreto interacciona con el acero, surge un efecto sinérgico entre ambos materiales: el concreto reforzado. A pesar de su amplio uso, este material, ya sea a corto o largo plazo, se ha visto que sufre deterioro debido a su interacción con el ambiente, provocando la pérdida de durabilidad, un aumento en los costos de mantenimiento². Sin embargo, la durabilidad en las estructuras de concreto reforzado es sumamente compleja, ya que existen agentes externos a quienes se les atribuye principalmente la causa del inicio y propagación de los diferentes tipos de deterioro, tanto en el concreto como en el acero de refuerzo³. La permeabilidad del concreto es una propiedad que influye también en prácticamente cualquier mecanismo de deterioro de las estructuras de concreto reforzado. La permeabilidad se genera por la naturaleza porosa del concreto, que permite el paso a los agentes agresivos (como CO_2 , Cl^- y SO_4^{2-}), que pueden conducir al deterioro acelerado de una estructura de concreto reforzado. Estos problemas pueden prevenirse mediante el uso de técnicas electroquímicas entre las cuales se encuentran la Protección Catódica (CP), Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC) y Realcalinización (RAE). Sin embargo, cabe señalar que, a pesar de ser herramientas muy poderosas que han sido utilizadas por varios años, es necesario tener presentes sus limitaciones y sus alcances, para evitar falsas conclusiones.

La nanotecnología se ha convertido en los últimos años en uno de los principales y más importantes campos de investigación. Teniendo como principal objetivo obtener materiales a una escala nanométrica y, debido a esto, las propiedades fisicoquímicas de los objetos pueden ser moduladas sistemáticamente por la variación del tamaño, facilitando el diseño de nuevos materiales y promoviendo el menor consumo de recursos naturales. En lo que al sector de la construcción se refiere, las aplicaciones estructurales de la nanotecnología son las que van a permitir el desarrollo de nuevos materiales y mejoras en sus procesos de fabricación, así como nuevas técnicas de construcción⁴.

La importancia y ventajas de las nanopartículas monodispersas se han mostrado no solo en el campo científico, sino además en campos como la catálisis, pigmentos y la construcción. La calidad de estas partículas es altamente dependiente de su tamaño y distribución. La Silica comercial tiene un rango amplio de distribución de tamaño además de variados contaminantes metálicos, por lo cual es necesario contar con una sílice de escala nanométrica y con una alta pureza⁵.

Estas partículas son creadas por el método Sol-Gel, con este proceso se puede controlar su tamaño y distribución, pero esto depende de la manipulación de variables como: la concentración de TEOS, la concentración de Agua, el tipo de alcohol, la temperatura de síntesis y el pH.

Actualmente, las nanopartículas de NS constituyen uno de los materiales más empleados como portador de carga, ya que a esa escala es capaz de modificar de manera importante sus propiedades químicas. Cárdenas *et al*, investigaron la aplicación del tratamiento electrocinético de nanopartículas de NS y sílice dopada con alúmina para ser incorporadas a una matriz cementante endurecida mostrando resultados los cuales indican que el tratamiento fue eficaz para mantener el pH y el contenido de cloruros por debajo de los niveles de umbral; Indirectamente, demostró que este método reduce la permeabilidad y por lo tanto, el transporte iónico de cloruros en el concreto⁶.

Actualmente se ha propuesto la incorporación de nanopartículas de sílice (NS) hacia el interior de la matriz cementante por medio de electrofóresis, aplicando un campo eléctrico⁷. Esta técnica permite emplear compuestos complejos o fases de materiales funcionales (SiO_2 , ZnO , Fe_2O_3) y ejercer un movimiento de estas nanopartículas hacia el interior de cualquier material poroso. Una vez que estas partículas NS se encuentren dentro de la matriz cementante, se proponen dos etapas relacionadas con el mecanismo de reactividad; por un lado, la floculación y por otro, la reacción que produce la formación de una fase de gel denso que permite el bloqueo de los poros, ejerciendo una barrera ante el acero de refuerzo y el medio de exposición (esta fase contiene geles de silicatos de calcio hidratados C-S-H) ⁸.

Hasta ahora no existen muchos reportes en la bibliografía referentes al incremento de la reactividad de las nanopartículas en la matriz de cemento pero consideramos que el manipular el tamaño de las nanopartículas podría ser una opción para disminuir el tiempo de reacción del mortero y la consecuente modificación de la microestructura. Por lo tanto, en este trabajo estudiaremos los factores Relación Etanol/Agua y temperatura en la síntesis de nano partículas base silicio, estas partículas serán introducidas a una matriz cementante y se evaluara su efecto en las propiedades de durabilidad con el fin de encontrar un método para evitar la incorporación de agentes agresivos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

SÍNTESIS DE NANO PARTÍCULAS BASE SILICIO.

La síntesis de las nano partículas base silicio se llevo a cabo por medio del método Sol-Gel también conocido como método Stöber a temperatura ambiente, manteniendo la relación Etanol/ TEOS = 33.34 y modificando solamente el nivel de hidratación (10 – 50mL) de acuerdo a lo reportado por *Sato-Berrú et al*⁹.

A continuación se describe brevemente el procedimiento experimental. Al inició se colocó en un matraz de tres bocas los volúmenes de agua y el etanol en agitación constante, posteriormente esta mezcla fue calentada si es necesario hasta alcanzar la temperatura deseada (25°C), ya obteniendo la temperatura de trabajo se agrega por goteo la cantidad necesaria de NH_4OH para obtener una concentración 0.2 M, enseguida se agregó el Tetra Etil Orto Silicato (TEOS), y se dejó en agitación constante por un periodo de 1h y obtener un sólido. Posteriormente, ya obtenidas

las partículas, estas se molieron manualmente en un mortero de Agatha y se lavaron con excesos de acetona, con el propósito de eliminar la contaminación de residuos orgánicos en las partículas. Para asegurar esto último las nanopartículas se secaron en la mufla a 110°C por 12 horas.

CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS

La caracterización fisicoquímica de las nanopartículas sintetizadas se llevo a cabo por Difracción de Rayos X (DRX) en un equipo Rigaku Miniflex II con corridas de 5 a 55° en 2 θ , utilizando una radiación de tipo Cu K α (30KV, 15mA) con una velocidad de barrido de 2° min⁻¹. Por otro lado la caracterización morfológica de las nanopartículas se realizó por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) en un equipo SEM, JEOL 6490 LV Microscope.

FABRICACIÓN DE MORTEROS

Para este trabajo se propuso una relación constante entre el agua y el material a/mC = 0.65, que se utilizará para la elaboración de los especímenes de morteros, con la finalidad de cumplir con parámetros de porosidad requeridos, entre un 15 a 20% (concreto de baja calidad). Los morteros se elaborarán con una consistencia normal, de acuerdo con la norma ASTM C305-2007¹⁰.

Al término del colado, cada espécimen se dejará fraguar durante un periodo de 24 h, procediendo a desmoldar y colocar en inmersión en agua desionizada (curado) durante un periodo de 7 días, a temperatura ambiente.

INCORPORACIÓN DE NANOPARTÍCULAS

Para estudiar el efecto de la reactividad de las nanopartículas base silicio, se elaborará una solución de nanopartículas base silicio con una concentración de 0.1% peso, esta se someterá a ultrasonido durante 1 hora a 50° C, posteriormente la electroforesis se efectuará en celdas de acrílico, las cuales cuentan con dos compartimientos separados; la solución de nanopartículas base silicio serán colocadas en la celda marcada como ánodo y se colocará agua destilada en la celda marcada como cátodo, estando entre ambas celdas la matriz cementante a la cual se le incorporarán las nano partículas de acuerdo al procedimiento establecido por *Moreno-Cruz et al*¹.

El voltaje aplicado se variará entre 10 y 20V con tiempo de duración de aplicación de 1 y 2 horas en un sistema mostrado en la Figura 1.

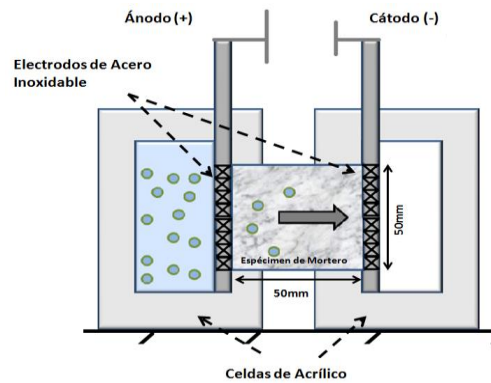


Figura 1. Esquema de transporte de la NS mediante un campo eléctrico.

RESULTADOS

SINTESIS DE NANO PARTICULAS BASE SILICIO.

En la Figura 2 se presentan los resultados del Difractograma de Rayos X de las 3 preparaciones de nanopartículas obtenidas por el método Sol-Gel y secadas a 110°C en el intervalo de $2\theta = 10$ a 55 ; como se puede observar las tres preparaciones presentan una halo amorfo localizada en el intervalo de 15° a 30° , característica de un material amorfo. Estos resultados coinciden con los espectros mostrados en otros trabajos como *Byung-Wan Jo et al*¹² en 2007 y por *Erich D. Rodriguez et al*¹³, en 2012

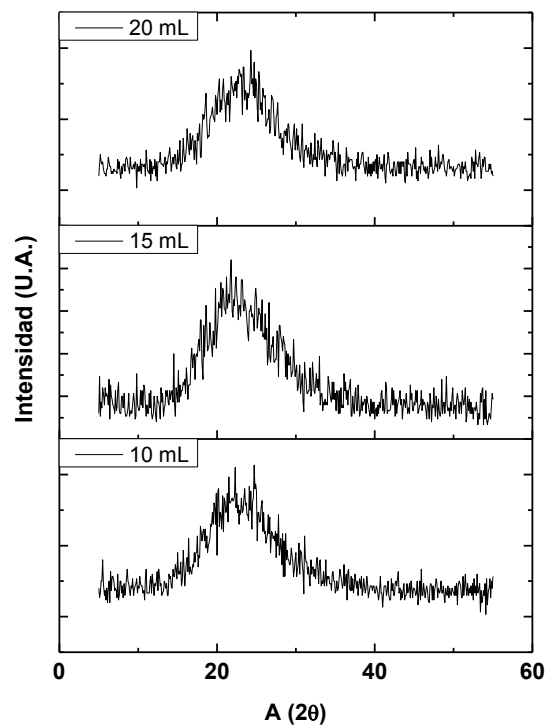


Figura 2. Difractograma de rayos X de las nanopartículas base silicio preparadas por el método Sol-Gel a Temperatura ambiente y secadas a 110°C. A) 10 mL, B) 15 mL y c) 20 mL.

En la Figura 3 se muestran las imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido las tres preparaciones de nanopartículas base silicio obtenidas por el método Sol-Gel variando el contenido de agua.

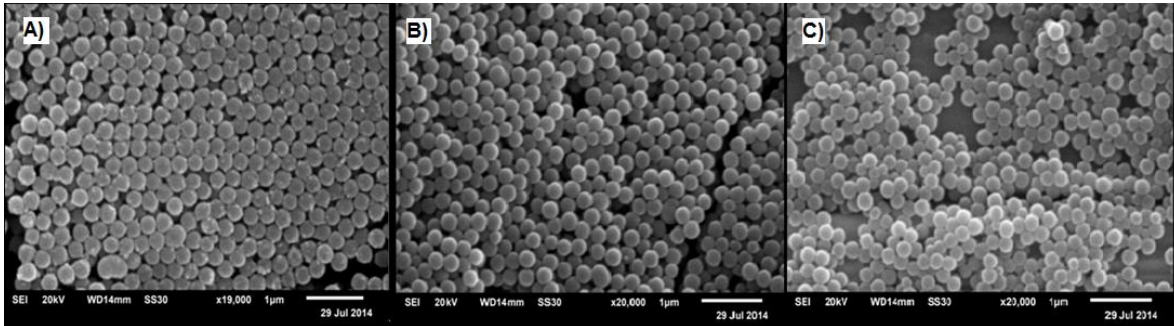


Figura 3 Micrografías de nano partículas base Silicio obtenidas por el método Sol-Gel a temperatura ambiente con una relación Etanol/TEOS = 33.34 en una solución de $\text{NH}_4\text{OH} = 0.2\text{M}$ y diferentes contenidos de agua A) 10mL Agua B) 15mL Agua C) 20mL Agua

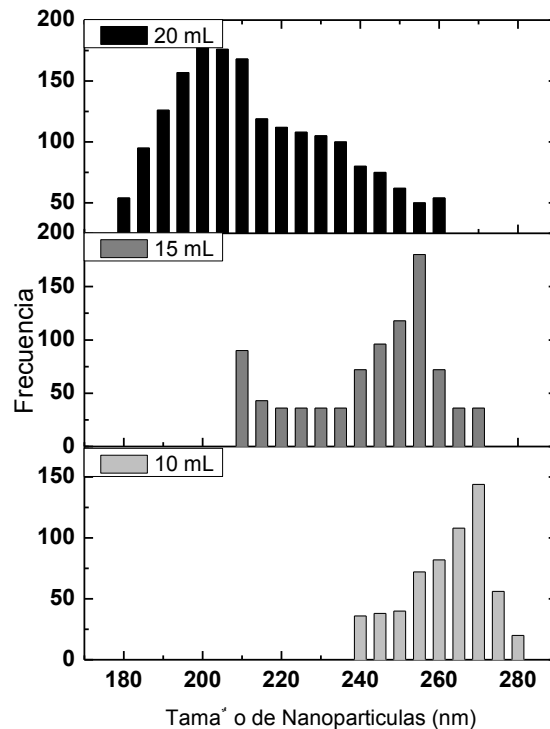


Figura 4. Distribución del tamaño de partícula de los materiales preparados por el método de sol-gel bajo la siguientes condiciones: 50mL Etanol, 0.2 mol/L NH_4OH y Temperatura Ambiente. A) 10 mL, B) 15 mL y C) 20 mL.

En todos los casos se obtuvieron partículas esféricas pero podemos observar que nivel de hidratación en síntesis tiene un efecto en el tamaño de las partículas como se muestra en la figura 4. Ahí podemos observar la obtención de partículas a escala nanométrica en el intervalo de 180 a 260 nm para la síntesis con un mayor volumen de agua. Utilizando una cantidad de 20 mL se obtuvieron tamaños de 180 a 210 nm, cuando se disminuyó la cantidad de agua a 15 mL, el tamaño de las esferas se incrementó entre 210 a 270 nm y para el caso de 10 mL, el tamaño de las esferas se incrementó en el intervalo de 240 y 280 nm. De acuerdo con *Sung Kyoo Park et al*¹⁵, Este comportamiento se explica por el aumento de la cantidad de núcleos presentes en la solución logrando la preparación de partículas pequeñas en menos tiempo.

Con respecto a la morfología de las nanopartículas, *K. del Ángel-Sánchez et al*¹⁴, reportó con Microscopía Electrónica de Trasmisión que estas esferas están constituidas por partículas menores a 20 nm. Por lo tanto de cumplirse esta condición en los materiales presentados en este trabajo seguramente nos ayudarán a incrementar la reactividad una vez que se prueben en la migración.

RECOMENDACIONES.

Recomendaciones para el trabajo a futuro son las siguientes

1. Seleccionar las condiciones de síntesis adecuadas para obtener el tamaño de partícula idóneo para mejorar la reactividad en la matriz cementante.
2. Incorporar las nanopartículas en la matriz cementante para mejorar sus propiedades de durabilidad.
3. Medir el efecto de las nanopartículas en la matriz cementante por métodos electroquímicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ligia M., "Permeabilidad y porosidad en concretos". Rev. Tecno Lógicas No. 25, ISSN 0123-7799, (2010): pp 169-187.
2. Morefield S. W., Hock V. F., Weiss C. A., Malone P. G. (2008). "Applications of electrokinetics nanoparticle migrations in the production of novel concrete-based composite". December (2008). <http://www.oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA504199>
3. Bertolini L., Elsener B., Pedferri, P., Polder, P., "Corrosion of Steel in Concrete". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. (2004): pp 80.
4. Electron, I. & Moletrón, J.N., "Nanotecnología para una construcción sostenible" Nanociencia et Moletrónica. 5; (2007): pp 1101-1111.
5. Sung Kyoo Park et al., "Preparation of silica nanoparticles: determination of the optimal synthesis conditions for small and uniform particles". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 197 (2002): pp 7-17.
6. Cardenas H, Struble L., "Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability". ASCE J Mater Civ Eng 2006;18(6): pp554-560.

7. Cardenas H, Struble L., “Modeling electrokinetic nanoparticle penetration for permeability reduction of hardened cement paste”. ASCE J Mater Civ Eng (2008); 20(11): pp 683–691.
8. Cardenas H. “Investigation of reactive electrokinetic processes for permeability reduction in hardened cement paste”. PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL 2002
9. Sato-Berrú R., “Simple method for the controlled growth of SiO₂ spheres”. Journal of Materials Science and Engineering A 3 (2013); pp 237-242. 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.
10. Moreno-Cruz Dulce (2014). Migración de Nano SiO₂ en Materiales de Cemento Portland: Efecto en las propiedades de Transporte de Especies Agresivas. Tesis Maestría, UANL., 2009; 1-213.
11. Byung-Wan jo et al., “Characteristics of cement mortar whit nano-SiO₂ particles”. Construction and Building Materials 21 (2007); pp 1351-1355.
12. Erich D. Rodriguez et al., “Increase of the reactivity of densified Silica fume by sonication treatment”. Ultrasonics Sonochemistry 19 (2012); pp 1099-1107.
13. Angel-Sánchez et al., “Preparation, characterization and photocatalytic properties of TiO₂ nanostructured spheres synthesized by the Sol-Gel method modified with ethylene glycol”. J Sol-Gel Sci Technol DOI 10.1007/s 10971-011-2401-3.
14. Sung Kyoo Park et al., “Preparation of silica nanoparticles: determination of the optimal synthesis conditions for small and uniform particles”. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 197 (2002): pp 7-17.

MECANISMO DE REACCIÓN DE NANOPARTÍCULAS BASE SILICIO EN MATRICES CEMENTANTES EN ESTADO ENDURECIDO

G. J. Ziga, G. Fajardo, A. Cruz-López

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

RESUMEN

La porosidad intrínseca de los materiales base cemento portland es la principal vía de acceso de agentes agresivos los cuales podrían promover un deterioro acelerado de las estructuras de concreto provocando significativas pérdidas económicas y ambientales. Una alternativa para disminuir esta problemática es la depositación electroforética de nanopartículas base silicio (NBS) en morteros en estado endurecido para mejorar el efecto barrera. Esta investigación dilucida el mecanismo de reacción de la NBS dentro de la red de poros, para este propósito se sintetizaran NBS amorfas por el método Sol-Gel con tamaños menores a 20 nm las cuales fueron inducidas mediante un campo eléctrico en la matriz cementante. Los resultados obtenidos evidencian que la depositación electroforética de NBS contribuye en cambios microestructurales de los morteros que provocaron el bloqueo de poros capilares.

Palabras clave: Nanopartículas, Depositación electroforética, Microestructura, Porosidad, Método Sol-Gel.

ABSTRACT

The intrinsic porosity of Portland-cement based materials is the main access of aggressive agents which promote an accelerated deterioration of concrete structures causing significant economic and environmental losses. An alternative to reduce this problem is the electrophoretic deposition (EPD) of nano SiO_2 (NS) to improve the barrier effect in hardened mortars of OPC. The aim of this research is to explain the mechanism of reaction of the NS in the pore solution, for this purpose will be obtained NS by the sol-gel method with sizes less than 30 nm which will be induced by an electric field in the cementitious matrix. Dielectric measurements after treatment with NS shows that the EPD contributes microstructural changes in hardened mortars so we will rely on different techniques of physical-chemical characterization to determine the chemical interaction between NS and the pore solution.

Keywords: Nano SiO₂, Electrophoretic Deposition, Microstructural, Porosity, Sol-Gel method.

INTRODUCCIÓN

Debido a las grandes ventajas que brinda el concreto, como: trabajabilidad, resistencia mecánica, inclusive la propiedad de fraguar bajo el agua, hace que sea un material ampliamente usado en la industria de la construcción para crear cualquier tipo de edificación o infraestructura civil. Tan solo en el 2012 se consumieron alrededor de 305 kg/habitante de cemento portland a nivel mundial [1,2,3]. Sin embargo los materiales base cemento portland son considerados de naturaleza porosa debido a su proceso de hidratación, dicha porosidad intrínseca es la principal vía de acceso por la cual diferentes agentes agresivos, que pueden estar presentes en la naturaleza como los cloruros y/o sulfatos o los que están presentes en la atmosfera producto de la actividad antropogénica como el dióxido de carbono, etc. pueden penetrar a la matriz cementante a través de la red de poros ocasionando un deterioro acelerado de la estructura de concreto [1,4,5]. En la actualidad, el reto radica en mejorar la calidad y la durabilidad de las estructuras de concreto y reducir al mínimo su impacto ecológico. Esto requiere un conocimiento actualizado de la disponibilidad de las materias primas para su elaboración. La estructura tiene que estar apropiadamente diseñada, no solo desde el punto de vista de resistencia, sino también con respecto a la exposición a las condiciones locales y al microclima [1]. Independientemente del desarrollo científico y tecnológico sobre el conocimiento del cemento portland, del avance en la tecnología del concreto, éste es a menudo deteriorado durante su colocación y curado, es decir un excelente concreto puede ser convertido en un concreto pobre, además considerando que la porosidad intrínseca que poseen estos materiales permite el acceso de especies agresivas causando un deterioro acelerado afectando la vida útil de la estructura. En este sentido se ha investigado sobre métodos de prevención para rehabilitar o extender este periodo de servicio, al respecto se mencionan dos métodos de prevención como: la protección directa, que son aquellas que están dirigidas a proteger al acero de refuerzo (protección catódica, recubrimiento epóxico, entre otras) y protección indirecta, como las destinadas a mejorar las propiedades del concreto (recubrimientos, realcalinización, extracción electroquímica, entre otras) [6,13]. Actualmente se investiga sobre el uso de nanopartículas, específicamente base silicio, como protección indirecta del concreto para ofrecer mejores y nuevos materiales con propiedades mejoradas [1,6,7,13].

Con respecto al uso de nanopartículas como adición al concreto, disímiles investigaciones se enfocan sobre la adición en estado fresco, es decir durante el mezclado de los diferentes constituyentes del concreto para mejorar sus propiedades mecánicas después del fraguado, es decir la adición debe ser implementada desde el diseño de la mezcla, pero para los casos de elementos ya existentes o relativamente jóvenes, la adición en estado endurecido se prefiere para crear un efecto barrera de la matriz cementante y bloquear el paso de agentes

agresivos y con ello ampliar la vida útil de la estructura de concreto. En este sentido investigadores establecen que las nanopartículas podrían reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible en la red de poros para formar algunas variantes de-silicato de calcio hidratado (C-S-H) que es la principal fase ligante de los materiales base cemento portland [7,8,9,10,11,12,13].

En esta investigación se presentan resultados de la caracterización fisicoquímica de especímenes en estado endurecido a los cuales se les adicionó NBS mediante la aplicación de un campo eléctrico con el propósito de monitorear sus características dieléctricas (Resistividad) mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica con la finalidad de fundamentar los beneficios del efecto barrera ante el paso de agentes agresivos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

SÍNTESIS DE NANOPARTICULAS BASE SILICIO

La síntesis de NBS se realizó en base a la metodología reportada por Cruz Moreno et al. [13] y que se describe a continuación: Los reactivos de partida fueron etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, 95%) como solvente, tetraetilortosilicato (TEOS, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) como precursor del silicio e hidróxido de amonio (NH_4OH) como catalizador de hidrólisis. La síntesis consistió en adicionar en un matraz 50 ml de etanol y calentarlo hasta 70°C (ver figura 1) con agitación mecánica vigorosa. Al alcanzar la temperatura de reacción se agregaron 20 ml de TEOS (en la reacción de hidrolisis, cada molécula de TEOS da teóricamente una molécula de $\text{Si}(\text{OH})_4$) y se mantuvo con reflujo durante los siguientes 30 min. Posteriormente, se adicionó 1 ml de NH_4OH y 30 min después se añadieron 12 ml de H_2O desionizada y se continuó con la agitación por una hora. Después se adicionó gota a gota NH_4OH hasta obtener un gel transparente. En este punto se detuvo el reflujo pero se continúa con el calentamiento por 24 horas con el fin de evaporar la mayor cantidad de solvente y agua. El gel obtenido se colocó en un crisol para darle un tratamiento térmico a 110°C por 24 horas. Los sólidos obtenidos se trituraron para obtener un polvo fino el cual denominaremos nanopartículas base silicio.



Figura 1. Las diferentes etapas del método de sol-gel durante la síntesis de nanopartículas base silicio a 70°C.

FABRICACIÓN DE MORTEROS

En la tabla 1 se presentan las principales características de los dos tipos de especímenes cilíndricos de 5 cm diámetro por 5 cm de altura (C300 y C400) fabricados en este trabajo. Para cada uno de ellos la mezcla, colado y curado de los morteros se realizó en base a las normas ASTM C-187, ASTM C-192, ASTM C-305 [14,15,16]. La finalidad de estudiar este tipo de matrices cementantes es con el propósito de favorecer el movimiento de las NBS.

Tabla 1. Características principales de los morteros fabricados

<i>Nomenclatura y parámetros</i>				
Nombre	Rel. a/c	Agregado	Cemento	Consumo
C300	0.65	Arena silica	CPO 40R	300 kg/m ³
C400	0.65	Arena	CPO 40R	400 kg/m ³

Como un parámetro de referencia se obtuvieron la densidad, el porcentaje de absorción y el volumen de vacíos de los especímenes bajo la norma ASTM C-642.

CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS

La caracterización estructural de las NBS preparado por la ruta de sol-gel se determinó por difracción de rayos-X (DRX) empleando un equipo RIGAKU MINIFLEX con corridas de 20° a 90° 2θ utilizando una radiación Cu Kα (30 kV 15 mA) con una velocidad de barrido de 2° min⁻¹.

TRATAMIENTO DE MORTEROS BAJO CAMPO ELECTRICO

El tratamiento electrocinético con nanopartículas consta de: elaboración de una suspensión la cual consiste en colocar 0.5 g de NBS en 500 ml de agua destilada, la cual es llevada a un ultrasonido por 1 h a 50° C, para promover la debilitación de los enlaces Si-(OH) y una posible separación entre los radicales de las NBS obteniendo una solución con presencia de NBS y Si⁴⁺ [13]. Posteriormente la aplicación de la electroforesis se llevó a cabo con ayuda de unas celdas de acrílico, las cuales cuentan con dos compartimientos separados; las partículas de NBS fueron puestas en la celda marcada como ánodo y otra solución con agua destilada fue colocada en la parte marcada como cátodo (ver Figura 2). Ambos compartimientos fueron separados empleando como filtro el material cementante a través del cual se pretende hacer migrar las NBS hacia el cátodo. La diferencia de potencial aplicado a la celda fue de 20 V durante un tiempo de 4 h. Después del tratamiento, los especímenes tanto de referencia como los tratados son colocados en inmersión en agua destilada para favorecer la reacción de la NBS,

inmediatamente después son cortados en 3 zonas, quedando especímenes con dimensiones de 5 cm de diámetro por 1.66 cm de altura para su monitoreo de las características dieléctricas mediante Espectrometría de Impedancia Electroquímica (EIS).

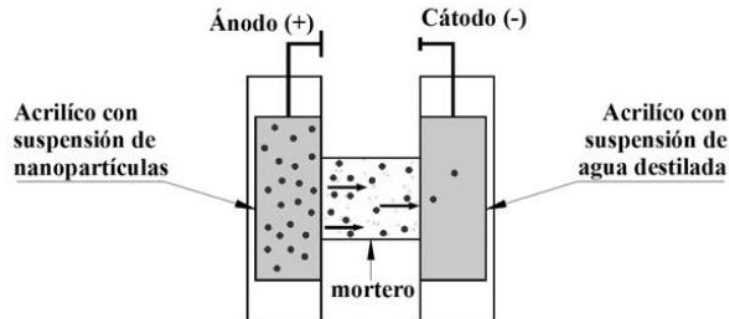


Figura 2. Esquema de migración de la NS mediante un campo eléctrico.

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DE MORTEROS

Para fines de evidenciar cambios en la microestructura de los morteros tratados con NBS se lleva a cabo un monitoreo de EIS para calcular la resistividad de las probetas tratadas y sin tratar, con la ayuda de un potenciostato universal VoltaLab 40 PGZ301 y Voltmaster 4, con un arreglo de 3 electrodos (Véase Figura 3).

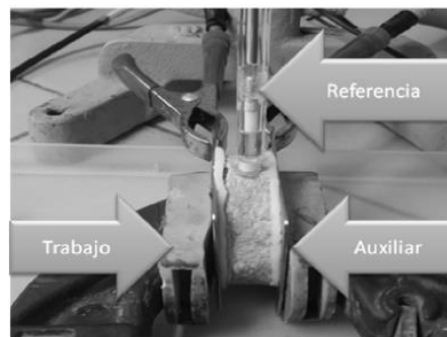


Figura 3. Arreglo de electrodos para monitoreo de la impedancia

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA NANOPARTÍCULA

En la figura 4 se presenta el espectro de DRX en el intervalo de $10-60^\circ 2\theta$ de la muestra de NBS seca a 110°C . De acuerdo con la gráfica se observa una reflexión pronunciada en el intervalo $15-30^\circ 2\theta$, característica de la sílice amorfa e indicativo de un gran desorden de largo alcance del material. Este resultado coincide con los

espectros del SiO₂ publicado por otros autores quienes han promovido un mayor desorden para promover la reacción puzolánica [13].

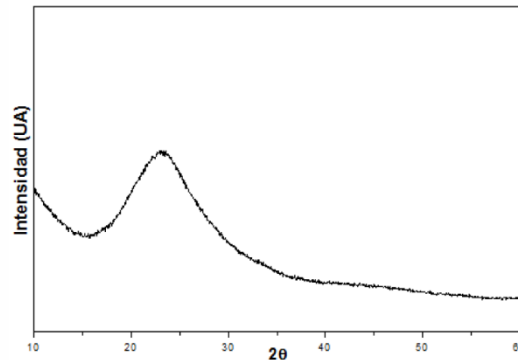


Figura 4. Patrón de Difracción de Rayos X de NBS preparada por el método de sol-gel y secada a 110°C.

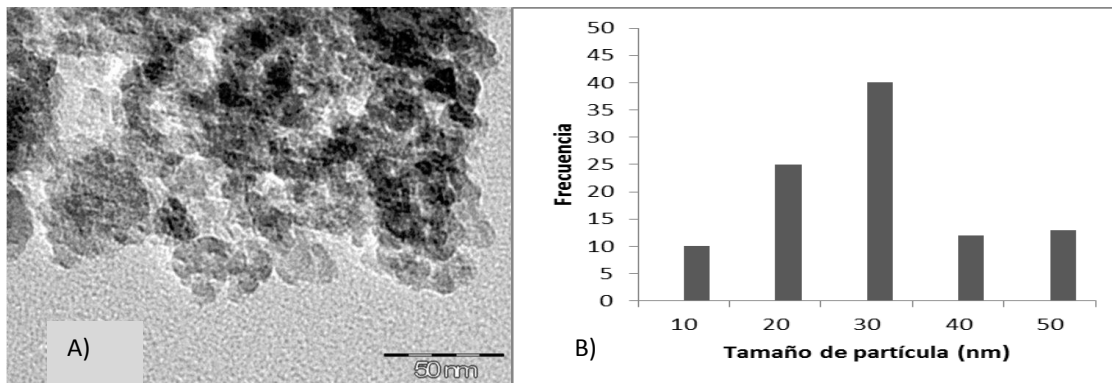


Figura 5. A) Imágenes de Microscopía Electrónica de Transmisión de las nanopartículas base silicio preparadas por el método de sol-gel y secada a 110°C. B) Distribución de Tamaño de Partícula.

Para confirmar las propiedades morfológicas del material fresco preparado por la ruta de química suave, se realizó un análisis por microscopía electrónica de trasmisión. En la figura 5 se presenta la imagen de partículas irregulares con tamaños promedio de aproximadamente 20-30 nm.

DENSIDAD, PORCENTAJE DE ABSORCIÓN Y VOLUMEN DE VACIOS

En base a lo especificado en la Norma ASTM C642 se obtuvieron valores como, peso seco al horno (A), peso saturado (B), peso después de hervir (C) y peso en inmersión (D). Según las formulas especificadas en la norma, se obtuvieron los valores mencionados en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados Norma ASTM C642

Norma ASTM C642

Muestra	Absorción después de inmersión (%)	Absorción después de inmersión y ebullición (%)	Densidad aparente y seco (g1)	Densidad aparente después de inmersión (g/cm ³)	Densidad aparente después de la inmersión y ebullición (g/cm ³)	Densidad aparente (g2)	Volumen de espacios de los poros permeables (%)
C300	9.37	15.32	1.80	1.97	2.07	2.48	27.47
C400	8.99	9.15	2.06	2.25	2.25	2.54	18.88

RESISTIVIDAD

Después de finalizar el tratamiento de 20 V por 4 h, los especímenes tratados y de referencia fueron puestos en inmersión en agua. En la figura 6 se puede observar que las muestras tratadas con NBS empezaron a incrementar su resistividad a partir del día 21 mientras que las muestras de referencia prácticamente mantienen su resistividad a lo largo del tiempo de curado analizado. El umbral marcado en la Figura 6 hace referencia a matrices cementantes que estén por debajo de esta línea; el acero de refuerzo tendría mayores probabilidades de corroerse mientras que valores encima de este umbral, el acero tendería a mantener sus condiciones pasivas, lo cual sucede hasta después de 60 días en los sistemas C300. En la figura 7 se aprecian distintas tendencias para el sistema C400: los especímenes tratados con NBS y de referencia incrementan su resistividad durante los primeros 28 días, superando el umbral de protección desde 37 días aprox. Esto debido principalmente a que estos especímenes poseen mayor cantidad de cemento, lo que indica un mayor avance en la cantidad de productos de una hidratación continua durante los primeros 28 días. Estos resultados coinciden con trabajos previos como el de Cruz Moreno et al [13] en donde se encontró que la NBS produce un cambio microestructural a partir del día 28 para muestras tratadas. Basados en los resultados se deduce que existe evidencia que las muestras tratadas con NBS presentan cambios en su microestructura provocando densificación y por ende mejora en la impermeabilidad.

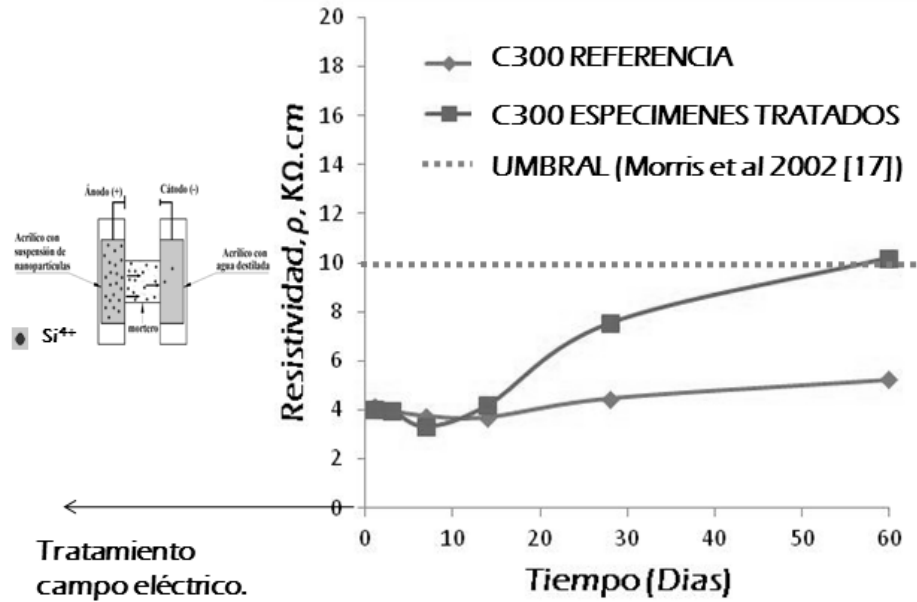


Figura 6. Grafica de resistividad en las diferentes zonas de los especímenes C300.

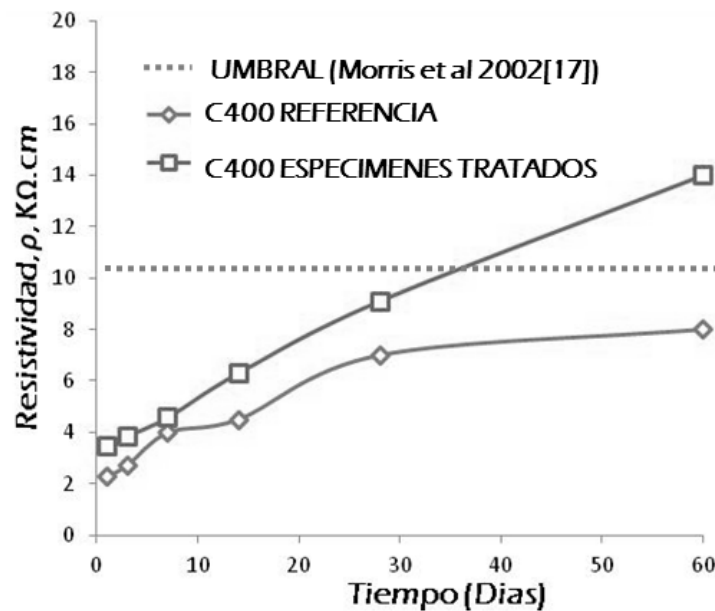


Figura 7. Grafica de resistividad en las diferentes zonas de los especímenes C400.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados preliminares de este trabajo de investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- Se comprobó la viabilidad de obtención de nanopartículas de sílice predominantemente amorfas sintetizadas por el método Sol-gel, mediante diferentes técnicas de caracterización como DRX y TEM.
- Mediante la medición de las características dieléctricas de los morteros (resistividad) se deduce que existe evidencia que las muestras tratadas con NBS presentan cambios en su microestructura provocando densificación y por ende mejora en la impermeabilidad.
- La depositación electroforética utilizada de 20 V por 4 horas fue efectiva en la migración de la NBS en diferentes matrices cementantes.
- Es factible que la NBS migra y reaccione con el hidróxido de calcio presente en la red de poros para formar una variante de C-S-H. Para asegurar ello, las recomendaciones incluyen realizar caracterización físico-química de las muestras tratadas y de referencia y describir un modelo del mecanismo de reacción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al PAICYT-UANL 2012 y SEP-CONACyT por los apoyos financieros otorgados a los proyectos IT573-10 y CB-2012-01/ 177839. Así mismo, G.J. Ziga-Carbarin agradece al CONACYT por la beca otorgada.

REFERENCIAS

- [1] Aïtzin Pierre Claude (2005), Ingeniería de los Cementantes Hidráulicos, Editado por el Cuerpo Académico de tecnología del Concreto, FIC-UANL, Monterrey N.L., México.
- [2] Metha K. y Monteiro P. (2006), Concrete (Microstructure, properties and Materials), Mc Graw Hill, USA, pg. 31.
- [3] http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- [4] Cardenas, H. (2002) Investigation of reactive electrokinetic processes for permeability reduction in hardened cement paste. Ph. D, thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.

- [5] Cardenas, H., and Kupwade-Patil, K (2007) Corrosion remediation using choride extraction concurrent with electrokinetic pozzolan deposition in concrete. Proc., Int. Symp. On Electrokinetic Remediation, Univ. Of Vigo, Vigo Spain, 117.
- [6] Cardenas, H., and Struble, L. (2006) Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability. J Mater Civ. Eng., 18(4), 554-560.
- [7] Lin D.F., Lin K.L., Chang W.C. (2008), Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar, Waste Management 28, pp 1081-1087.
- [8] Hobbs, D.W., and Gutteridge, W.A. (1979) Particle size and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. Mag. Concrete Research. 31(109), 235-242.
- [9] Taylor, H.F.W. (1997). Cement chemistry, 2nd. Ed. Thomas Thelford, London.
- [10] I.G. Richardson (1999), The nature of C-S-H in hardened cements, Cement and Concrete Research, Cement & Concrete Composites 22(2000) 97-113.
- [11] Cardenas, H., and Struble, L. (2006) Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability. J Mater Civ. Eng., 18(4), 554-560.
- [12] L.P. Singh, S.R. Karade, S.K. Bhattacharyya, M.M. Yousuf, S. Ahalawat, Beneficial role of nanosíllice in cement based materials- A review. Nanomater. Nanotechnol, 1 (1) 44-51.
- [13] D.M.A. Cruz Moreno, A. Cruz López, G. Fajardo, P. Valdez, Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento Portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, UANL (2014)
- [14] ASTM International. Designation: C 187-10. Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.
- [15] ASTM International. Designation: C 192/C 192M-07. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
- [16] ASTM International. Designation: C 305 – 06. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual Book of ASTM Standards.
- [17] Morris, W., Vico, A., Vazquez, M. and De Sánchez, S.R. (2002) Corros. Sci. 44, p.81

CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE UNA PASTA DE CEMENTO CON FIBRA DE CARBONO A PARTIR DE LOS MÉTODOS DE CUATRO PUNTAS E IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.

C.P. Barrios-Durstewitz¹, R.E. Nuñez-Jaquez¹, M.J. Pellegrini¹, E. Garcés-Velázquez³, E.E. Maldonado-Bandala³, J.P. García-Contreras², J.H. Castorena¹

1. Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N, Ciudad Universitaria, Los Mochis, Sin. México.
2. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), E. D. C. Vázquez (Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)).
3. Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, S/N, Zona Universitaria 91090, Xalapa, Veracruz, México

RESUMEN

En este trabajo se presentan la metodología para calcular la conductividad eléctrica de una pasta de cemento adicionada con polvo de grafito (con tamaño de partícula máximo de 1mm) y fibra carbono con (longitud de 10mm, por 7.2 μm de diámetro). Para una relación grafito –cemento de 1:1 y diferentes fracciones volumétricas de fibra de carbono (0-1.2 %). La determinación de la conductividad eléctrica de la pasta de cemento se realizó mediante dos técnicas: método de cuatro puntas (4P, corriente directa) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS, corriente alterna). Se obtuvieron los valores de conductividad para cada una de las mezclas con diferente porcentaje de fibra de carbono mostrando el umbral de percolación para un porcentaje de fibra de 0.27%.

Palabras clave: Pasta de cemento, Conducción eléctrica, Fibra de carbono, Conductividad eléctrica, Corrosión

ABSTRACT

In the present paper is show the methodology to calculate the electrical conductivity of a cement paste added with graphite powder (with a maximum particle size of 1 mm) and carbon fiber (10mm length by 7.2 mm in diameter), for a graphite-cement ratio of 1:1, and different volumetric fractions of carbon fiber (0-1.2%). The electrical conductivity of the cement paste is measured by two techniques: four-point method (4P, DC) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS, AC). The conductivity values for each of the mixtures with different percentage of carbon fiber showing the percolation threshold for a percentage of fiber of 0.27% was obtained.

Keywords: Cement paste, electrical conduction, carbon fiber, electric conductivity, corrosion.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos tipos de ánodos para la protección y reparación de estructuras de concreto armado es un tema de gran interés tecnológico¹. La protección natural contra la corrosión del acero de refuerzo en concreto generalmente se pierde debido al ingreso de iones cloruro o a la carbonatación del concreto. La extracción electroquímica de cloruros (EEC) y la re-alkalinización electroquímica (RAE) son técnicas empleadas en la restauración de las propiedades protectoras del concreto al acero. En el primer caso se busca extraer los cloruros de la masa de concreto y de esta forma eliminar el agente agresivo que provoca corrosión localizada sobre la superficie del acero de refuerzo, y en el segundo caso se incrementa el pH del concreto a valores en los cuales se reestablezca las condiciones alcalinas y genere la pasivación del acero de refuerzo. La aplicación de estas técnicas requiere la instalación de un electrodo auxiliar colocado en la superficie exterior del concreto, el proceso de estas técnicas se puede apreciar en la figura 1. El electrodo auxiliar consiste generalmente en una malla de acero o titanio activado contactada a una de las terminales de una fuente de corriente directa y la otra terminal al acero de refuerzo de la estructura, la densidad de corriente directa que se aplica esta entre 1 a 2 A/m². Durante un periodo de tiempo de unos cuantos días, para el caso de la RAE, a varias semanas para la EEC.

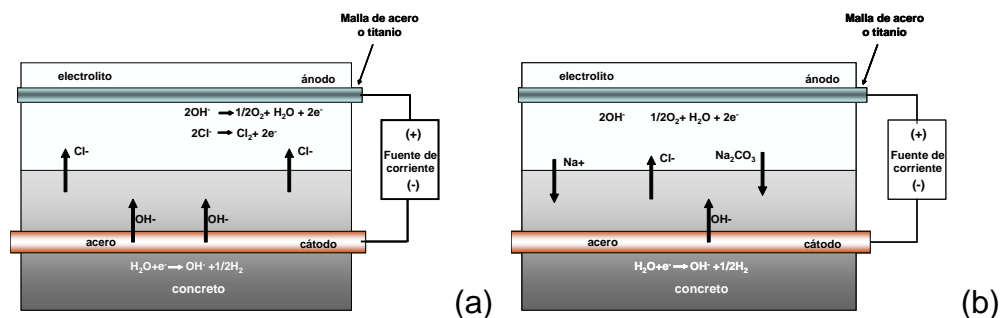


Figura 1. Arreglo de electrodos para la aplicación de la (a) extracción electroquímica de cloruros y (b) realcalinización.

Las propiedades del concreto pueden modificar o incluso mejorar al adicionar materiales como fibras o polvos. Una de estas propiedades que se puede modificar es la conductividad eléctrica². Fibras eléctricamente conductoras (por ejemplo, el carbono y fibras de acero), que son discontinuas son eficaces en mezclas con una matriz de cemento. Partículas eléctricamente conductoras (por ejemplo, polvo de grafito) son menos eficaces, debido a su baja relación geométrica, la cual se entiende como la proporción entre longitud y diámetro. Sin embargo, las partículas tienden a ser mucho más económicas que las fibras y el bajo costo es importante para la viabilidad de la tecnología del concreto³. El uso de pasta de cemento conductora (PCC) (proporción cemento: grafito: agua de 1:1:1) como ánodo en la aplicación de EEC en especímenes de concreto reforzado presenta una eficiencia similar al ánodo de Ti-RuO₂⁴. Además, el método de protección catódica (PC) con

morteros conductores (MC) se ha utilizado en estructuras de concreto, sustituyendo la malla de titanio o acero.

Ping Xie et al.⁵ reportan que la relación entre la conductividad eléctrica y la fracción volumétrica del material conductor en materiales base cemento pueden ser descritos por un modelo basado en la teoría de percolación. La percolación se puede entender como el proceso mediante el cual se lleva a cabo la dispersión de un fluido, partículas o fibras a través de un medio aleatorio o desordenado, los cuales pueden ser por ejemplo los espacios porosos en una roca, el suelo o un arreglo de árboles, en consecuencia el efecto observado se relaciona con propiedades de conectividad. De acuerdo a R. Zallen⁶, el fenómeno de percolación en pastas de cemento adicionadas con fases conductoras se caracteriza por: a) Un cambio en la conductividad de varios ordenes de magnitud cuando la concentración de la fibra de carbono alcanza un valor crítico, a este valor se le llama umbral de percolación. b) La conductividad se incrementa marginalmente con el incremento del contenido de fibra conductora en la región posterior al umbral de percolación. En la obtención de un material base cemento conductor eléctrico se adicionan a la mezcla una fase conductora, idealmente puede ser un material químicamente inerte, como lo es el carbono en su forma de partículas o fibras. Es obvio que mientras mayor sea la cantidad de estas fases conductoras en la mezcla, mayor será la conductividad eléctrica, pero se alcanza un cierto valor en el cual por más que se adicione este material la conductividad eléctrica no se incrementa mucho más, en el punto en que comienza a presentarse esta situación se conoce como umbral de percolación. La importancia de la determinación del umbral de percolación radica en que la adición de una mayor fracción volumétrica de fibra de carbono no incrementa significativamente la conductividad del material compuesto. De acuerdo a la teoría de percolación la conductividad eléctrica de un material compuesto se puede expresar a través de la siguiente expresión, conocida como ley de potencias.

$$\kappa \propto (\varphi - \varphi_p)^t \quad (1)$$

Donde κ es la conductividad eléctrica del material, φ es la fracción volumétrica de la fibra de carbono en la mezcla, φ_p es el valor de fracción volumétrica crítica y t es una constante que es independiente de la microestructura del material, conocida como exponente crítico.

En base a lo anterior el objetivo de este trabajo es determinar el umbral de percolación en la conductividad eléctrica de una pasta de cemento adicionada con polvo de grafito (con tamaño de partícula máximo de 1mm) y fibra carbono con (longitud de 10mm, por 7.2 μm de diámetro). Para una relación grafito – cemento de 1:1 y diferentes fracciones volumétricas de fibra de carbono (0-1.2 %). La estimación de la conductividad eléctrica se lleva a cabo mediante dos métodos: el método de cuatro puntas de corriente directa (4P), el segundo método es por medio de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Elaboración de Muestras de Pasta de Cemento Conductor

La preparación de los especímenes para la determinación de la conductividad eléctrica de las pastas de cemento consistió en lo siguiente. Se hicieron dos tipos de especímenes de pasta de cemento ambos de forma cilíndrica pero con diferentes dimensiones, las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de muestras de pasta de cemento conductor y técnica de determinación de la conductividad eléctrica (σ).

<i>Muestra</i>	<i>Diámetro (cm)</i>	<i>Longitud (cm)</i>	<i>Técnica medición de σ</i>
M1	3	15	4 Puntas
M2	2.5	6	EIS

El tipo de cemento utilizado para este fin es cemento Portland compuesto CPC30R. Como dispersante de las fases conductoras se empleó micro-sílice en sustitución del 15 % de cemento, la relación agua - cemento es de 0.5. El material carbonoso empleado como fase conductora en la mezcla consistió en polvo de grafito Loresco SC-3 con tamaño de partícula máximo de 1mm de forma esférica. Además se adicionó fibra de carbono, esta se obtuvo de la compañía Zoltek, las características de la fibra de carbono se pueden apreciar en la tabla 2. La proporción de los materiales carbonosos en la mezcla fueron las siguientes: En el caso del polvo de grafito la relación grafito –cemento es de 1:1 y en diferentes fracciones volumétricas (0-1.2 %) para la fibra de carbono.

Tabla 2. Propiedades de la fibra de carbono.

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Esfuerzo a tensión	4137 MPa
Módulo de Young	242 GPa
Resistividad eléctrica	0.00155 Ω -cm
Densidad	1.81 g/cm ³
Diámetro de la fibra	7.2 μ m
Longitud	10 mm
Contenido de carbono	95 %

Se utilizó agua destilada en la preparación de la mezcla. Después de preparada la mezcla se vació en moldes de PVC, se desmoldaron a las 24 horas y se colocaron en curado por inmersión en agua durante 7 días a temperatura ambiente (20-25 °C). Para cada tipo de mezcla de pasta de cemento se realizaron tres especímenes con la finalidad de evaluar repetitividad.

Medición de conductividad eléctrica por el método de cuatro puntas de corriente directa

La estimación de la conductividad eléctrica de la pasta de cemento conductora por el método de cuatro puntas (4P) se llevó a cabo en las muestras M1. Este método consiste en hacer pasar una corriente eléctrica conocida, generada por una fuente corriente directa, a través del circuito eléctrico en color azul, ver figura 2, la intensidad de corriente se mide con el amperímetro. Por otro lado se mide la caída de voltaje en el espécimen generada por el paso de la corriente eléctrica, la separación entre las líneas en las cuales se midió la caída de voltaje fue de 5cm. Como contacto eléctrico con el cilindro se utilizó pintura de plata para la medición

de la caída de voltaje y para el contacto eléctrico en los extremos del cilindro se utilizó un electrodo de acero inoxidable en conjunto con una esponja saturada en agua, como se aprecia en la figura 3.

Obtenidos los valores de voltaje y corriente se calcula la resistencia eléctrica del espécimen a través de la ley de Ohm y mediante la ecuación (2) se calcula la conductividad eléctrica en S/cm.

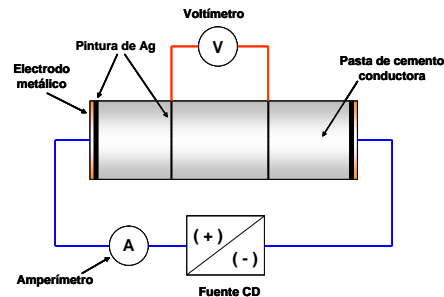


Figura 2. Arreglo para la determinación de conductividad eléctrica de la pasta de cemento.

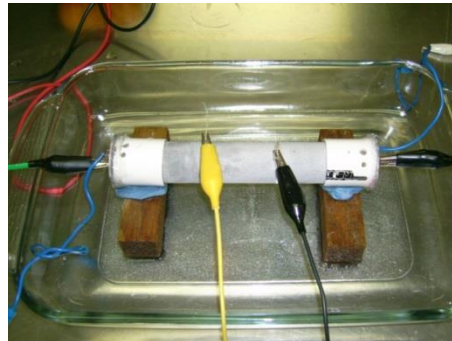


Figura 3. Arreglo experimental para la medición de la conductividad de los especímenes de pasta de cemento conductora.

$$\kappa_{4P} = \frac{L}{RA} \quad (2)$$

Donde κ_{4P} es la conductividad eléctrica de la pasta de cemento (S/cm), R es la resistencia eléctrica del espécimen cilíndrico de pasta de cemento (Ohm), L es la longitud (cm) entre las líneas de pintura de Ag donde se mide la diferencia de voltaje, y A es el área de sección transversal del espécimen cilíndrico de pasta de cemento (cm²). La estimación de la k de la pasta de cemento se realizó para cada una de las diferentes mezclas de pasta de cemento al variar la fracción volumétrica de fibra de carbono.

Medición de conductividad eléctrica por espectroscopia de impedancia electroquímica

La determinación de la conductividad eléctrica por el método de espectroscopia de impedancia electroquímica se realizó en las muestras de pasta de cemento conductor designadas como M2. La celda empleada consistió en un arreglo de tres electrodos: donde el electrodo de trabajo fue un cilindro de pasta de cemento conductor, para establecer el contacto se utilizó una barra de grafito (0.6 cm de diámetro y 6 cm de longitud) inmersa en la pasta de cemento conductor; como

contra-electrodo se utilizó una malla de acero inoxidable; y el electrodo de referencia usado fue de Calomel. La geometría de la celda se puede ver en la figura 4. Los parámetros de la EIS empleados fueron: un barrido de frecuencia de 100 kHz a 100mHz, y una amplitud de voltaje de 20mV. El equipo utilizado en la obtención de los datos de EIS fue Field Machine 100kHz marca ACM.

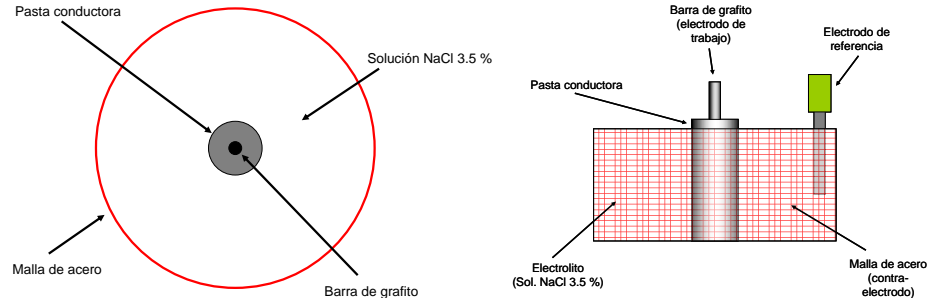


Figura 4. Geometría de la celda utilizada para la determinación de la conductividad eléctrica de la pasta de cemento conductor por EIS.

La obtención de la resistencia eléctrica de la celda se determinó del valor de Z_{Re} en el valor mínimo de $-Z_{Im}$. La conductividad se calculó en base a la ecuación (3), la cual se obtuvo considerando que la Z_{Re} únicamente depende de la geometría de la celda.

$$K_{EIS} = \frac{\ln\left(\frac{r_{oEIS}}{r_{iEIS}}\right)}{2\pi LZ_{Re} - \frac{1}{k_{NaCl}} \ln\left(\frac{r_{oNaCl}}{r_{iNaCl}}\right)} \quad (3)$$

Donde k_{EIS} es la conductividad eléctrica de la pasta de cemento obtenida por Z_{re} (S/cm), k_{NaCl} es la conductividad eléctrica de la solución de NaCl al 3.5% en peso (0.053 S/cm, a 25 °C), L (6 cm) es la altura del cilindro de pasta de cemento y la malla de acero (cm), r_{iEIS} (0.6 cm) es el radio de la barra de grafito, r_{oEIS} y r_{iNaCl} (1.25 cm) es el radio del cilindro de pasta de cemento, r_{oNaCl} (6.5 cm) es el radio de la malla de acero inoxidable.

RESULTADOS

En la figura 5 se pueden observar los valores de conductividad eléctrica obtenidos para las diferentes cantidades de fracción volumétrica de fibra de carbono en la mezcla. En la gráfica se aprecia que para bajos contenidos de fibra de carbono la conductividad eléctrica se encuentra en valores alrededor de 1×10^{-5} S/cm. Conforme se incrementa la fracción volumétrica de fibra de carbono la conductividad sigue la misma tendencia de forma gradual, al alcanzar un valor de 0.25 % de fracción volumétrica la conductividad presenta un valor de alrededor de 1×10^{-4} S/cm. Para valores de fracción volumétrica del 0.27 % la conductividad se incrementa en 4 órdenes de magnitud hasta alcanzar valores alrededor de 3×10^{-2} S/cm. Después de 0.27% de fibra de carbono el incremento en la cantidad de fibra no genera un incremento tan grande en la conductividad, para un valor de 1.2 % se tiene una conductividad promedio de 0.13 S/cm. Este valor de conductividad es

comparable con un material semi-conductor como por ejemplo el germanio dopado grado transistor, el cual tiene una conductividad alrededor de 0.09 S/cm [7]

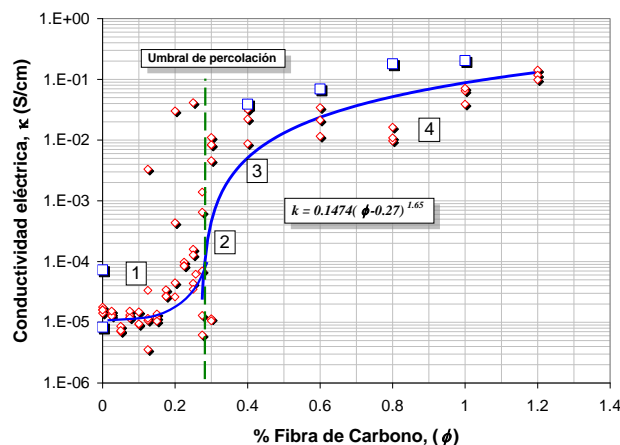


Figura 5. Conductividad eléctrica de la PCC como una función del porcentaje de fibra de carbono agregado a la mezcla. Los rombos rojos representan los valores de conductividad obtenidos por 4P y los cuadros azules los obtenidos por EIS, la línea continua azul es el ajuste de los datos de 4P de la ecuación 4.

En base a estos resultados la relación entre conductividad y por ciento de fracción volumétrica de fibra de carbono se observan cuatro regiones, estas se representan en la figura 45 mediante números encerrados en cuadros. En la región 1 o región de aislamiento los valores presentes de conductividad son bajos y es debido a que las fibras están tan separadas y distribuidas de manera uniforme en la matriz no conductora de pasta de cemento y no existe un camino de conducción eléctrica entre los extremos del elemento cilíndrico. En la región 2 ó de transición, al incrementarse la cantidad de fibra de carbono, comienzan a formarse aglomerados de fibra y se establecen los primeros caminos de conducción eléctrica de extremo a extremo del espécimen provocando un incremento de varios órdenes de magnitud en la conductividad eléctrica. En la región 3 o de conducción, las fibras han alcanzado su máxima dispersión en la mezcla y se han establecido los contactos entre las fibras de forma que los caminos de conducción son los más cortos de extremo a extremo del elemento, esta región se puede considerar como el contenido óptimo de fibra carbono en la mezcla, ya que en la región 4 o de exceso de fibras, la cantidad de fibras es tal que la longitud de los caminos de conducción no disminuyen al incrementarse la fracción volumétrica de fibra de carbono lo que trae como consecuencia que la conductividad se incrementa ligeramente y la adición de más fibra no produce un incremento significativo en la conductividad.

Ahora bien, al realizar el ajuste de los datos experimentales a la ecuación 1 se obtiene la siguiente ecuación

$$\kappa = 0.1474(\varphi - 0.27)^{1.65} \quad (4)$$

Donde se distingue un valor para el umbral de percolación de 0.27 % de fracción volumétrica de fibra de carbono. En cuanto al valor del exponente $t = 1.65$, éste no depende de los detalles de la geometría de la red de interconexiones de la fibra de carbono. En la figura 6, se muestra la relación entre los valores de conductividad eléctrica obtenidos por el método de EIS y por el de cuatro puntas.

Como se aprecia en la gráfica, los valores se ajustaron a una línea recta en la cual la pendiente (0.9646) se aproxima al valor de 1 confirmando un buen grado de aproximación entre los dos diferentes métodos para la determinación de la conductividad. La relevancia de comparar EIS y 4P resulta de que, en el primer caso es necesario contar con equipo especializado y personal altamente capacitado para la obtención e interpretación de los valores de impedancia, en cambio por el de 4P el equipo necesario resulta ser más fácil de adquirir y de menor costo. Lo anterior pone de manifiesto que utilizando el método de 4P se puede medir con bastante precisión la conductividad eléctrica de una pasta de cemento conductora, siempre y cuando se evite en lo posible el efecto de conductividad debida a los iones de la solución de poro de la pasta de cemento que tiende a generar la polarización de los electrodos.

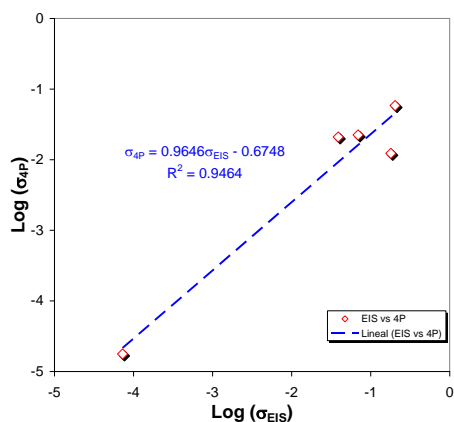


Figura 6. Grafica comparativa entre la conductividad obtenida por EIS y los valores determinados por el método de 4P.

CONCLUSIONES

El umbral de percolación para una mezcla de pasta de cemento adicionada con polvo de grafito y fibra de carbono se presenta para un porcentaje de fibra de carbono 0.27%.

La conductividad eléctrica máxima obtenida de la pasta de cemento con fibra de carbono y polvo de grafito fue de 0.13 S/cm para un porcentaje de fibra de carbono de 1.2. Para un porcentaje de 0.6 de fibra de carbono la conductividad alcanzada fue de 0.03 S/cm.

La relación entre conductividad eléctrica de la pasta de cemento conductora con respecto al porcentaje en fracción volumétrica de fibra de carbono se ajusta a la ley de potencias de la teoría de percolación de acuerdo a la física de sólidos amorfos.

La relación entre los valores de conductividad obtenidos por los método de EIS y 4P presentan una relación cercana a la unidad. Mostrando la viabilidad de emplear el método de 4P para la determinación de los valores de conductividad en muestras de pasta de cemento conductor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa y al CONACYT por el apoyo financiero para la realización de esta investigación mediante los proyectos PROFAPI 2013/020 y CB-183747, respectivamente.

REFERENCIAS

1. L. Bertolinia, F. Bolzonía, T. Pastore, y P. Pedferria. "Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete", *Cement and Concrete Research*. 34, 4 (2004): pp. 681-694.
 2. D.D.L. Chung, "Resistance heating using electrically conductive cements", *Advances in Cement Research*, 16,4 (2004): pp 161-166.
 3. S. Wen, D. Chung, "Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement–matrix composites", *Carbon*, 45, 3 (2007): pp. 505-513.
 4. A. Pérez, M.A. Climent, P. Garcés, "Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete using a conductive cement paste as the anode", *Corrosion Science*, 52, 5 (2010) : pp. 1576-1581.
 5. Ping Xie, Ping Gu, J.J. Beaudion, "Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres", *Journal of Materials Science.*, 31, 15 (1996): pp. 4093-4097.
 6. R. Zallen, *The Physics of Amorphous Solids*, Wiley, New York, 135-204, (1983).
- D. A. Whiting, M. A. Nagi, *Electrical Resistivity of Concrete*, PCA R&D Serial No. 2457, Portland Cement Association, 12,(2003).

PROPIEDADES CEMENTOSAS DE UNA ESCORIA DE CUBILOTE

R. A. Jasso-Terán, J.M. Almanza-Robles, J Iván Escalante-García

Cinvestav IPN Unidad Saltillo, Av Industria Metalúrgica 1062, Parque Industrial Saltillo- Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, México C.P. 25900.

RESUMEN

Se caracterizaron las propiedades cementosas de una escoria de cubilote de fundición de hierro, mediante dos rutas. Serie A: Cemento portland con 30-70% de escoria; esta redujo la resistencia mecánica, pero los resultados parecen prometedores a largo plazo. Serie B: activación con 4-12%Na₂O usando silicato de sodio; algunas pastas mostraron lento fraguado, aunque se alcanzaron más de 30MPa a 28 días. Posteriormente se aplicó activación mecanoquímica a la escoria en suspensiones con exceso de agua. Dicha activación combinada con un curado a 60° fue favorable, porque se redujeron los tiempos de fraguado y se incrementaron las propiedades mecánicas. La difracción de rayos X indicó que la wollastonita de la escoria no participó en las reacciones, aunque pudo servir como centro de nucleación de productos de hidratación. Las microestructuras fueron densas, mostrando que la activación mecanoquímica refinó el tamaño de las partículas de la escoria y promovió su reactividad.

Palabras clave: Escoria, Reactividad, Activación alcalina, Microestructuras, activación mecanoquímica

ABSTRACT

The cementitious properties of a cupola slag from an iron foundry were characterized by 2 routes. Series A: Portland cement replaced with 30-70% slag, the latter reduced the strength; however, the trends are promising for longer ages. Series B: activation with 4-12%Na₂O using waterglass: some pastes displayed slow setting, some reached above 30MPa after 28 days. A second stage included the mechanochemical activation of the slag in slurries; such activation combined with curing at 60°C was favorable to reduce the setting times and the 28 day strength. X-ray diffraction indicated that the wallastonite from the slag did not participate in the reactions, although it may have served as nucleation sites for hydration products. The microstructures were dense, showing that the mechanochemical activation reduced the slag particle size while enhancing its reactivity in favor of the strength.

Keywords: Slag, Reactivity, alkaline activation, microstructures, mechanochemical activation

INTRODUCCIÓN

Este trabajo aborda la línea de investigación de cementos de bajo impacto ambiental alternativos al Cemento Portland (CP). El CP es más utilizado en el mundo, su producción es altamente demandante de recursos naturales y energéticos; adicionalmente, es responsable de alrededor del 7% de las emisiones anuales de CO₂ antropogénico¹. Sumado a la necesidad de atender aspectos medioambientales, es importante desarrollar opciones de materiales cementosos de menor costo, lo que puede lograrse con la utilización de subproductos industriales, como el caso de las escorias metalúrgicas; esto logra simultáneamente ventajas ambientales adicionales, al reducir la acumulación de desechos y convertirlos en materiales útiles a la sociedad.

Entre los diversos subproductos industriales con potencial para reemplazar al CP se encuentran las escorias metalúrgicas, entre las cuales la de alto horno se ha utilizado desde inicios del siglo pasado. La patente de Kuhl² menciona la activación de escoria de alto horno (EAH) con cal y sulfato o carbonato de sodio; dichas mezclas fraguaban lentamente. Posteriormente, Purdon publicó un estudio en 1940³ y comercializó el producto. Dicha escoria ha sido usada en países del Este y en algunos de Europa por años⁴. La EAH tiene una composición del grupo SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO, y cuando es tratada adecuadamente a la salida del horno puede mostrar características cementosas cuando es mezclada con cemento portland o con agentes alcalinos. Como sustituto parcial de CP, la escoria modifica la reacción de este⁵ y mejora las propiedades de los concretos^{6,7,8}. Como sustituto total del CP la escoria reacciona en cementos activados formando productos cementos similares a los del CP⁹. El mecanismo de reacción involucra la disolución de la red vítrea de la escoria y la posterior precipitación de productos de carácter cementoso. Las características que controlan el desarrollo de las propiedades cementosas son la cantidad de fracción vítrea, la acidez, la finura, la temperatura de curado, entre otras¹⁰.

Existe poca información sobre el uso de la Escoria de cubilote (EC). La referencia más cercana sería la EAH, aunque existen claras diferencias entre estas en términos del tipo y cantidad de fase vítrea, la reactividad y por ende en el comportamiento cementoso. Algunas investigaciones reportan sobre algunos usos de la EC, por ejemplo para la síntesis de zeolitas sintéticas¹¹, en mezclas cerámicas para la fabricación de baldosas¹², en la fabricación de tubos de drenaje¹³ y en la producción de materiales aislantes¹⁴. Algunas de dichas aplicaciones no son de uso masivo y en otras existe la necesidad de tratamiento térmicos a la materia prima, lo que resta sustentabilidad al dichos procesos de reutilización. Por otro lado, la escoria de cubilote ha mostrado propiedades puzolánicas¹⁵, aunque no existen muchos trabajos al respecto. Se espera que por algunas de sus características de composición química y mineralógica, la EC sea propensa a la activación alcalina. Este trabajo presenta un estudio sobre la evaluación del carácter cementoso de la escoria siguiendo rutas convencionales mediante activación en compósitos con CP y mediante el uso de activantes alcalinos; adicionalmente, se exploró el uso de la activación mecanoquímica para mejorar la reactividad de la EC.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se empleó una escoria de cubilote de fundición de hierro. Esta se sometió a un proceso de reducción de tamaño de partícula usando un molino de bolas; el 90% de las partículas mostró un tamaño menor que 90 μm . La tabla 1 muestra la composición química, en la que predomina el SiO_2 y el CaO , con contenidos menores de Al_2O_3 . El patrón de difracción (Figura 1) mostró la presencia de pseudowollastonita cristalina y la abundancia de fase amorfa descrita por el halo entre 20 y 35° 2theta. La EC mostró partículas con morfología angular similar a la de otros cementantes. Estas características químicas y estructurales sugieren buen potencial de la escoria para funcionar como material cementante. Como medios activantes químicos se usaron un cemento portland comercial CPC30 y una solución alcalina de vidrio soluble de un Módulo de $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1$.

Tabla 1 Composición química de la escoria de cubilote, obtenida mediante fluorescencia de rayos X

Oxides	Cr ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TOTAL
% en peso	0.04	0.08	0.116	0.163	0.294	0.465	0.553	0.648	1.13	1.762	6.175	41.29	47.25	99.96

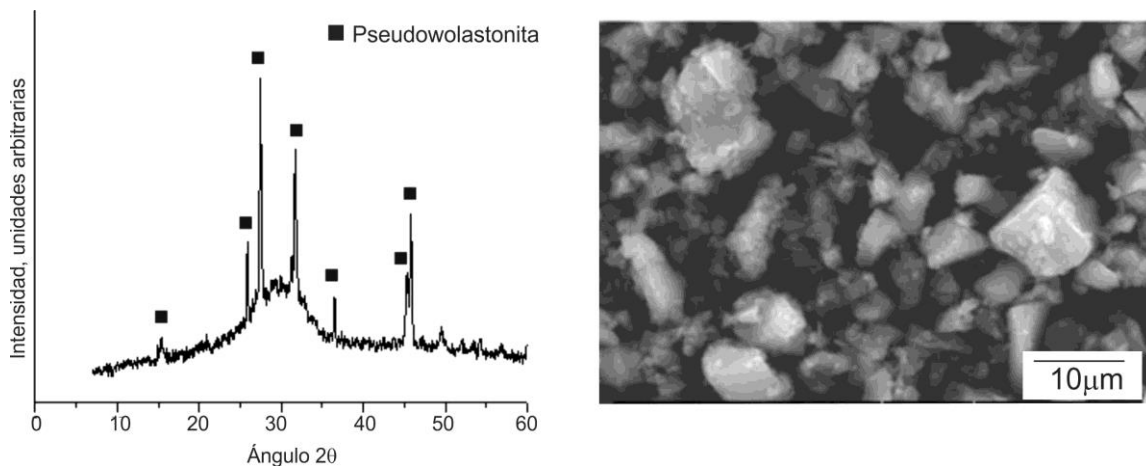


Figura 1 Patrón de difracción de rayos X y micrografía de los polvos de la escoria de cubilote

Se fabricaron pastas con dos tipos de formulaciones. La Serie A, EC activada con cemento portland en mezclas EC-CP (%en peso) de 30-70, 50-50 y 70-30. La serie B fueron pastas de EC activada con el silicato de sodio, este se agregó en equivalencia de 4, 8 y 12% Na_2O con respecto al peso de la EC. La relación agua/cementante fue de 0.5, usando agua potable. Se prepararon pastas de referencia 100%CP. En la Etapa 1, se fabricaron pastas por métodos convencionales; los polvos y soluciones se mezclaron por 5 minutos en un contenedor de 4 litros y usando una batidora con movimiento planetario. En la etapa 2, antes del vaciado se aplicó un tratamiento de activación mecanoquímica (AMQ): una fracción de la EC mezcló con el total del agua de mezcla y los agentes activantes formando una barbotina; esta se sometió a tiempos

de molienda de 0.75, 1 y 3 horas, en un contenedor de acero inoxidable con bolas del mismo material. Luego de la molienda, la barbotina resultante se mezcló con el resto del polvo de EC en la batidora antes descrita. Las pastas se vaciaron en moldes de polímero resistente a los álcalis con cavidades de 2.5x2.5x15cm. Los moldes llenos se colocaron en una mesa vibratoria por 1min para eliminar aire atrapado y compactar las muestras, posteriormente se recubrieron con plástico para evitar pérdida de humedad. Las pastas se dejaron fraguar por 24 h a 20 ± 2 °C ó 60 ± 3 °C por 24 h y después a 20°C. Las operaciones de curado se realizaron en cámaras isotérmicas a las temperaturas requeridas. Las muestras solidificadas se desmoldaron y se cortaron en cubos de 2.5 por lado usando un disco de diamante. El curado se realizó en seco en la cámara isotérmica a 20°C con una HR= 36% hasta las fechas de estudio.

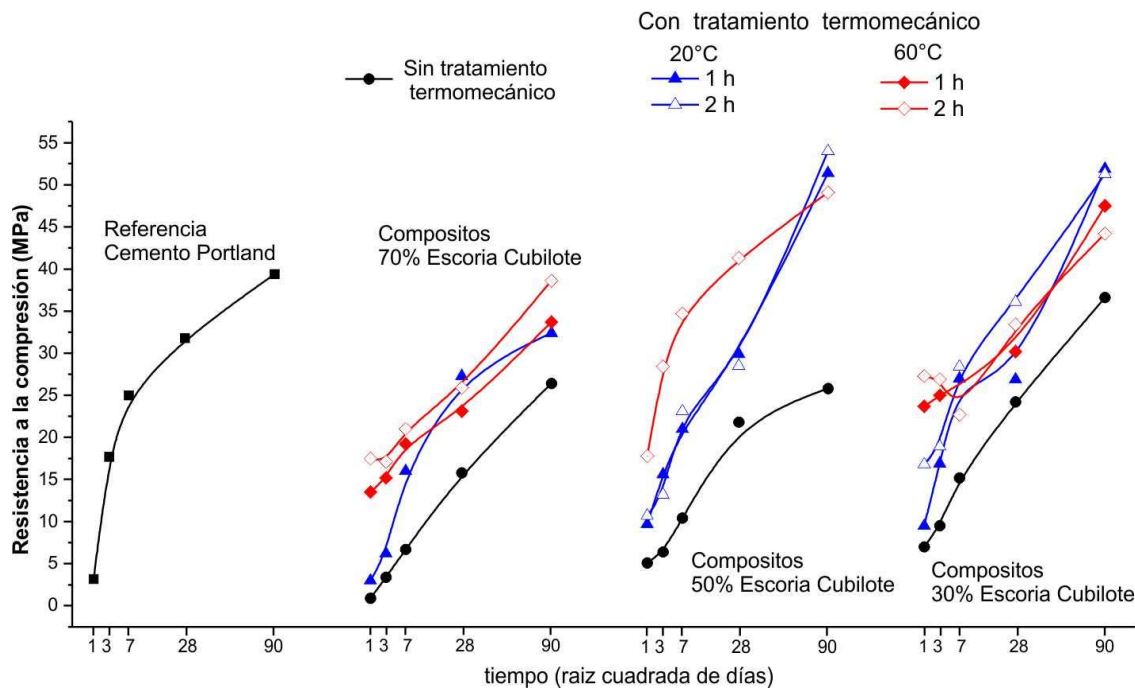


Figura 2. Resistencia a la compresión vs. Tiempo para los compósitos de cemento portland con escoria de cubilote

La resistencia a la compresión (RC) se reporta como el promedio de 4 cubos por cada fecha de curado entre 1 y 90 días. Luego de los ensayos mecánicos, se tomaron alícuotas para identificación de los productos de reacción formados mediante difracción de rayos X. Para esto se tomaron trozos de pasta y procesaron en un molino planetario con media de ágata, hasta pasar la malla de apertura de $150\mu\text{m}$. Para analizar las microestructuras se analizaron muestras pulidas mediante imágenes por electrones retrodispersados en un microscopio electrónico de barrido; para esto se montaron trozos de pastas en resina y se sometieron a desbaste con lijas de SiC y pulido con pasta de diamante, usando lubricantes libres de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 presenta resultados de resistencia a la compresión vs tiempo para las pastas de la Serie A (cemento CP-EC); los resultados se agrupan en función de los 3 contenidos de EC, los cementos sin tratamiento AMQ se presentan en negro y aquellos con AMQ (SerieA-AMQ) en colores rojo y azul. Para la serie A, a 1 día, la presencia de 30 y 50% EC mejoró la resistencia relativo al cemento puro, mientras lo contrario se notó para la pasta con 70%EC. Por otro lado, entre 3 y 90 días, la presencia de la EC redujo la resistencia mecánica; a 90 días se registraron 40, 39, 36, 26 y 26 MPa para 0, 30, 50 y 70%EC, respectivamente. Las curvas muestran tendencia hacia mayores resistencias a futuro, más marcada en los compósitos, lo que sugiere un uso ventajoso de la EC. La implementación del tratamiento AMQ resultó notablemente favorable en los cementos compósitos. Aquellos con 30%EC alcanzaron resistencias superiores al CP puro, el AMQ por 2 horas aumentó la RC de 3 días hasta 17 y 27 MPa a 20 y 60°C, respectivamente; mientras que a 90 días se alcanzaron 51 y 44 MPa a 20 y 60°C (denotando que la temperatura es favorable en el corto plazo pero no en el largo plazo). La pasta con 70%EC con 2 horas de AMQ y curado a 60°C mostró resistencias similares a las del CP puro.

La figura 3 muestra los resultados de resistencia mecánica vs tiempo para pastas de la serie B, con y sin tratamiento AMQ. Los cementos sin AMQ con 4% Na₂O tardaron hasta 3 días en fraguar, adicionalmente, el incremento en el %Na₂O resultó favorable solo en los primeros 7 días y no en el largo plazo. La activación con 8% Na₂O fue el más eficiente, y la pasta mostró mejor resistencia a 28 y 90 días que la de 100%CP. La aplicación del AMQ con curado a 20°C no resultó en ventajas en los primeros 3 días, aunque entre 7 y 90 días la RC aumentó notablemente, de forma que para 4 y 8% Na₂O se registraron 62 y 75 MPa, respectivamente. La combinación de AMQ con curado a 60°C incrementó notablemente la RC a 1 día, con 4 y 8% Na₂O se alcanzaron entre 22 y 32 MPa; adicionalmente la resistencia aumentó con el curado subsecuente hasta 90 llegando hasta 87 MPa para la pasta curada a 60°C y 0.75h de AMQ. Las pastas con 12% Na₂O pierden resistencia, quizá explicado por el exceso de Na₂O, que sufre carbonatación y daños a la microestructura, como sucede para otros cementos activados por álcalis.¹⁶

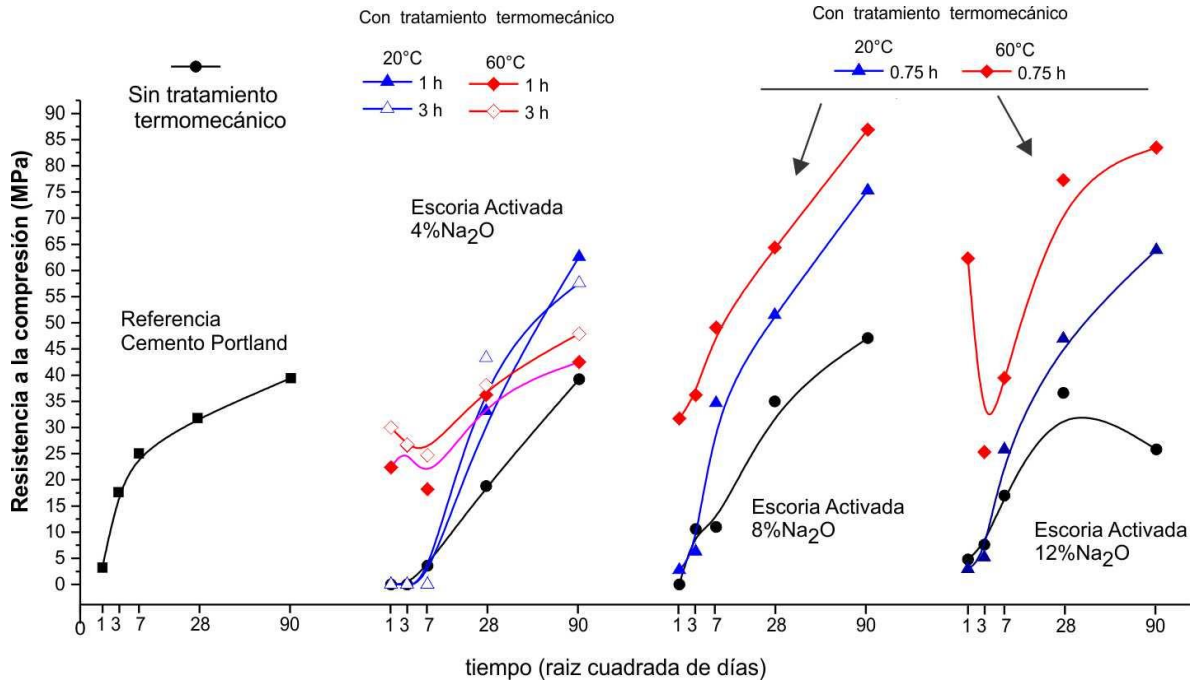


Figura 3 Resistencia a la compresión vs tiempo para cementos EC activados con silicato de sodio, con y sin AMQ

La Figura 4 presenta los patrones de difracción de los cementos de EC activada con 8%Na₂O, con y sin AMQ. Se observó que las fases cristalinas permanecieron sin reaccionar aun después de aplicar el AMQ y curado a 60°C. Por otro lado, en la pasta sin AMQ desde 3 días se observó la aparición de un pico a aproximadamente 30°2θ que puede asignarse a la formación de C-S-H pobremente cristalino; dicho pico se intensificó con el paso del tiempo. El patrón de la pasta tratada con AMQ mostró que dicha reflexión fue más intensa que en la pasta sin AMQ, más aún, a 60°C el pico se notó más intenso. Estos resultados son congruentes con lo observado en la sección previa, esto es, al aplicar el AMQ se mejoran las propiedades mecánicas, lo que concuerda con reflexiones más intensas del C-S-H en los patrones DRX. La wollastonita se comportó como químicamente inerte; sin embargo, es posible que las partículas hayan servido como centros de nucleación para favorecer el avance de las reacciones, como sucede con otro tipo de agregados inertes.¹⁷

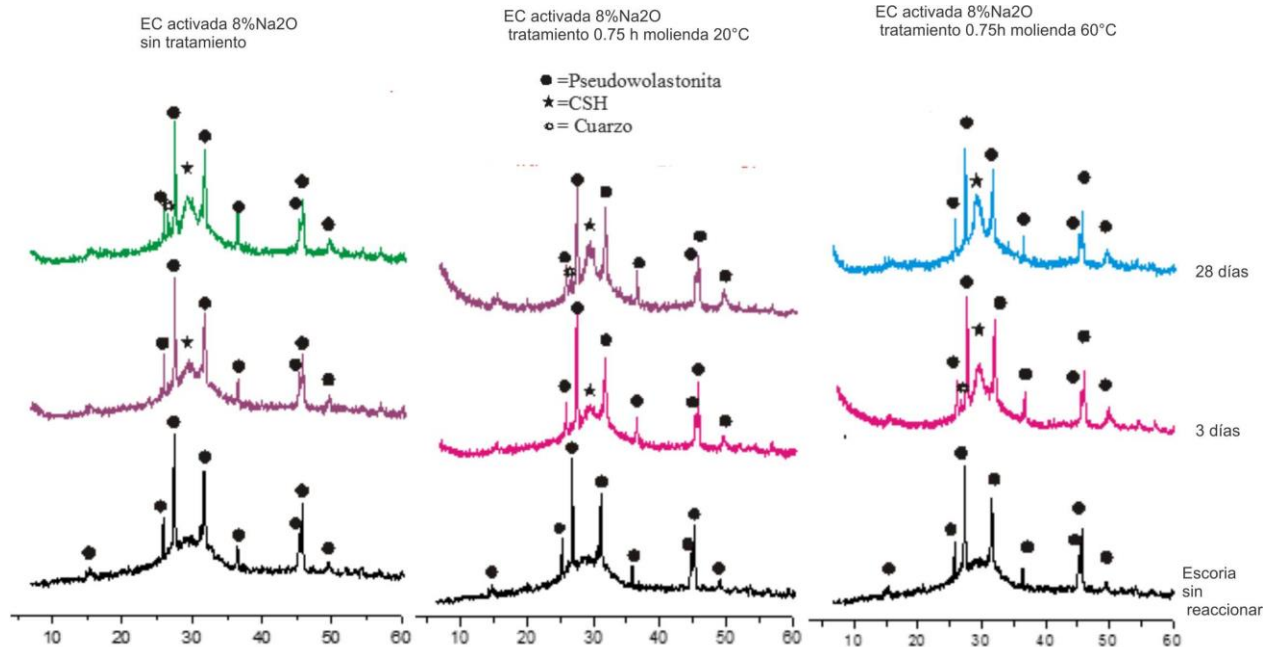


Figura 4. Patrones de difracción de pastas de EC activada con silicato de sodio, con y sin AMQ.

La Figura 5 presenta las microestructuras de pastas de cementos de la Serie A, compósitos 50%EC-50%CP, y de la Serie B, cementos de 100%EC activados con 8%Na₂O. Los compósitos EC-CP sin AMQ mostraron microestructuras típicas de cementos compósitos, en las que notaron partículas de EC sin reaccionar y porosidad; se observaron pocos granos de CP sin reaccionar, lo que sugiere que la EC favoreció las reacciones del CP. El efecto de la aplicación del AMQ combinado con curado a 60°C, resultó que las partículas de EC se observaron con menor tamaño de partícula y en una clara densificación de la microestructura, lo que se reflejó en las mayores propiedades mecánicas discutidas previamente; adicionalmente, se notaron partículas de CP sin reaccionar, lo que indica que el curado a alta temperatura forma productos densos alrededor de los granos y limita la reactividad posterior, en acuerdo con la trabajos previos¹⁸.

Las pastas de cementos de EC activadas con silicato de sodio mostraron una microestructura notablemente más densa que las pastas de EC-CP, lo que es congruente con las propiedades mecánicas comparativamente mayores. Los granos de EC sin reaccionar se identifican por la tonalidad brillante y morfología angular, y están inmersos en una matriz de productos de reacción de un tono gris más oscuro. En imágenes por electrones retrodispersados, los productos de hidratación presentan una tonalidad más oscura por la presencia del hidrógeno en la composición, el cual reduce el número atómico promedio y por ende la brillantez de la fase. La aplicación del AMQ resultó en la presencia de partículas de EC más pequeñas, lo que favoreció su reactividad. En ambos casos, los granos de EC más pequeños mostraron anillos de reacción rodeando al centro brillante. Esto indica que la EC reacciona de manera similar a la escoria de alto horno, esto es, mediante un proceso de disolución en el medio alcalino y posterior precipitación de compuestos cementosos y en etapas

posteriores mediante un mecanismo en estado sólido, en el cual los granos de EC se consumen hacia el interior.

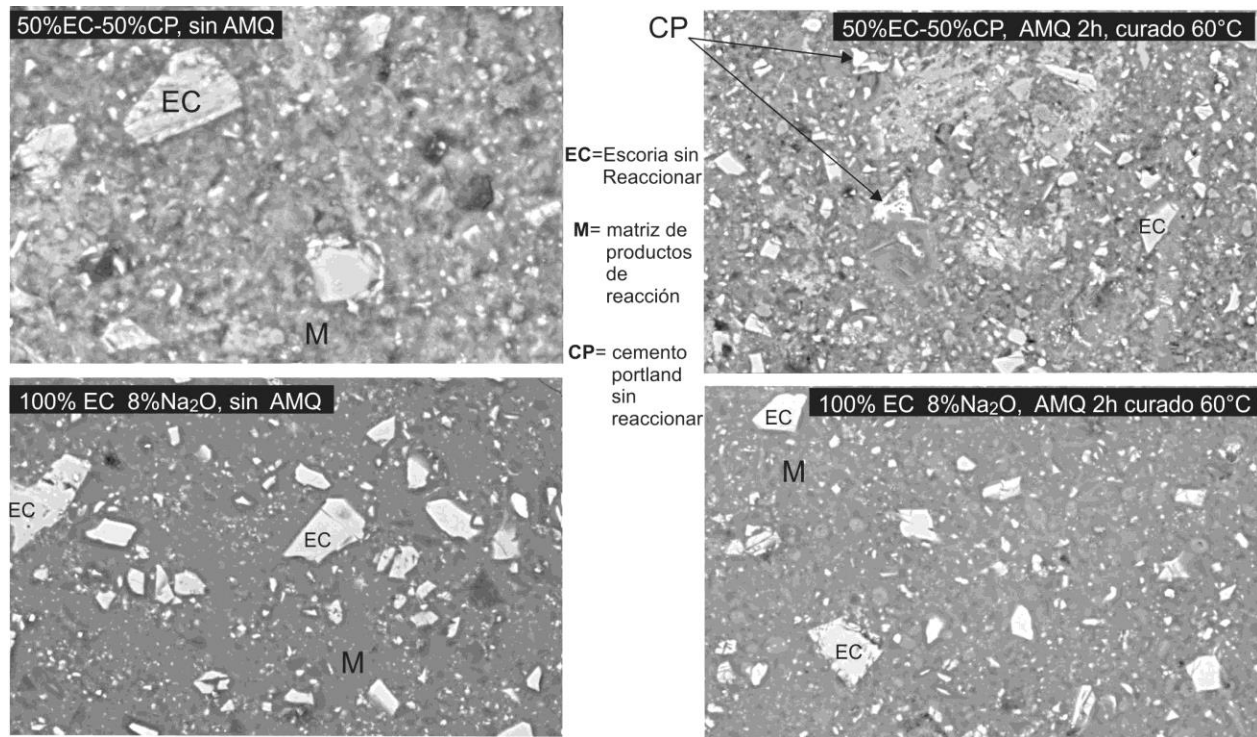


Figura 5 Microestructuras de cementos compósitos CP-EC y cementos de EC activados por Silicato de sodio.

CONCLUSIONES

La sustitución de cemento portland por escoria de cubilote redujo la ganancia de resistencia mecánica de las pastas procesadas convencionalmente; sin embargo, el procesamiento mediante activación mecanoquímica combinada con un curado inicial a 60°C incrementó la notablemente resistencia de los cementos compósitos superando a la pasta de 100% de cemento portland.

En los cementos de escoria de cubilote activados con silicato de sodio procesados convencionalmente, se observaron tiempos de fraguado de hasta 3 días en algunas formulaciones; se alcanzaron resistencias de hasta 47MPa. La activación mecanoquímica mejoró notablemente la resistencia entre 28 y 90 días, el curado a 60°C fue favorable para potenciar la resistencia a los 3 días. Las pastas de EC activadas superaron la resistencia del cemento portland puro.

Mediante difracción de rayos X se evidenció la formación de compuestos cementosos del tipo C-S-H en los cementos de EC activados con silicato de sodio, lo que es congruente con las propiedades mecánicas observadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto CB 53563 y la beca de R Jasso Terán.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ J. A. Stegemann (2002) The Potential role of energy-from-waste air pollution control residues in the industrial ecology of cement, *J Sustainable Cement-Based Materials*, (2013) [3], 111-127
- ² H. Kuhl, H, Slag cement and process of making the same. U.S. Patent 900,939 (1908).
- ³ A.O. Purdon, 'The action of alkalis on blast-furnace slag', *J. Soc. Chem. Ind.- Trans. Commun.* 59 (1940) 191-202.
- ⁴ C. Shi, P. Krivenko, D. M.Roy, *Alkali-Activated Cements and Concretes*. (Taylor & Francis, Abingdon, UK, 2006)
- ⁵ J.I. Escalante-Garcia, J.H. Sharp, Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cements: Part II, blended cements, *Cem Concr Res*, 28: (1998) 1259-1274
- ⁶ G.J.Osborne, Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, *Cem Concr Comp* 21(1999) 11-21
- ⁷ J.S. Lumley, The ASR expansion of concrete prisms made from cements partially replaced by ground granulated blastfurnace slag, *Constr Build Mater* 7 (1993) 95-99
- ⁸ B.S. Divsholi, T.Y.D. Lim, S. Teng, Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete, 2014, Volume 8, Issue 2, pp 157-164
- ⁹ J.I. Escalante-Garcia, A.F. Fuentes, A. Gorokhovsky, P.E. Fraire-Luna, G. Mendoza-Suarez, hydration Products and Reactivity of Blast-Furnace Slag Activated by Various Alkalis, *J. Am. Ceram. Soc.*, 86 [12] 2148–53 (2003)
- ¹⁰ J.I. Escalante-Garcia, P. Castro-Borges, A.Gorokhovsky, F.J. Rodriguez-Varela, Portland cement-blast furnace slag mortars activated usingwaterglass: Effect of temperature and alkali concentration, *Constr Build Mater* 66 (2014) 323–328
- ¹¹ Rewadee Anuwattana, P. K.. "Conventional hydrothermal synthesis of Na-A zeolite from cupola slag and aluminum sludge". *J Hazard Mater* , Vol.166 , (2009), p.p. 227–232
- ¹² E.E. Dement, E.O. Dement, N. Churikova, "Ceramic mix for manufacture of tiles", RU Patent No. 2308438, (2007).
- ¹³ E.E. Dement., S. Marksimov, N. Churikova, "Ceramic mass for manufacturing drain tubes", RU Patent No. 2309926, (2007).
- ¹⁴ G. Klose, A. Leismann, G. Nykiel, "Method for producing insulating materials from mineral", WO Patent No. 02057194, (2002).
- ¹⁵ D.A. Aderibigbe, A.E. Ojobo, "Propieties of cupola slag as a pozzolana and its effects on partial replacement of cement in a mortar". *Conserv Recycling* , Vol. 5, (1982), p.p. 203-208.

¹⁶ O. Burciaga-Diaz, J.I. Escalante-Garcia, R. Arellano-Aguilar, A. Gorokhovsky, Statistical Analysis of Strength Development as a Function of Various Parameters on Activated Metakaolin/Slag Cements, J Am Ceram Soc 93 [2] 541–547 (2010)

¹⁷ W.A. Gutteridge, J.A. Dalziel, Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part I. A fine non-hydraulic filler, Cem Concr Res 20 (1990) 778-782

¹⁸ J.I. Escalante-Garcia, J.H. Sharp, Effect of Temperature on the Hydration of the Main Clinker Phases in Portland Cements: Part I, Neat Cements, Cem Concr Res 28 (1998) 1245-1257

CARACTERIZACIÓN Y GEOPOLIMERIZACIÓN DE UNA ESCORIA DE CONCENTRADOS DE PLOMO Y ZINC PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS

G. Millán¹, R.X. Magallanes-Rivera¹, O. Burciaga¹, R. González-López¹, A.A. Zaldivar¹

1. Universidad Autónoma de Nuevo León-UANL, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66451.

RESUMEN

En este estudio se evaluó la activación alcalina de un residuo industrial de un proceso de fundición de concentrados de Pb-Zn utilizando una combinación de silicato de sodio e hidróxido de sodio a 55°C para ser utilizado como un cementante geopolimérico. Las observaciones cualitativas así como la resistencia mecánica se registraron para evaluar la viabilidad de la utilización de la escoria. Además, se realizaron pruebas de DRX, SEM/EDS, FTIR para investigar los mecanismos subyacentes de la hidratación y la caracterización de la escoria. Los resultados revelaron que la activación alcalina de la escoria es viable, desarrollando resistencia a la compresión de más de 45 MPa para curados a edades de 28 días.

Palabras clave: Escoria, Cementante alternativo, Silicato de sodio, Hidróxido de sodio, Geopolimerización.

ABSTRACT

In this study, the alkaline activation of an industrial waste from smeltings of Pb-Zn concentrates was evaluated using a combination of sodium silicate and sodium hydroxide at 55°C to be used as a geopolymer binder. Qualitative observations as well as mechanical properties assays were recorded to assess the viability of the slag utilization. XRD, SEM/EDS, FTIR tests were conducted to investigate the hydration mechanisms and characteristics of the slag. The results revealed that the activation of the slag is pertinent as compressive strength for up to 45 MPa at the age of 28 days was achieved.

Keywords: Slag, Alternative binders, Sodium silicate, Sodium hydroxide, Geopolymerization.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una creciente conciencia global de la contaminación ambiental, a la par de un aumento de subproductos y desechos industriales, y por lo tanto, se ha incrementado notablemente la investigación y uso de cementantes suplementarios en el concreto de cemento Portland ^[1,2]. El uso de estos materiales, tales como cenizas volantes, escorias industriales, humo de sílice y metacaolín, como reemplazo parcial de cemento Portland ha ido en aumento en todo el mundo, particularmente en la producción de concreto de alta resistencia y de alto desempeño, debido a la habilidad potencial de estos materiales para mejorar las propiedades del concreto a través de su efecto como relleno y sus propiedades de reacción ^[3].

La escoria de alto horno es un subproducto de la producción de arrabio, una etapa preliminar del proceso en la fabricación de acero, que puede ser usado tanto para reemplazar parcialmente el cemento Portland, o bien, como un material cementante *per se* después de su activación química. Varios factores influyen en la reactividad de la escoria, entre ellos están: área superficial específica, la composición química, la fracción vítrea, etc ^[4].

Las propiedades hidráulicas de la escoria de alto horno pueden activarse por varios métodos; dentro de los cuales el más importante consiste en incrementar los valores del pH (mayores a 13) en una solución de los poros, es decir, activación alcalina para acelerar la disolución de la red vítrea de la escoria y dar inicio a un proceso de hidratación por geopolimerización ^[5].

Los geopolímeros se forman cuando diversos materiales que contienen alúmina y sílice reaccionan en condiciones altamente alcalinas para formar una red tridimensional de enlaces Si-O-Al-O ^[6]. La geopolimerización de materiales puede implicar beneficios ambientales por la reducción del consumo de recursos naturales y en un menor impacto ecológico, ya que se estima que la síntesis de un cemento geopolimérico representaría una emisión de CO₂ entre 5 y 6 veces menor en comparación con la síntesis del cemento Portland ^[7].

Las matrices de los geopolímeros dan lugar a un escenario de lixiviación que se caracteriza por un ambiente altamente alcalino, que inhibe la movilidad de metales pesados ^[8]; es decir, ofrece un aglutinante ideal para la inmovilización de los contaminantes tóxicos y de residuos radiactivos catiónicos, debido a su baja permeabilidad, resistencia al ataque ácido, y durabilidad en determinadas situaciones donde el cemento Portland tradicional experimenta debilidades ^[9,10].

Para la fabricación de geopolímeros se pueden utilizar diferentes tipos de escorias residuales provenientes de diversos procesos metalúrgicos, sin embargo; este debe ser un material silicoaluminoso primordialmente ^[11]. Un material que puede ser utilizado como base de partida para la fabricación de un tipo de geopolímero es la escoria de fundición con concentrados de plomo y zinc, debido a dos razones; por una parte, se estima que por cada tonelada de Pb metálico se genera alrededor de 1.5 veces esa cantidad de escoria, lo cual según datos del Servicio Geológico Mexicano, significó casi 216,000 T sólo en el año 2009 en nuestro país ^[11], los cuales, en la actualidad no

poseen aplicación práctica. Por otro lado, aún cuando estos desechos son confinados, de acuerdo a la composición química típica que exhiben (Al_2O_3 en 3.4%, SiO_2 en 16.9%, CaO en 19.7%, Fe_2O_3 en 30.3%), son materiales que podrían ser potencialmente susceptibles a la lixiviación de metales pesados por efecto del intemperismo.

El presente trabajo de investigación tiene por objeto estudiar la factibilidad del uso de una escoria de fundición de concentrados de plomo-zinc, para la fabricación de un cementante activado alcalinamente, con características hidráulicas semejantes a las del cemento Portland ^[12].

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materia prima

La escoria se obtuvo de una planta fundidora del norte de México en forma granular, por lo cual se sometió a molienda hasta alcanzar una finura Blaine de $4079 \text{ cm}^2/\text{g}$ en un molino de bolas de alta energía a un tamaño de partícula promedio de $\sim 40 \mu\text{m}$. La caracterización se realizó en relación a la determinación de la composición química, granulometría, fases mineralógicas y morfología.

La composición química determinada por fluorescencia de rayos x (FRX) mostró que la escoria contiene los elementos esenciales para la reacción cementante en cantidades suficientes y similares a las de otros trabajos reportados para fabricación de geopolímeros ^[13] (Al_2O_3 en 3.4%, SiO_2 en 16.9%, CaO en 19.7%, Fe_2O_3 en 30.3%).

En las micrografías de la escoria molida (Figura 3) se detectaron pequeñas incrustaciones de Pb^0 metálico en algunas zonas de las partículas, asimismo se observaron algunas partículas de tamaños menores a $1 \mu\text{m}$ y una morfología irregular general derivada del acondicionamiento mecánico. Por su parte, la gravedad específica del material se calculó en 3.81 g/cm^3 , por medio del desplazamiento de líquido en matraz Le´Chatelier.

Diseño de mezclas, preparación de especímenes y caracterización

Se utilizó como activador un silicato de sodio Na_2SiO_3 con 57% de H_2O y un módulo $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2$ para preparación de pastas. El módulo se modificó para un sistema adicional a 2.5 con la adición de NaOH , manteniendo constante la relación $a/c=0.35$ para todas las mezclas. Las proporciones de las mezclas estudiadas se pueden observar en la Tabla 1. La preparación de los especímenes se puede resumir de la siguiente manera: En un vaso de precipitado se disuelve el NaOH con el agua de mezclado durante 2 min, posteriormente, en una mezcladora mecánica se añade la disolución junto con el silicato de sodio y la escoria y se mezcla durante 30 s a velocidad baja, se detiene el ciclo para limpiar las paredes de la mezcladora, y se continúa mezclando a velocidad media durante 1 min. La pasta se vació en moldes prismáticos de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ relleno en tres capas y compactando. Inmediatamente después las muestras se cubren y mantienen en el horno de curado a 55°C con 83% de HR por 24 h. Los especímenes fueron sacados del horno y se mantuvieron en condiciones ambientales con una temperatura promedio de $23\text{-}25^\circ\text{C}$ y humedad relativa de 30%, hasta los ensayos mecánicos por pruebas de “flexocompresión”.

Las pruebas de resistencia a flexión y compresión se realizaron de acuerdo a las normas ASTM C348 y ASTM C349 en una prensa universal marca *Instron*. Todas las muestras se ensayaron a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. La caracterización microestructural de especímenes seleccionados y de materia prima se realizó en pruebas repetidas para difracción de rayos x (DRX), microscopía electrónica de barrido con espectroscopía por dispersión de energía (SEM/EDS) y espectroscopía infrarrojo (FTIR).

Tabla 1. Proporcionamiento de las mezclas en gramos

MEZCLA	ESCORIA	Na ₂ SiO ₃	NaOH	AGUA ADICIONAL	a/c	SOLUCIÓN/SOLIDOS	SiO ₂ /Na ₂ O
M ₂ A	2000	400	220	423	0.35	0.299	2
M _{2.5} A	2000	500	158	380	0.35	0.299	2.5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la escoria

Análisis por DRX. El difractograma por DRX de la escoria mostrado en la Figura 1 muestra que las fases principales cristalinas presentes son un silicato de calcio en forma de wollastonita (CaSiO₃), óxido de hierro (FeO), una fase de óxido de zinc o zincita y Pb metálico. La fase cristalina que se encontró con mayor intensidad de difracción fue la wollastonita, mostrando mayor intensidad en el pico a 29° 2θ, mientras que el óxido de hierro (FeO) presentó reflexiones en 36.2, 42.1 y 61.1°2θ. Aparecen asimismo difracciones a 36.3, 62.1 y 65.2°2θ, correspondientes al Pb⁰ y una fase de óxido de zinc con reflexiones principales a 34.4, 56.6, y 69.1° 2θ.

Por otra parte, se aprecia en el intervalo de 20-40° 2θ una zona característica de amorficidad representado por un halo en el difractograma, lo cual indica que se trata de un material predominantemente vítreo y potencialmente susceptible de reaccionar con activadores alcalinos para formar productos de hidratación. Algunos autores han sugerido que la presencia de fases cristalinas en bajas cantidades no es del todo perjudicial ya que algunas de estas pueden reaccionar para formar productos hidratados.

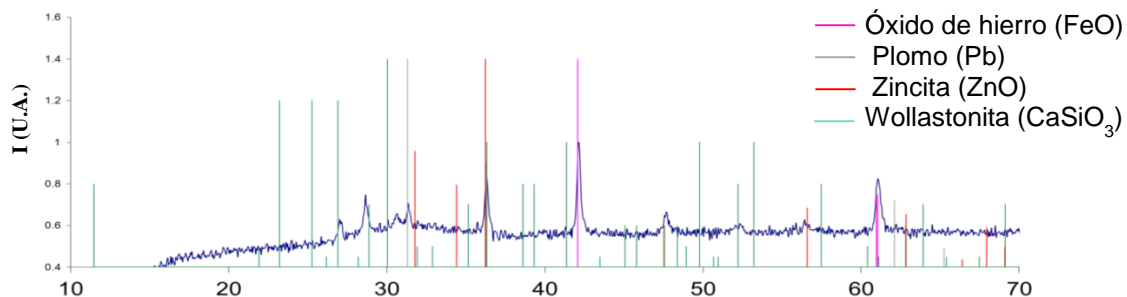


Figura 1. Patrón de difracción de la escoria

2θ

Análisis de FTIR. La Figura 2 muestra el espectro de IR de la escoria; se observan bandas vibracionales características de la wollastonita representadas por dos bandas de estiramiento, una a 1405 cm^{-1} correspondiente al enlace Si-O y otra a 933 cm^{-1} del Si-O $^-$, así como una a flexión de 646.2 cm^{-1} también correspondiente al enlace Si-O $^-$. Por otra parte, una banda de estiramiento a 426.9 cm^{-1} atribuible al enlace Zn-O de la zincita es también observable. Estos resultados se encuentran en concordancia con el análisis de DRX del material de la Figura 1. No obstante, una banda de estiramiento a 2954.6 cm^{-1} correspondiente a los enlaces O-H característico de las moléculas de agua es identificada en la Figura 2, lo cual podría indicar la formación de hidróxidos metálicos por efectos de intemperismo, o bien la presencia de humedad en la muestra al momento de realizar la prueba.

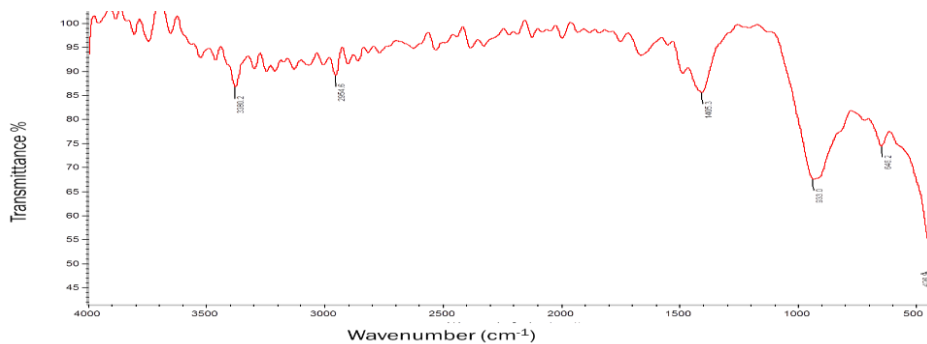


Figura 2. Espectro de IR de la escoria.

Micrografías de la escoria por SEM. La Figura 3 muestra micrografías de la escoria molida tomadas por electrones secundarios a diferentes magnificaciones en donde se observa que la escoria presenta una morfología irregular atribuible a la molienda en seco en el molino de bolas. También se aprecian tamaños de partículas menores a $1\ \mu\text{m}$ indicando que el material es lo suficientemente fino como para reaccionar y formar productos de hidratación. Además, se pueden observar diferentes incrustaciones de algunos metales como el plomo.

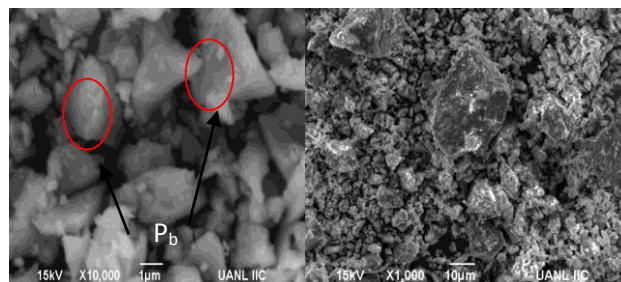


Figura 3. Micrografías por SEM.

Caracterización del material geopolimérico

Análisis por DRX. Los patrones de difracción de rayos x del proceso de geopolimerización se muestran para ambos sistemas de módulo $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=2$ y 2.5 curados por 28 días en la Figura 4 y la Figura 5, respectivamente. Para ambos casos es posible observar productos no detectados en la escoria (Figura 1) de compuestos anhidros de un silicoaluminato tipo sodalita $[\text{Na}_6(\text{AlSiO}_4)_6]$ y un silicoaluminato de calcio de composición $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$. Ambas fases podrían ser remanentes de la descomposición parcial provocada por el curado inicial de 55°C de productos de hidratación característicos de los geopolímeros de materiales puzolánicos silicoaluminosos, como la hidrosodalita del tipo zeolítico o gel N-A-S-H y el gel de silicoaluminatos de calcio hidratados (C-A-S-H). Dicha descomposición se ha reportado viable a mayor temperatura a través del rompimiento de uniones de hidrógeno de las moléculas de agua de estas fases [14]. Es importante mencionar que ambos geles poseen una estructura predominantemente amorfa o nanocrystalina lo cual, similar que el gel de C-S-H de cemento Portland los hace difíciles de caracterizar por DRX [15]. Por otra parte, para ambos sistemas se detectaron picos de silicatos de calcio hidratados C-S-H a 22.1 y $47.5^\circ 2\theta$, lo cual evidencia su formación y supone una estructura de esta fase con un ordenamiento más regular que el C-S-H típico del cemento gris.

Los resultados sugieren la presencia de tres productos de hidratación resultantes del proceso de geopolimerización: C-S-H, N-A-S-H y C-A-S-H, similar a los reportes de otros estudios donde se activa escoria con silicato de sodio [16,17,18]. Dichas fases poseerían una estructura predominantemente amorfa, como lo puede corroborar el mantenimiento de la joroba entre $20\text{-}40^\circ 2\theta$ y la formación de un halo más pequeño a $10\text{-}20^\circ 2\theta$ representado la formación de un gel geopolimérico vítreo [19]. No obstante, no se observaron diferencias significativas entre ambos patrones de las Figuras 4 y 5 por lo cual es necesario análisis adicional para establecer diferencias en las características químicas y morfológicas de las fases de hidratación con respecto a la composición química del activante alcalino.

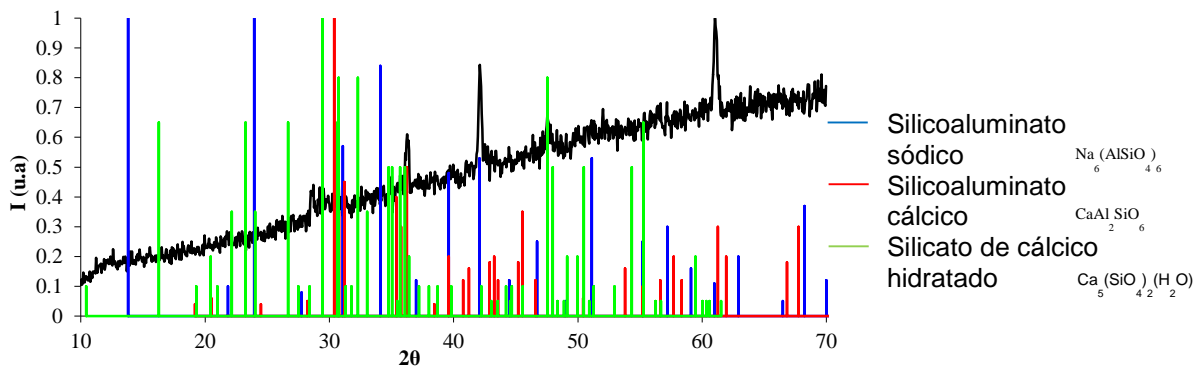


Figura 3. Diffractograma del material geopolimérico M₂A curado a 28 días.

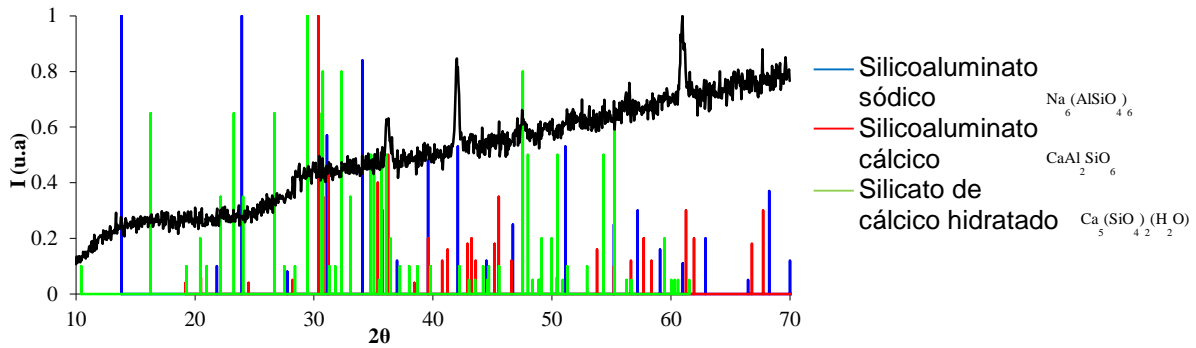


Figura 4. Diffractograma del material geopolimérico M2.5A curado a 28 días.

Resistencia a la compresión y a la flexión. Los resultados de propiedades mecánicas mostraron que existe una relación directa entre la resistencia y el módulo del silicato $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$: La resistencia a la compresión se incrementó al aumentar la relación de silicato de sodio e hidróxido de sodio; este comportamiento puede atribuirse al efecto sinérgico de ambos activadores. El aumento del contenido de vidrio soluble líquido puede actuar simultáneamente como un cementante, un activador alcalino y/o dispersante o plastificante que puede afectar ventajosamente la resistencia a la compresión [20]. Como puede verse en la Figura 6 la resistencia máxima se alcanzó con el módulo de relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2.5$, por lo que se podría concluir que esta relación es óptima para los activadores usados en este estudio. De acuerdo a lo reportado por Hardjito y Rangan [21], se utilizó esta misma relación dando lugar a una mayor resistencia a la compresión para la activación de una ceniza volante con bajo contenido de calcio. Por otra parte, este mismo módulo se ha usado en otras investigaciones obteniendo la misma tendencia [22]. En ambos sistemas (Figura 6) se registró la resistencia a la compresión hasta los 28 días de curado, observando más de 40 MPa para el módulo de 2.5 y más de 20 MPa para el módulo de 2. En ambos, la resistencia a la compresión de 24 h es relativamente alta (32 y 16 MPa, respectivamente). El gráfico de la resistencia a la flexión muestra valores muy bajos debido a la alta fragilidad del material, lo cual supone una alta dureza de los productos de hidratación.

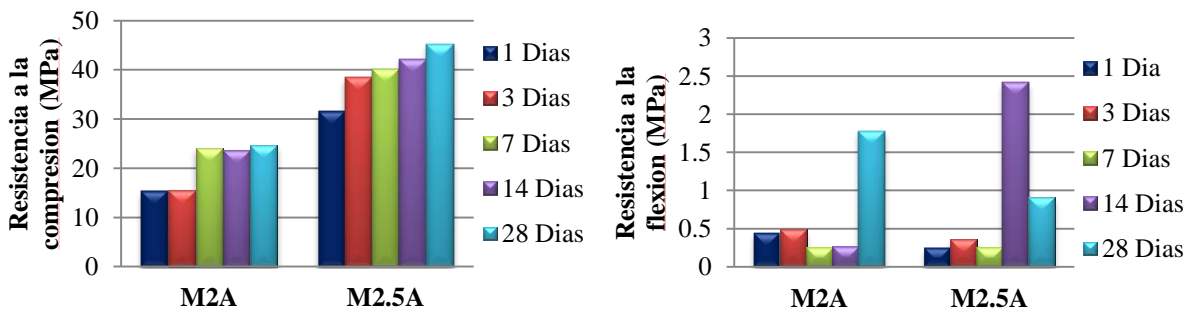


Figura 5. Resistencia a la compresión y a flexión de las pastas.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la utilización de una escoria de fundición de concentrados de Pb-Zn como cementante geopolimérico. La resistencia máxima a la compresión fue de más de 45 MPa a 28 días de curado. Los resultados mostraron que hay una relación directa entre la resistencia a la compresión y el módulo del activante $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$: la resistencia aumentó al incrementar el módulo del silicato. El proceso de geopolimerización mostró efectos sobre los patrones de DRX, se observan diferencias en el cambio de la forma y del patrón que pueden evidenciar la formación de un nuevo material amorfo, además de la presencia de fases anhidras de silicoaluminatos de sodio y de calcio. Los resultados sugieren la presencia de tres productos de hidratación resultantes del proceso de geopolimerización: geles amorfos de N-A-S-H y C-A-S-H, además de C-S-H de naturaleza un poco más cristalina que el producido en pastas de cemento Pórtland.

REFERENCIAS

1. M. Zain, M. Islam, F. Mahmud, M. Jamil, "Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material", *Constr Build Mater* 25, 2 (2011): pp. 798–805.
2. H. Biricik, F. Akoz, I. Berkay, A. Tulgar, "Study of pozzolanic properties of wheat straw ash", *Cem Concr Res* 29, 4 (1999): pp. 637–643.
3. M. Johari, J. Brooks, S. Kabir, P. Rivard, "Influence of Supplementary Cementitious Materials on Engineering Properties of High Strength Concrete", *Construction and Building Materials* 25, 5 (2011): pp. 2639-2648.
4. J. Escalante, L. Espinoza, A. Gorokhovskiy, L. Gomez, "Coarse Blast Furnace Slag as a Cementitious Material, Comparative Study as a Partial Replacement of Portland Cement and as an Alkali Activated Cement", *Construction and Building Materials* 23, 7 (2009): pp. 2511-2517.
5. F. Bellmann, J. Stark, "Activation of Blast Furnace Slag by a New Method", *Cement and Concrete Research* 39, 8 (2009): pp. 644-650.
6. T. Bakharev, "Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing", *Cement and Concrete Research* 35, (2005): pp. 1224-1232.
7. J. Davidovits, "Geopolymer Chemistry and Sustainable Development. The Poly(sialate) Terminology: a Very Useful and Simple Model for the Promotion and Understanding of Green-Chemistry" in, *Proceedings of the World Congress Geopolymer*, 28 June-1 July (2005): pp. 9-15, Saint Quentin, France.
8. M. Izquierdo, X. Querol, J. Davidovits, D. Antenucci, H. Nugteren, C. Fernández, "Coal Fly Ash-Slag-Based Geopolymers: Microstructure and Metal Leaching", *Journal of Hazardous Materials* 166, 1 (2009): pp. 561-566.
9. N. Milestone, "Reactions in Cement Encapsulated Nuclear Wastes: Need for Toolbox of Different Cement Types", *Adv. Appl. Ceram.* 105, 1 (2006): pp. 13-20.
10. V. Jaarsveld, J. Van Deventer, "The Effect of Metal Contaminants on the Formation and Properties of Waste-Based Geopolymers", *Cement Concrete Res* 29, 8 (1999): pp. 1189-1200.
11. Sitio web del Servicio Geológico Mexicano <http://www.coremisqm.gob.mx>.

12. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica”, Ed. IGME, (1995): pp. 308.
13. K. Sarker, R. Haque, K. Ramgolam, “Fracture Behaviour of Heat Cured Fly Ash Based Geopolymer Concrete”, *Materials and Design* 44, (2013): pp. 580-586.
14. J. Felsche, S. Luger, Ch. Baerlocher, “Crystal structures of the hydro-sodalite $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ and of the anhydrous sodalite $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6$ ”, *Zeolites*, 6, 5(1986): pp. 367–372.
15. Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li, “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements”, *Cement and Concrete Research* 40, (2010): pp. 1341–1349.
16. F. Puertas, “Cementos de escorias activados alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro”, *MaterConstrucc* 45, 239 (1995): pp. 53-64.
17. I. Richardson, A. Brough, G. Groves, C. Dobson, “The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H)”, *CemConcrRes* 24, 5 (1994): pp. 813-829.
18. S. Wang, K. Scrivener, “Hydration products of alkali-activated slag cement”, *CemConcrRes* 25, 3 (1995): pp. 561-571.
19. S. Ahmari, X. Ren, V. Toufigh, L. Zhang, “Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash”, *Constr Build Mater* 35, (2012): pp. 718-729.
20. K. Komnitsas, D. Zaharaki, “Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry”, *MinerEng* 20, 14 (2007): pp. 1261-1277.
21. D. Hardjito, B.V. Rangan, “Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete”, Faculty of Engineering Curtin University of Technology, Perth (Austria)(2005).
22. M. Ariffin, M. Bhutta, M. Hussin, M. Mohd Tahir, N. Aziah, “Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete”, *ConstrBuildMater* 43, (2013): pp. 80-86.

EVALUACIÓN DEL DAÑO PRODUCTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE DE MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND CON EL USO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL A BASE DE VIDRIOS DE BOROSILICATO

F. D. Anguiano-Perez^A, A. Durán-Herrera^{AB}, .

^A Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

^B Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, N.L., 66450 México.

RESUMEN

En numerosos trabajos se ha analizado el aprovechamiento de vidrio triturado en la producción de concreto, y se ha observado que puede aprovecharse como: sustitución parcial del agregado fino en el concreto, que en muchos casos ha presentado un desempeño desfavorable por la formación de gel álcali-sílice en la matriz de concreto endurecido, o como material finamente molido con propiedades puzolánicas a edades avanzadas. Este trabajo está orientado a evaluar el efecto de la incorporación de un subproducto industrial a base de vidrios de borosilicato, en morteros a base de cemento Portland, con distintos contenidos y tamaños de partícula, para determinar el tamaño de partícula de vidrio de borosilicatos a partir del cual no se tienen expansiones excesivas producto de la reacción álcali-sílice según la norma ASTM C1260, y su impacto en la resistencia a compresión de cubos de mortero según la norma ASTM C109.

Palabras claves: vidrio de borosilicatos, reacción álcali-sílice, durabilidad, reciclaje, agrietamiento.

ABSTRACT

In many studies it has been analyzed the use of crushed glass in concrete production, and it has been seen that it may be used as: a partial substitution of the fine aggregate in concrete, which in many cases has shown an unfavorable performance because of the formation of the alkali-silica gel in the hardened concrete matrix, or as a finely ground material with pozzolanic properties at late ages. This study is intended to evaluate the effect of the incorporation of an industrial by-product of borosilicate glass, in Portland-cement-based mortars, with different contents and particle sizes, to determine the particle size of borosilicate glass beyond which there are no excessive expansions in the mortar due to the alkali-silica reaction according to the standard ASTM C1260, and its impact in the compressive strength of mortar cubes according to the standard ASTM C109.

Keywords: borosilicate glass, alkali-silica reaction, durability, recycling, cracking.

INTRODUCCION

La producción de cemento Portland en sus procesos involucra un gran consumo de energía eléctrica y térmica, así como altas emisiones de CO₂, contribuyendo con alrededor del 5% de las emisiones globales de CO₂.^{1,2}. Considerando lo anterior, algunas de las medidas actuales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) a la atmósfera consideran los siguientes enfoques³:

- Utilizar menos consumo de cemento Portland para la producción de concreto
- Utilizar más materiales cementantes suplementarios.
- Producir concretos más durables, y considerar su durabilidad en el diseño.

Para reducir el impacto ambiental por la producción de concreto se han aprovechado subproductos industriales como materiales cementantes suplementarios, los cuales, con un adecuado tratamiento, le permiten a la industria del concreto utilizar materiales que de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos, así como reducir directamente el contenido de material cementante, al estar finamente molidos⁴.

Para reciclar subproductos de vidrio, típicamente involucra procesos de selección del material, lavado, triturado, fundido a altas temperaturas y moldeado. Estos procesos representan un costo que puede llegar a ser superior al de producción inicial a partir de materia prima virgen. Una opción sostenible de reciclaje a menor costo es integrar el reciclaje a procesos de producción ya integrados⁵.

En la actualidad, a la par del desarrollo sustentable, se han analizado distintas alternativas de reciclaje y aprovechamiento de subproductos de vidrio. Entre estas se considera el uso de vidrio para la producción de concreto hidráulico, con las siguientes consideraciones de acuerdo al tamaño de partícula utilizado⁵⁻⁷:

- Como agregados en el concreto, reduciendo la trabajabilidad debido a su forma de partícula angulosa.. Además producen una menor resistencia mecánica y durabilidad debido a que las partículas de vidrio producen un gel de reacción álcali-sílice en la interfaz agregado-pasta del concreto, que produce agrietamientos por expansión en presencia de humedad. Este daño se puede mitigar con el uso de materiales puzolánicos, inhibidores de la reacción álcali-sílice, o reduciendo el tamaño de partícula del vidrio.
- Los polvos de vidrio exhiben muy buena actividad puzolánica y pueden utilizarse como sustitución parcial del cemento, mejorando la resistencia a edades avanzadas, y como inhibidor de la reacción álcali-sílice, siendo más efectivo a mayor finura del material.

Investigaciones previas⁸⁻¹³ han mostrado con éxito que es posible utilizar vidrio triturado en el concreto sin demeritar sus propiedades, y que el tamaño de partícula a partir del cual el material no produce expansiones excesivas en el concreto varía dependiendo de la composición química del vidrio.

Se ha encontrado que el tamaño de partícula a partir del cual se tienen expansiones por reacción álcali-sílice dentro de los límites especificados en ASTM C1260 corresponde, para vidrios sódico-cálcicos, a partículas menores a 300 m, mientras que

para vidrios de borosilicatos, corresponde a partículas menores a 30 μm , aproximadamente.¹⁴

En la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México, se dispone de alrededor de 6000 toneladas de residuos de vidrios de borosilicato de una compañía local, el cual no se reintegra al proceso de producción debido a que el costo de reciclaje es alto, comparado con el costo para reciclar vidrios sódico-cálcicos, los cuales requieren una menor temperatura de fusión para su reciclaje.

En el presente estudio se pretende aprovechar el residuo de vidrio de borosilicatos en sistemas a base de cemento Portland y evaluar su efecto. Si bien el vidrio de borosilicatos no ha sido tan ampliamente utilizado como el vidrio sódico-cálcico, se espera que éste también tenga un potencial de aprovechamiento en la producción de concreto como un material puzolánico, al ser rico en sílice, y debido a que el boro, en su estado elemental, no tiene efectos sobre la hidratación del cemento, al ser insoluble en agua.¹⁵

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del programa experimental que se contempla para este proyecto, se estructuraron las etapas que se describen a continuación:

Caracterización de los Materiales:

Los materiales a utilizarse se caracterizarán por medios físico-químicos, con la finalidad de clasificar al material en función de sus propiedades, y como un indicador posterior para el análisis de las variables a investigar en el desarrollo del presente estudio.

Los materiales usados en el estudio para la producción de los morteros y sus propiedades se describen en la Tabla 1:

Tabla 1. Materiales Utilizados

Material	Descripción	Propiedad a Determinar	Valor	Referencia
Cementante	Cemento Portland CPO 40 de una compañía cementera nacional, especificado de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004	Densidad	3.122 g/cm ³	ASTM C188-09
		Fraguado Inicial	196 min	ASTM C191-08
		Fraguado Final	244 min	
Agregado fino no reactivo	Agregado fino a base de caliza triturada de la región.	Densidad	2.626 g/cm ³	AASHTO T84
		Absorción	1.91 %	
Vidrio BS	Vidrio de borosilicatos triturado de una compañía local	Densidad	2.7 g/cm ³	AASHTO T84
		Absorción	0.05 %	

Además, se determinó la composición química del vidrio de borosilicatos mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). Su composición química se muestra en la Tabla 2, de donde es importante destacar que el material es altamente rico en sílice, con un contenido considerable de boro, sodio y aluminio.

Tabla 2. Composición química del vidrio de BS por FRX

Oxido	Contenido en %
SiO ₂	80.25
Al ₂ O ₃	2.25
Fe ₂ O ₃	0.019
Na ₂ O	5.3
K ₂ O	0.19
MgO	0.01
CaO	0.18
B ₂ O ₃	11.81
PPI	0
TOTAL	100.009

Habilitación del vidrio de borosilicato para su uso

El residuo de vidrio de borosilicato se acondicionará para reducir las partículas a tamaños adecuados para la producción de concreto, debido a que el material sale del proceso industrial en tamaños de partícula de hasta 800 mm; el acondicionamiento del residuo consistió de:"

1. Lavado del residuo como se obtiene del banco de almacenamiento con agua para retirar impurezas depositadas sobre el residuo.
2. Secado del residuo sometido a lavado en un horno a 100°C por 24 horas.
3. Trituración del material en un molino de bolas y posterior cribado.

Una vez que el vidrio de borosilicatos se encuentre en alguno de los tamaños de partícula deseados, se le realizarán las siguientes pruebas:

- Densidad específica y absorción, basado en AASHTO T 84
- Composición química por FRX (Fluorescencia de Rayos "X").

Definición del tamaño de partícula óptimo para su uso.

Esta etapa del proyecto involucra realizar mezclas de prueba con la finalidad de definir el tamaño de partícula óptimo a partir del cual se puede utilizar el residuo de vidrios de borosilicatos en mezclas a base de cemento Portland.

Para este desarrollo de este proyecto estudio se realizó un programa de 8 mezclas de mortero, el cual se desglosa en la Tabla 3. Para definir estas proporciones la norma ASTM C1260 especifica una granulometría controlada para los agregados, así como la

relación agua/cementante, y la proporción cemento:agregado fino. Partiendo de estas proporciones, se hicieron sustituciones de agregado fino no reactivo (caliza), por vidrio de borosilicatos, y de cemento por polvo de vidrio de borosilicatos; además se elaboraron dos mezclas donde únicamente se sustituye el cemento por polvo de vidrio, de 74 y 38 μm de tamaño de partícula.

Tabla 3. Programa de Mezclas

Identificación	Cementante, % en masa	Agregado Fino, % en masa, tamaños de agregado
REF	100% CPO 40	100% AF no reactivo, #4 a #100 (4760 μm a 150 μm)
M1	100% CPO 40	100% AF no reactivo, #4 a #8 (4760 μm a 2360 μm)
M2	100% CPO 40	100% AF no reactivo, #4 a #16 (4760 μm a 1180 μm)
M3	100% CPO 40	100% AF no reactivo, #4 a #30 (4760 μm a 600 μm)
M4	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	100% AF no reactivo, #4 a #8 (4760 μm a 2360 μm)
M5	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	100% AF no reactivo, #4 a #16 (4760 μm a 1180 μm)
M6	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	100% AF no reactivo, #4 a #30 (4760 μm a 600 μm)
M7	90% CPO 40, 10% polvo BS200*	100% AF no reactivo, #4 a #100 (4760 μm a 150 μm)
M8	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	100% AF no reactivo, #4 a #100 (4760 μm a 150 μm)

*El polvo BS200, significa polvo de vidrio retenido en la malla #200; a su vez el polvo BS400, significa polvo de vidrio que pasa la malla #200.

Para cada una de las mezclas previamente definidas, se les realizaron las siguientes pruebas:

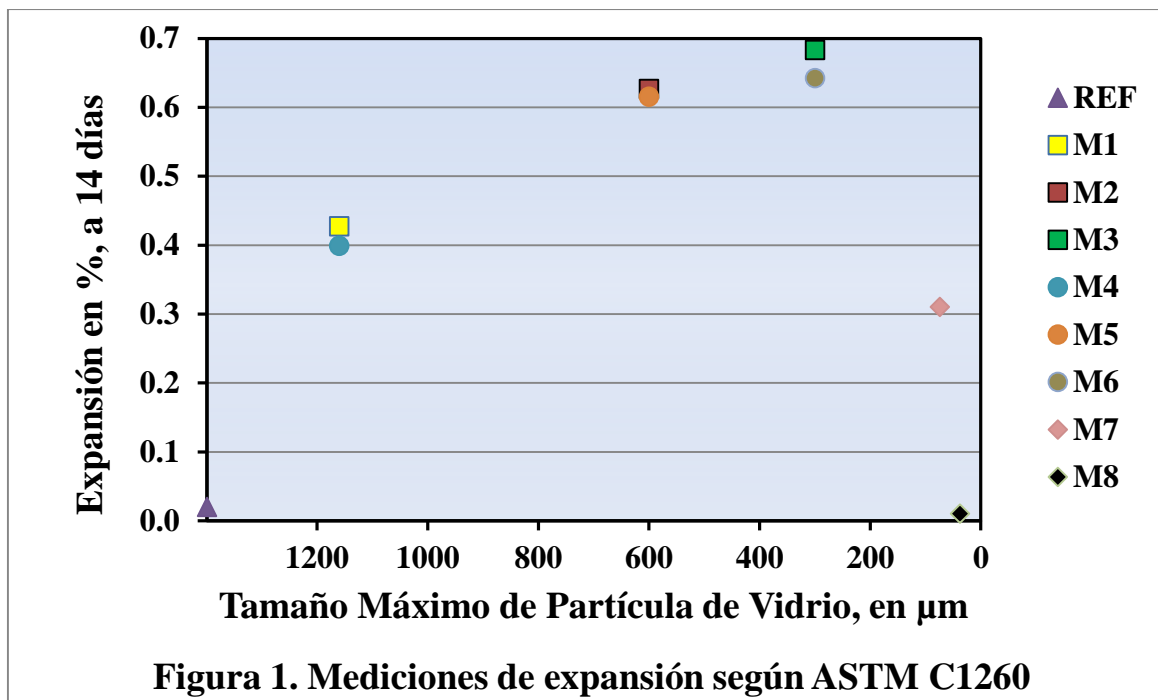
- Expansión potencial por reacción álcali sílice, según ASTM C1260-07, comparando el valor de expansión obtenido para las distintas mezclas a 14 días con el límite máximo recomendado por ASTM para considerarse un agregado como no reactivo (0.1%).
- Resistencia a la compresión de morteros, según ASCTM C-109-08, para especímenes cúbicos de mortero sometidos a las mismas condiciones de curado que las barras, con la finalidad de determinar el impacto de la reacción álcali sílice sobre la resistencia a compresión. Los especímenes fueron ensayados a 7 y 14 días de exposición a la solución alcalina especificada en ASTM C1260.

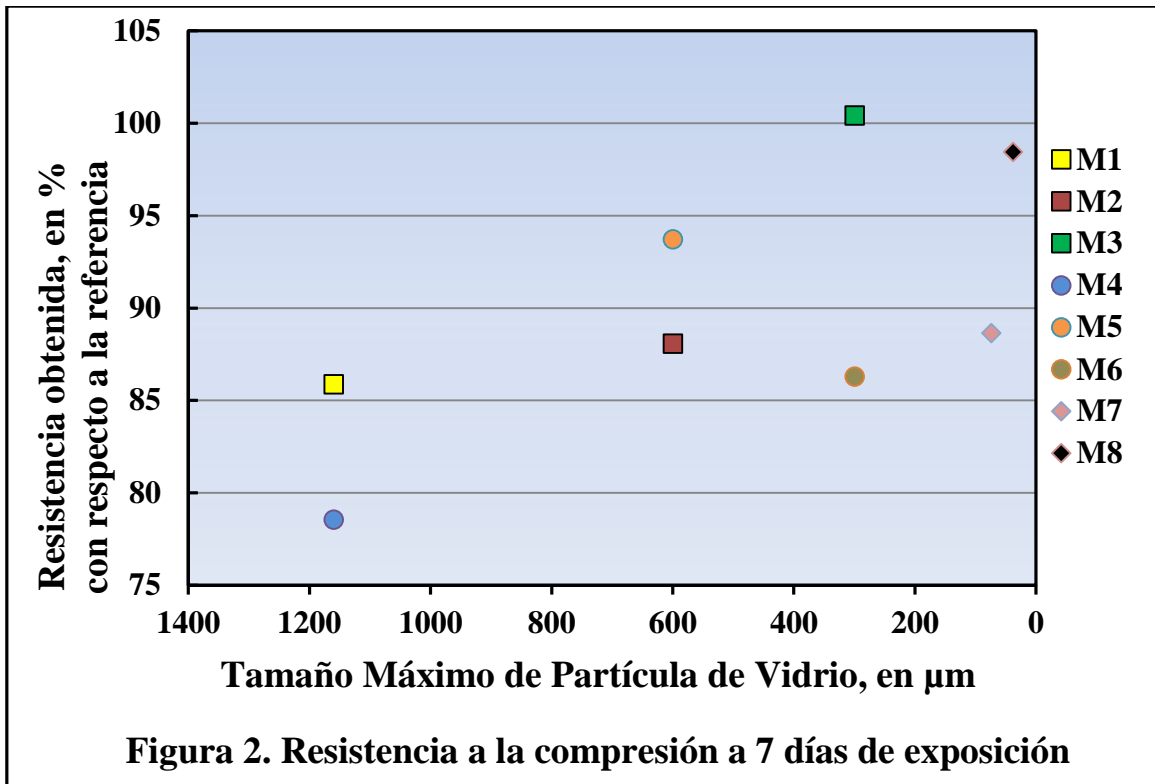
RESULTADOS Y DISCUSION

Expansiones debido a la reacción álcali-sílice y resistencia a la compresión en morteros:

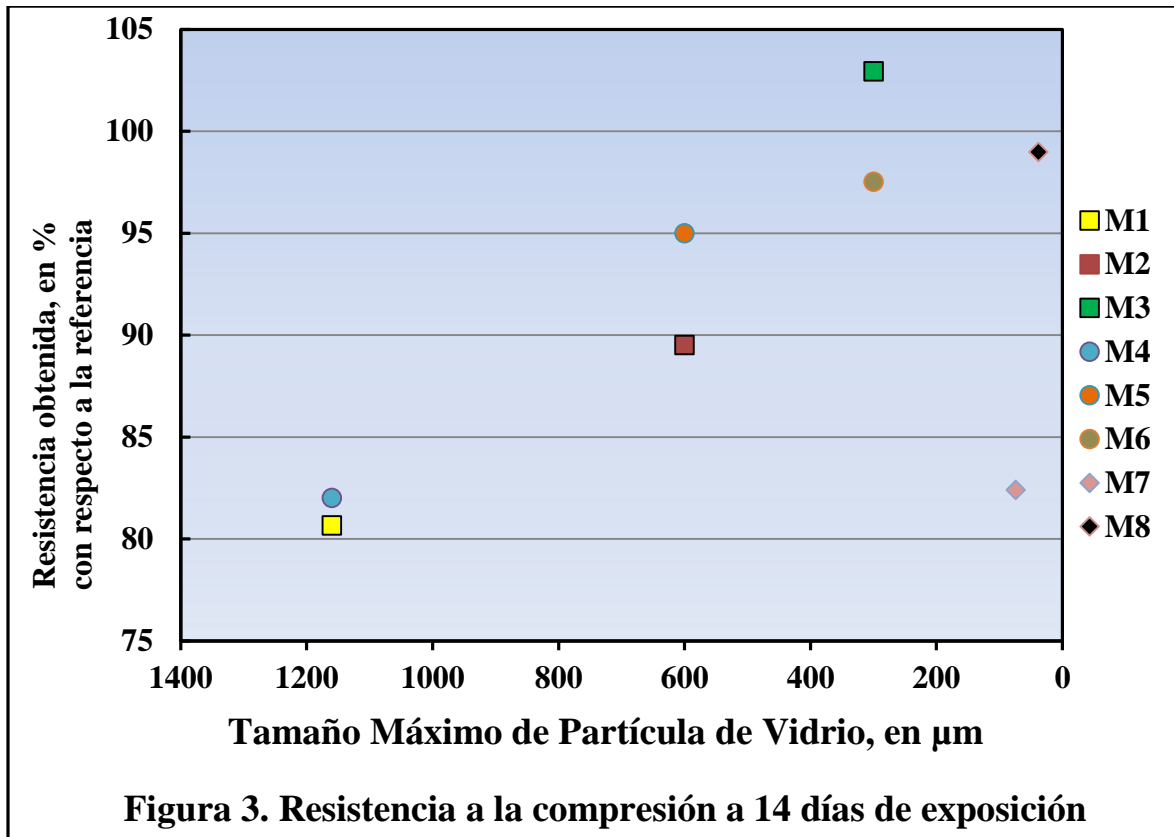
De acuerdo a la norma ASTM C1260 para evaluar la reactividad potencial álcali-sílice de un agregado los especímenes fueron colocados en un ambiente agresivo que acelerara la reacción álcali-sílice del mortero, esto consistió en sumergirlos en una solución 1 N de NaOH a una temperatura de 80°C.

En la Figura 1 se muestran el % de expansión promedio determinadas para los especímenes ensayados de acuerdo al tamaño máximo de partícula de vidrio utilizado, según el programa de mezclas. Aquí se pueden observar dos efectos: (1) el uso de polvo de vidrio BS contribuye a mitigar la expansión producida por la reacción álcali-sílice de las partículas de vidrio BS con tamaño de agregado fino; y (2) a menor tamaño de partícula de vidrio de BS, se tiene cada vez más una mayor expansión por la reacción álcali-sílice, hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual se tienen menores expansiones al reducir el tamaño máximo de partícula de vidrio de BS.





En las Figuras 2 y 3 se muestra el % de resistencia a compresión obtenida para cada una de las mezclas de prueba con respecto a la resistencia de la mezcla de referencia a dicha edad, a edades de ensaye de 7 y 14 días de exposición. De aquí se puede observar que en general, para ambas edades, entre mayor sea el tamaño de partícula, menor será la resistencia a la compresión del elemento una vez que se presente la reacción álcali-sílice, y el efecto negativo de la reacción álcali-sílice es más marcado en edades tempranas.



CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas analizadas en este estudio podemos concluir lo siguiente:

- De acuerdo a las expansiones mostradas en la Figura 1, se observa que con el uso de partículas de vidrio de BS en el concreto, para tamaños en el rango de los agregados finos (300 - 4000 μm), a mayor finura del material, se aumenta el área específica del mismo, y aumenta el daño producido por la reacción álcali-sílice. Sin embargo, a partir de cierto tamaño (< 75 μm), el material presenta menores expansiones producto de la reacción álcali-sílice, incluso dentro de los límites aceptables de la ASTM C1260 (< 2%). Debido a éste comportamiento surge la hipótesis de que esto puede deberse a que a partir de este tamaño de partícula, el vidrio tiene la capacidad de disolverse para formar productos hidratados a base de C-S-H.
- El uso de polvo de vidrio de BS inhibe la reacción álcali-sílice de agregados reactivos de mayor tamaño.
- Al observar los datos de resistencia a la compresión obtenidos se observa que la reacción álcali-sílice no tiene una influencia negativa tan significativa sobre la resistencia a la compresión del mortero, a pesar de tener expansiones mucho mayores a los límites de 0.1 recomendados en ASTM C 1260.
- El vidrio de borosilicato es mucho más reactivo que el vidrio sódico-cálcico, ya que en éste último el tamaño de partícula a partir del cual no se tienen

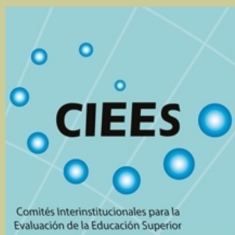
expansiones deletéreas en la matriz de mortero es alrededor de 300-600 μm , mientras que en el vidrio de borosilicatos éste tamaño corresponde a partículas alrededor de 40-70 μm .

REFERENCIAS

- [1] Mehta P. Kumar, Reducing the Environmental Impact of Concrete, *Concrete International*, Vol. 23, Issue 10. October 2001
- [2] Taylor Michael, Tam Cecilia, Gielen Dolf; *Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry*. International Energy Agency-World Business Council for Sustainable Development. September 2006
- [3] Malhotra, V. Mohan, Reducing CO₂ Emissions, *Concrete International*, September 2006.
- [4] Revista: Hormigón, El concreto en la Práctica, ¿Qué, Por qué y cómo? – National Ready Mixed Concrete Association
- [5] Edwards, Kevin L. et al, A critical study of the emergence of glass and glassy metals as “green” materials, *Materials and Design*, Vol. 50, pages 713–723, September 2013
- [6] Brow, Richard K. y Schmitt, Melodie, A survey of energy and environmental applications of glass, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, Issue 7, pages 1193-1201, April 2009
- [7] Shi, Caijun y Zheng, Keren, A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 52, Issue 2, Pages 234–247, December 2007..
- [8] Pelot, James y Baxter, Stephen, Patente US 6,699,321 B2, Marzo 2, 2004.
- [9] Shi, Caijun et al., Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 5, Pages 987– 993, May 2005.
- [10] Shayan, Ahmad y Xu, Aimin, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 3, Pages 457–468, March 2006.
- [11] Shayan, Ahmad y Xu, A., Value-added utilization of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 1, pages 81–89, Jan. 2004
- [12] Liu, Miao, Incorporating ground glass in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 2, Pages 919-925, Feb. 2011
- [13] Wang, Her-Yung y Huang, Wen-Liang, Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 6, pages 1008-1013, June 2010

[14] Jin, Weihua, et. al, "Glasscrete"-Concrete with Glass Aggregate, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, Issue 2, pages 208-213, March-April 2000.

[15] Kratochvíl, Jifí, et. al, The effect of boron and its compounds on setting of Portland cement, *Advanced Materials Research*, Vol. 1000, pages 16-19, Aug. 2014.



ISO 9001:2008



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL E INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

“El Instituto de Ingeniería Civil, cuyo objetivo principal es de apoyo académico a los alumnos de la Facultad de Ingeniería Civil, desarrolla recursos humanos, tecnología y servicios profesionales de punta que también se ofrecen a los sectores público y privado. Estos servicios apoyan proyectos integrales de ingeniería y especializados para la construcción, pudiendo intervenir desde el momento en que se detecta la necesidad de un usuario hasta la terminación de la obra.”



Ingenieros Civiles

Especialistas

Investigadores

Formación integral con responsabilidad social

Oferta Educativa de la Facultad:

- INGENIERO CIVIL
- 3 MAESTRÍAS EN CIENCIAS
 - ⇒ Materiales de Construcción
 - ⇒ Ingeniería Ambiental
 - ⇒ Ingeniería Estructural
- 4 MAESTRÍAS EN INGENIERÍA
 - ⇒ Ambiental
 - ⇒ Estructural
 - ⇒ Tránsito y Vías Terrestres
 - ⇒ Geohidrología
- 2 DOCTORADOS
 - ⇒ Materiales de Construcción
 - ⇒ Ingeniería Ambiental

Vinculación con el sector público y privado a través de los Departamentos del Instituto de Ingeniería Civil:

- Hidráulica
- Tecnología del Concreto

- Ingeniería Ambiental
- Ingeniería Estructural y Peritajes
- Tecnología del Concreto
- Mecánica de Suelos
- Topografía
- Geotecnia
- Vías Terrestres
- Verificación y Control de Obras
- Ingeniería de Tránsito
- Vías Terrestres
- Geohidrología y Geofísica
- Ecomateriales y Energía
- Costos y Presupuestos
- Gerencia de Proyectos y Supervisión de Obras

Centros:

- ⇒ Centro Evaluador de Competencias Laborales
- ⇒ Centro Internacional del Agua
- ⇒ Centro de Investigación en Materiales de Construcción.



Algunas pruebas de Laboratorio acreditadas conforme NMX-EC-17025-IMNC-2006

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Determinación del revenimiento en el concreto fresco. ✓ Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto. ✓ Cabeceo de especímenes cilíndricos. ✓ Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. ✓ Determinación de la densidad de | <ul style="list-style-type: none"> suelo y suelo-agregado en el lugar por método nuclear (poca profundidad). ✓ Método estándar de prueba para contenido de agua de suelo y rocas en el lugar por método nuclear (poca profundidad). ✓ Método de prueba para la determinación de los límites líquido y plástico. ✓ Método de prueba para la deter- | <ul style="list-style-type: none"> minación del contenido de agua en materiales térreos. ✓ Método para la determinación del esfuerzo a la compresión no confinada de suelos cohesivos. ✓ Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería. ✓ Método de prueba para determinar la masa específica de los suelos. |
|--|---|--|



VI
CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

T2.- DURABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD



COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE AGREGADOS NATURALES Y RECICLADOS EN CONCRETO PERMEABLE

M.J. Chinchillas¹, R. Corral¹, J.M. Gómez², S.P. Arredondo¹, J.L. Almaral¹, O.H. Acuña¹, C.A. Rosas¹.

1. Universidad Autónoma de Sinaloa, UAS, Facultad de Ingeniería Mochis, Ciudad Universitaria, Fuente Poseidón prolongación Ángel flores S/N, Pte. Fracc. Las Fuentes, C.P. 81223, México.
2. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Av. Dr. Marañón, No. 44-50, C.P. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

Inyectar la mayor cantidad de agua al subsuelo es de gran importancia, ya que cuando el nivel del manto freático está por debajo de su capacidad, provoca asentamientos en el terreno. Aunado a esto reciclar el concreto es una forma efectiva para eliminar escombros que contaminan nuestros suelos. Éste concreto contiene poros interconectados que permiten el paso del agua con facilidad. Se trabajó con agregados naturales (AN) y reciclados (AR) a 25 y 50% de sustitución. A los 28 días de curado se evaluó la permeabilidad, resistencia a la flexión y compresión. Los resultados están ligados entre sí, ya que el concreto menos permeable alcanzó resistencias mecánicas mayores e inversamente, por otra parte el uso de AR provocó una disminución en las propiedades mecánicas y la forma del agregado influyó, siendo el agregado triturado un material que se enlaza mejor entre la pasta y los otros agregados.

Palabras claves: Concreto permeable, agregado reciclado, humo de sílice, zona de transición interfacial y permeabilidad.

ABSTRACT

Inject more water into the subsoil is very important, because when the ground water level is below capacity, causing settlements on the ground. Coupled with this, concrete recycling is an effective way to remove debris that pollute our soil. This concrete contains interconnected pores that allow water to pass easily. We worked with natural aggregates (NA) and recycled (AR) at 25 and 50% substitution. At 28 days of curing, the permeability, flexural strength and compression was evaluated. The results are linked together as the less permeable concrete obtained mechanical strength greater and inversely, on the other hand the use of AR caused a decrease in mechanical properties and aggregate shape was influential, crushed aggregate material which is a better link between the paste and the other aggregates..

Keywords: Pervious concrete, recycled aggregates, silica fume, interfacial transition zone, permeability.

INTRODUCCIÓN

El término “concreto permeable” típicamente describe un material de revenimiento cero y con una relación alta de vacíos, que consiste de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes producirá un material endurecido con poros conectados (Figura 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que varían en tamaño desde 0.08 a 0.32 pulgadas (2 a 8 mm), lo cual permite que el agua pase a través de ellos fácilmente. El contenido de huecos puede variar de 18 a 35%, con resistencias a la compresión típicas de 400 a 4000 psi (2.8 a 28 MPa). La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente caerá en el rango de 2 a 18 galones/min/pies² (81 a 730 L/min/m²) [1].



Figura 1. Imagen del Concreto permeable

Los concretos permeables cuentan con una resistencia a la compresión y resistencia a la flexión menor a un concreto convencional y entre mayor sea la relación de vacíos menor será las resistencias mecánicas [2-4], debido a su alto contenido de porosidad, de igual manera el utilizar agregados reciclados en lugar de agregados naturales, las propiedades mecánicas del concreto disminuyen notablemente, ya que el AR es un material reutilizado, esto ocasiona que sea un agregado muy absorbente y poroso, al utilizarlo en el concreto convencional se encontró que las propiedades mecánicas disminuyen[5-6]. Esta es la principal problemática encontrada en la literatura. Existe un material utilizado en el concreto convencional que mejora sus propiedades mecánicas y físicas, "el humo de sílice", el funcionamiento de este material está comprobado en varios artículos [7-8], un reemplazo parcial de humo de sílice (HS) por cemento Portland mejora las propiedades del concreto, sin embargo su uso en el concreto permeable no ha sido tema de estudio, por lo cual es una alternativa que puede ser utilizada en esta investigación.

Los problemas de la calidad del agua para las cuencas colectoras son cada vez más importantes. Gran parte del material que se lava y se arrastra hacia los arroyos, ríos, y eventualmente a las aguas subterráneas vienen de los escurrimientos superficiales contaminados con materiales aplicados a la superficie del suelo. Inyectar la mayor cantidad de agua al subsuelo es de gran importancia, ya que cuando el nivel del manto freático está por debajo de su capacidad, provoca asentamientos en el terreno, utilizar

el concreto permeable ayudará a que el concreto no sea una barrera física entre el agua de lluvia y el subsuelo. Aunado a esto reciclar el concreto es una forma muy efectiva para eliminar escombros procedentes de demoliciones de edificios, pavimentos, puentes y otras construcciones hechas con concreto, igualmente sustituir parcialmente el cemento por un material de desecho (HS) ayuda a disminuir su producción y en consecuencia disminuir las emisiones de CO₂ producidas por la industria cementera. Desde el punto de vista científico-técnico, no se encontraron investigaciones del concreto permeable con reemplazos de humo de sílice por cemento Portland, realizar esta investigación aportará al estado del arte del tema y también las aplicaciones del concreto permeable aumentarán si se mejoran las propiedades mecánicas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales.

El cemento utilizado es un Cemento Portland Compuesto de resistencia 30 (CPC 30R), los requerimientos físico-químicos se estipulan en la norma NMX-C-414 [9] y equivale al cemento Portland ordinario Tipo III que establece ASTM C150 [10].

El humo de sílice utilizado en la investigación fue donación del Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV) de la ciudad de Chihuahua, este material y el Cemento Portland fueron caracterizados con el fin de comparar las propiedades conocidas mediante la revisión de la literatura, la cual lo define como una sílice no cristalina muy fina, que contiene un alto contenido de sílice amorfa y consiste en partículas esféricas muy finas con un diámetro promedio de 0.1 a 0.2 μm . Su color es gris oscuro, tiene una densidad entre 2.2 a 2.3 g/cm^3 , su superficie específica (medida por adsorción de nitrógeno, BET) está alrededor de los 20,000 m^2/kg . En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas mencionadas.

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento y HS

<i>Material</i>	<i>Densidad (g/cm^3)</i>	<i>Superficie específica, BET (m^2/kg)</i>	<i>Tamaño promedio (μm)</i>
a) CPC	3.15	1400	15-25
b) HS	2.27	19600	0.1 - 0.2

Por medio de la técnica de caracterización de fluorescencia de rayos X se conoció la composición química que contiene el Cemento Portland Compuesto y el humo de sílice que utilizamos en esta investigación, en este estudio se observa la cantidad de óxidos presente en el CPC, siendo el CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ los óxidos con mayor proporción. En el humo de sílice el SiO₂ tiene un 95.22 % seguido por el Fe₂O₃, los demás compuestos están presentes en menor proporción. En la Tabla 2 se muestran los valores de los óxidos en el CPC y HS.

Tabla 2. Composición química (% en peso)

<i>Material</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>MgO</i>
-----------------	------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	------------

a) CPC	19.94	4.40	2.97	63.50	3.08	0.42	0.12	-
b) HS	95.22	0.08	2.37	0.26	0.11	0.56	0.30	0.24

Los agregados gruesos naturales triturados (ANT) y redondeados (ANR) fueron obtenidos en la criba de la localidad Charay, El Fuerte, Sinaloa (la criba nueva), se consiguió este material con un tamaño de 3/4 hasta 3/8 de pulgada (19.05 mm a 9.5 mm) y la grava reciclada fue obtenida a partir de la trituración de concreto de pavimento recolectada en el basurero llamado "la morena" de la ciudad Los Mochis, Sinaloa. Se eligió el concreto con un espesor de 20 cm de peralte. A este concreto se evaluó la porosidad, la absorción por inmersión y la densidad siguiendo la norma ASTM C-642 y la resistencia a compresión por medio de la técnica de índice de rebote siguiendo la norma NMX-C-192.

Mezclas.

Se diseñaron mezclas de concreto permeable con una relación de a/c de 0.35 (con el fin de obtener altas resistencias mecánicas y una relación de vacíos de 15%, para que el concreto permeable tenga una alta permeabilidad. En éstas se utilizó agregado natural triturado, agregado natural redondo y agregado reciclado en sustitución de 50% respecto al agregado natural, con la finalidad de evaluar la influencia que tiene la forma del agregado en el concreto permeable. En cada mezcla con diferentes agregados se le adicionó 10% de HS, para aumentar las resistencias mecánicas. La dosificación de las mezclas se muestran en la Tabla 3, donde puede observarse la cantidad de material necesario para elaborar dos vigas de concreto permeable de 15x15x50 cm y una losa de 30x30x5 cm y la Tabla 4 muestra la nomenclatura utilizada.

Tabla 3. Cantidad de material utilizado en mezclas con relación a/c de 0.35

	<i>GNT-C</i>	<i>GNT-HS</i>	<i>GNR-C</i>	<i>GNR-HS</i>	<i>GR50-C</i>	<i>GR50-HS</i>
AGUA	4.7474	4.747410	4.672187	4.67218	4.67218	4.67218
GRAVA NATURAL	42.1362	42.13692	42.13692	42.136	21.0684	21.0684
GRAVA RECICLADA	-	-	-	-	21.0684	21.0684
CEMENTO	13.3491	12.01419	13.3491	12.0141	13.3491	12.0141
HUMO DE SÍLICE	-	1.33491	-	1.33491	-	1.33491

Tabla 4. Nomenclatura utilizada

GNT	Grava natural triturada
GNR	Grava natural redonda
GR50	Grava reciclada en sustitución del 50%
C	Cemento Portland Compuesto
HS	Humo de sílice

RESULTADOS

En la Tabla 5 se puede observar las características del concreto de origen, las cuales ejercen una influencia considerable en las propiedades de los agregados

recicladados, en la tabla puede observarse una alta absorción, lo cual proporciona que al momento de realizar la mezcla, el agua jugará un papel importante en el desarrollo del concreto, por lo tanto fue necesario realizar un ajuste de agua en el diseño de mezcla. Se puede observar que la densidad del concreto reciclado es menor que el concreto convencional, esto es debido a su naturaleza porosa, el agregado reciclado tiene adherida pasta antigua, lo cual proporciona una densidad baja. La resistencia que alcanzó por medio del método no destructivo como el índice de rebote fue de 29.9 MPa, es un valor promedio, lo cual nos dice que el material utilizado es un material con resistencias altas y a la vez apto para utilizarse como agregado reciclado.

Tabla 5. Propiedades del concreto de origen

<i>Pruebas</i>	<i>Resultado</i>
Absorción (%)	6.28
Densidad g/cm ³	2.35
Porosidad %	16.31
Índice de rebote MPa	29.9

Resistencia a la compresión de relación a/c de 0.35

En la Figura 2 se observan que en las muestras elaboradas con CPC alcanzaron las resistencias más altas y las mezclas elaboradas con HS alcanzaron resistencias a compresión bajas a los 28 días de curado, lo cual puede ser atribuido a que la cantidad de agua utilizada no fue la adecuada y no alcanzó para formar gran cantidad de hidróxido de calcio (CH) en la hidratación del cemento, por lo cual el HS no formó nuevos silicatos de calcio hidratado (CSH) en la reacción puzolánica. También se piensa que la causa por la cual el HS no alcanzó resistencias elevadas es porque los CH se disolvieron en la cámara de curado, ya que el concreto permeable tiene una estructura de poro de gran abertura, lo cual es necesario seguir investigando para corroborar lo mencionado. La mezcla de GNT-C fue la más resistente a los esfuerzos a compresión, alcanzando hasta un 203.15 kg/cm², es de suponerse que la forma del agregado tuvo una influencia en la resistencia, debido a que el material utilizado en esta mezcla es grava triturada, la adherencia fue mayor entre la grava y la pasta. El mismo resultado se muestra en las otras mezclas, a pesar de tener HS, la resistencia mecánica no aumentó. Por otra parte las mezclas que tienen 50 % de agregado reciclado fueron las mezclas con menor resistencia, esto es atribuido a que el agregado utilizado en estas mezclas es poroso y tiene una menor densidad, al contener pasta antigua adherida en la grava y tener una mayor cantidad de ZTI. En la gráfica se muestra una tendencia un poco extraña, ya que el concreto permeable que contiene 100% CPC alcanzó resistencia mayores que las que contenían HS, en ambos casos fue mayor el concreto con ANT, seguido de las mezclas que contenían ANR y por último las mezclas con 50% de sustitución de AR por ANT. Comparando los resultados la mezcla de GNT-C fue la que alcanzó mayor resistencia mecánica, 32.41% menos fue el concreto de GNT-HS, es muy alta la diferencia mecánica que existe entre estos dos concretos, lo diferente que contiene una de ellas es 10% de HS, que se cree que no reaccionó lo suficiente para elevar las resistencias, o se necesitó mayor cantidad de agua. La mezcla GNR-C

alcanzó 192.2 kg/cm² y GNR-HS 32.45% menos, el mismo comportamiento observado en la mezcla mencionada anteriormente. En el caso de GR50-C alcanzó 186.15 kg/cm² y GR50-HS un 33.07% menos.

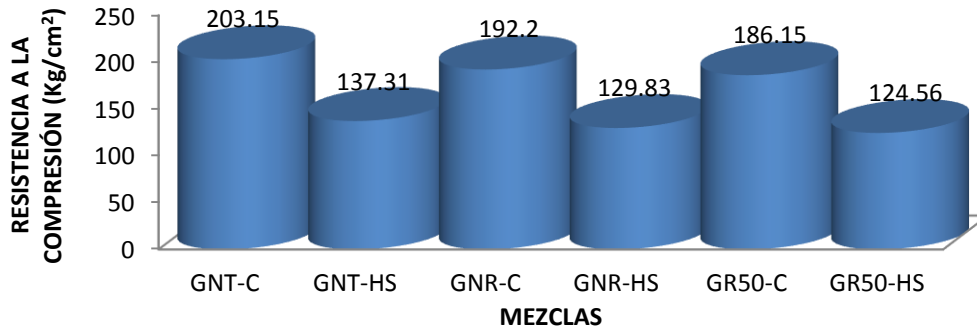


Figura 2. Resultados de resistencia a compresión de mezclas con relación a/c de 0.35

Resistencia a la flexión de relación a/c de 0.35

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la flexión de las mezclas de concreto permeable con una relación a/c de 0.35 a los 28 días de curado, la tendencia es similar a los resultados obtenidos en f'c, donde la muestra que alcanzo mayor esfuerzo a flexión es la que contenía ANT y 100 % CPC, a su vez las mezclas con humo de sílice tienen resistencias a la flexión bajas. Los agregados reciclados tuvieron influencia, ya que las mezclas elaboradas con esos agregados tienen resistencias bajas, es atribuido a la mayor cantidad de ZTI que conlleva ese material. También se observa que el utilizar ANT en el concreto permeable, hace que sea más resistente en las propiedades mecánicas. La mezcla de GNT-C alcanzó resistencias de 29.38kg/cm² y el concreto que más se acercó a esa cantidad fue GNR-C con una diferencia del 2.89% respecto a la resistencia más elevada. La mezcla GR50-C tuvo una diferencia del 3.34%. Estos resultados muestran que la diferencia entre ellas no es muy significativo y el utilizar hasta 50% de AR en el concreto permeable es técnicamente apto. La diferencia que existe entre el concreto con 100% CPC y las mezclas con HS es muy notorio. 43.88% de diferencia existe entre la mezcla GNT-HS respecto a GNT-C, 43.78% disminuyó la mezcla de GNR-HS respecto a GNR-C y 44.3% de GR50-HS comparada con GR50-C. Estos resultados muestran que el utilizar 10% de HS en concreto permeable con estas especificaciones no es la forma más adecuada de lograr altas resistencias mecánicas.

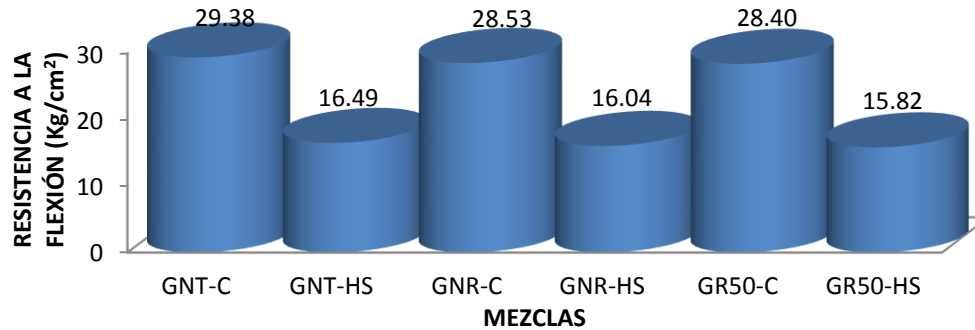


Figura 3. Resultados de resistencia a la flexión de mezclas con relación a/c de 0.35

Coeficiente de permeabilidad

Del ensayo de permeabilidad se observan los resultados en la figura 4 a los 28 días de curado, donde se aprecia que las mezclas que contienen HS tienen una mayor permeabilidad que las elaboradas con CPC, la muestra menos permeable fue GNT-C con una permeabilidad de 0.00887 m/s y comparándola con la mezcla GNT-HS existe una diferencia de 17.87%. El concreto de GNR-C tiene una permeabilidad de 0.0094 m/s y la que contiene HS con el mismo agregado tiene un incremento en el coeficiente de permeabilidad del 14.78%. Por último la mezcla GR50-C tiene una permeabilidad de 0.0101 m/s y GR50-HS 10.62% más. Los concretos con un mayor alto coeficiente de permeabilidad, son aquellos que tienen menor resistencia mecánica, ya sea resistencia a compresión o flexión. Los concretos más resistentes tienen menor coeficiente de permeabilidad. Esto es atribuible a que al ser más resistente se formó una matriz más densa y a su vez más resistente, pero ésta matriz impidió un poco el paso del agua al momento de realizar el ensayo. Tomando en cuenta el coeficiente de permeabilidad de un concreto convencional, todos los valores observados en la Figura 4 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran un muy alto coeficiente de permeabilidad, que se encuentra entre los valores típicos de los concretos permeables.

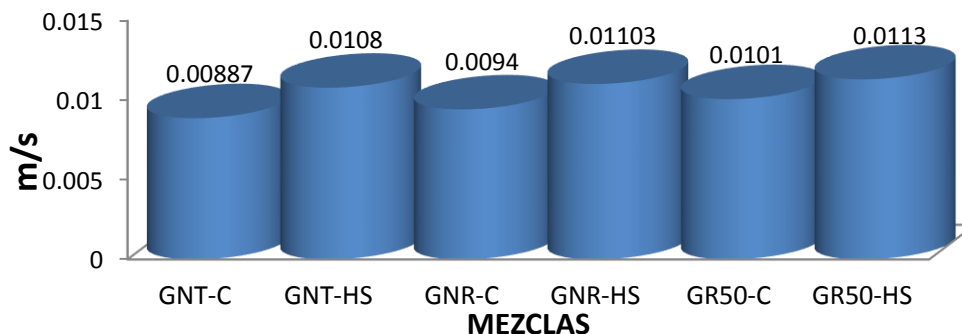


Figura 4. Resultados de la permeabilidad

CONCLUSIONES

El concreto original alcanza resistencias a la compresión válidas para ser utilizado como un nuevo agregado resistente y en buen estado; el periodo de envejecimiento de este tipo de concretos se puede intuir en propiedades tales como la absorción, densidad y porosidad, puesto que la correlación directa entre la edad y éstas es válida. La resistencia a compresión y flexión del concreto permeable con una relación de a/c 0.35, disminuyó notablemente con las mezclas que contenían humo de sílice, de 30-40% aproximadamente. Es necesario continuar la investigación para comprobar dicho fenómeno.

La permeabilidad para el concreto permeable con a/c de 0.35 es alta, los valores indican que la permeabilidad alcanza valores que van de 0.0088 a 0.0113 m/s, el utilizar una relación de vacíos de 15% ayuda a que el material contenga mayor abertura entre su estructura y en consecuencia sea más permeable.

El efecto que tiene el agregado reciclado en el concreto permeable con una relación a/c de 0.35 no es muy significativo, debido a que la resistencia mecánica que se alcanza con una sustitución del 50% de AR, provoca una disminución en la resistencia de 3.33 y 8.37% en la resistencia a la flexión y compresión respectivamente en comparación a la mezcla con ANT-C. Debido a que la falla del concreto en las pruebas mecánicas se provoca por el sitio de adherencia entre agregado y agregado y poco se ve influenciado la ZTI de los agregados nuevos y los agregados reciclados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Universidad Politécnica de Cataluña por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través de su infraestructura.

REFERENCIAS

Libro.

[1] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Concreto permeable, (2006), Concreto permeable ACI 522R-06. P. 15-17.

Tesis.

[2] A. Mullingan, "Attainable compressive strength of previous concrete paving system", Tesis de maestría, University of Central Florida, (2005,) p.132.

Revista.

[3]R. Meininger, "No-fines pervious concrete for paving", Concrete International, V.10, (1988): pp. 20-27.

[4]Y. Chen. K. Wang. X. Zhou, "Strength, fracture and fatigue of pervious concrete", Construction and Building Materials 42 (2013): pp. 97–104.

[5]R. Corral. et al., "Chloride ion penetrability and corrosion behavior of steel in concrete with sustainability characteristics", International Journal of Electrochemical Science 6, 3 (2011): p. 958-970.

[6]J. Gómez, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregates an experimental study", Cement and Concrete Research 32, 8 (2002). : pp. 1301-1311.

[7] Z. Bayasi. J. Zhou. "Properties of silica fume concrete and mortar", ACI Mater. J. 90, 4 (1993): pp. 349– 356.

[8] Y. Yogendran. B. Langan. M. Haque. M. Ward, "Silica fume in high-strength concrete", ACI Mater. J. 84 (1987): pp.124–129.

Normas.

[9] nmx-414-onncce-2004. Industria de la Construcción Cementos Hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba. (www.onncce.org.mx)

[10] ASTM-C 150. Standard Specification for Portland Cement. Doi: 10.1520/c0150_c0150m-12. (www.astm.org).

EMPLEO DE MATERIALES DE DESECHO, COMO SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO PORTLAND, PARA ELABORAR CONCRETO HIDRÁULICO

V. Jiménez-Quero¹, P. Montes-García¹, J. G. Chacón-Nava²

¹Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN Oaxaca). Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán. Oaxaca. C.P. 71230. Oaxaca, Oaxaca.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C. Unidad Chihuahua. Miguel de Cervantes 120, C.P. 31109. Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua.

RESUMEN

Se evaluaron concretos elaborados con cemento portland, ceniza volante (CV) y ceniza de bagazo de caña (CBC). Se elaboraron cuatro mezclas: una control con 100% cemento y mezclas ternarias con 0%, 10% y 20% de CBC, en donde se mantuvo constante 20% de CV. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión ($f'c$), potenciales de corrosión (E_{corr}) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Los resultados indican que la mezcla con 20% de CV+0% de CBC presentó los mejores resultados de $f'c$. En los E_{corr} , la mezcla con mejor comportamiento fue la mezcla con 20% de CV ya que durante la mayor parte del periodo de evaluación presentó los valores menos negativos. Los concretos control y el de 20% CV+0% CBC presentaron mayores valores de VPU que las otras mezclas.

Palabras claves: ceniza volante, ceniza de bagazo de caña, resistencia a compresión, potenciales de corrosión, velocidad de pulso ultrasónico.

ABSTRACT

Were evaluated concrete made with Portland cement, fly ash (CV) and bagasse ash (CBC). Four mixtures: a control with 100% cement and ternary blends with 0%, 10% and 20% of CBC, which was kept constant at 20% CV, were produced. Test compressive strength ($f'c$) corrosion potentials (E_{corr}) and ultrasound pulse velocity (VPU) were carried out. The results indicate that the mixture with 20% CV + 0% CBC provided the best results of $f'c$. In E_{corr} , the best performing mixture was with 20% CV because for most of the evaluation period, the less negative values presented. The control concrete and 20% CV+ 0% CBC mixtures had VPU higher values than the other mixtures.

Key words: fly ash, bagasse ash, compressive strength, corrosion potentials, ultrasonic pulse velocity.

INTRODUCCIÓN

Importantes investigaciones sobre el uso de materiales de desecho para la elaboración de concreto hidráulico se ha incrementado en los últimos años por las siguientes razones: Flatt¹, et al., (2012) afirman que el concreto hidráulico es el material de construcción más extensamente utilizado por el hombre y que actualmente no existe otro material que pueda reemplazarlo. Desafortunadamente, de los principales constituyentes de este material, el cemento portland es el más cuestionable por los efectos nocivos al medio ambiente que conlleva su proceso de manufactura. Dentro de esos efectos se encuentran: el consumo considerable de materias primas², el consumo enorme de energía y la emisión de gases de efecto invernadero. Anand³ et al., (2006) estimaron que por cada tonelada que se produce de cemento portland, se libera a la atmosfera de 0.9 a 1.0 tonelada de CO². Además un estudio realizado por Ali⁴ et al., en 2011 estimó que la industria del cemento genera aproximadamente el 7 % de las emisiones antropogénicas de CO².

Los materiales de desecho que más se han empleado como sustitutos parciales del cemento portland han sido los de origen industrial; entre ellos se pueden mencionar los siguientes: ceniza volante, humo de sílice, escoria granulada de alto horno. Estos desechos se han incorporados solos y combinados (con otros también de origen industrial) para producir concretos binarios, ternarios⁵⁻⁷ y hasta cuaternarios⁸⁻¹⁰. La investigaciones anteriores reportan que estas adiciones han brindado a los concretos mejores beneficios tales como: mayor resistencia a compresión, reducción a la permeabilidad, mejor comportamiento contra la reacción álcali-sílice, resistencia a las sales deshielo e incremento en su durabilidad; desafortunadamente en México no se disponen de estos de materiales y para emplearlos hay que importarlos lo cual resulta muy costoso.

Materiales de desecho de origen agrícola tales como la ceniza de cáscara de arroz, ceniza de paja de trigo, ceniza de cáscara de nuez de avellana y ceniza de bagazo de caña se han utilizado como materiales puzolánicos para la elaboración de morteros y concretos¹¹⁻¹³. La mayoría de las investigaciones de concretos elaborados con estas adiciones han utilizado un solo material de desecho y se han reportado resultados benéficos en sus propiedades tanto mecánicas como de durabilidad¹⁴⁻¹⁷. En 2012, Cordeiro¹⁸ et al., emplearon una combinación de ceniza de cáscara de arroz y ceniza de bagazo de caña para elaborar un concreto ternario, obtuvieron resultados importantes gracias al postratamiento de las cenizas que emplearon a las cuales las denominaron “cenizas ultrafinas”

Es muy importante resaltar que en todos los estudios el uso eficaz de los desechos de origen agrícola se ha logrado gracias a la aplicación de un pos-tratamiento el cual ha consistido en la re-calcinación de las cenizas a una temperatura de 600°C en periodos de tres a seis horas, un molido de dos a tres horas y/o una combinación de ambos¹⁸⁻¹⁹, lo que representa un alto consumo de energía.

Por lo anterior, este proyecto de llevo a cabo con el objetivo de elaborar y evaluar concretos en las cuales se sustituyó cemento por la combinación de dos materiales de

desecho, uno de origen industrial (ceniza volante) y otro de origen agrícola (ceniza de bagazo de caña) sin aplicarles ningún postratamiento demandante en energía a las cenizas empleadas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Los materiales empleados fueron cemento de grado comercial CPC30R (CP), ceniza volante (CV) clase F, ceniza de bagazo de caña (CBC), agregado grueso triturado de 3/4" como tamaño máximo y arena de río. La caracterización de estos materiales se presenta en la Tabla 1. Para mezclar los materiales se utilizó agua bidestilada y un aditivo superplastificante base policarboxilatos. La CBC se obtuvo del ingenio azucarero Constanza, localizado en Tezonapa, Veracruz, fue colectada directamente del tiradero a cielo abierto y sólo se cribó por el tamiz No. 200 (75 μ m) durante 4 minutos. Del cemento y de las cenizas empleadas se determinó su composición química.

Tabla 1.- Caracterización de materiales utilizados para las mezclas de concreto

<i>Material</i>	<i>PVSS (kg/m³)</i>	<i>PVSC (kg/m³)</i>	<i>G.E</i>	<i>% ABS</i>	<i>M.F</i>
Grava	1513	1624	2.66	0.47	
Arena	1552	1596	2.78	1.74	2.97
Cemento			2.94		
Ceniza Volante			2.27		
Ceniza de Bagazo de Caña			2.24		

Diseño de mezclas

Se diseñaron cuatro mezclas de concreto de acuerdo con el método de volúmenes absolutos del Instituto Americano del Concreto (ACI 211.1). Se consideró una resistencia f'_{cr} de diseño de 334 Kg/cm²; el proporcionamiento de las mezclas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.- Proporcionamiento de mezclas (para 1m³ de concreto)

<i>Mezcla</i>	<i>CP (Kg)</i>	<i>CV (Kg)</i>	<i>CBC (Kg)</i>	<i>Arena (Kg)</i>	<i>Grava (Kg)</i>	<i>Agua (L)</i>	<i>Superplastificante (L)</i>
Mezcla control (M0)	410	--	--	822	975	206	2.05
Mezcla 1 (M1)	328	82	--	800	975	204	2.05
Mezcla 2 (M2)	287	82	41	803	984	208	5.12
Mezcla 3 (M3)	246	82	82	803	984r	196	6.77

Elaboración de probetas para ensayos

Las mezclas se prepararon *in situ* para tratar de representar las condiciones reales de mezclado. De cada una de las mezclas se colaron 27 probetas cilíndricas de 100

mm de diámetro x 200 mm de alto, 18 de ellas se emplearon para evaluar la resistencia a compresión (a 28,56 y 90 días) Figura 1-A, y nueve para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Después de ser coladas, las probetas fueron cubiertas con una membrana plástica por 24 hrs., posteriormente se desmoldaron y recibieron un curado por inmersión hasta la fecha de ensaye. Las lecturas de velocidad de pulso se realizaron diariamente durante 90 días, Figura 1-B.

También de cada mezcla, se colaron tres probetas prismáticas de 150 x 150 x 300 mm. En cada una de ellas se embebieron dos varillas de acero al carbono de 3/8", una de las varillas se empleó como electrodo de trabajo y la otra como contraelectrodo. 24 horas después de ser coladas se desmoldaron y recibieron un curado por inmersión durante 30 días. A uno de los extremos de cada varilla se le conectaron alambres de cobre para poder tomar las lecturas correspondientes. Las probetas se expusieron a un ambiente agresivo dentro de una cámara de corrosión cíclica marca Singleton CCT para acelerar el proceso de corrosión (Figura 1-C). Las lecturas se tomaron durante ocho meses y se utilizó un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.



Figura 1-A. Prueba de resistencia a compresión



Figura 1-B. Prueba de VPU

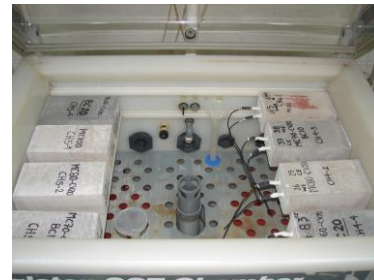


Figura 1-C. Probetas para Prueba de potenciales de corrosión

Figura 1.- Ensayes realizados a probetas de concreto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la composición química del cemento y de las cenizas empleadas.

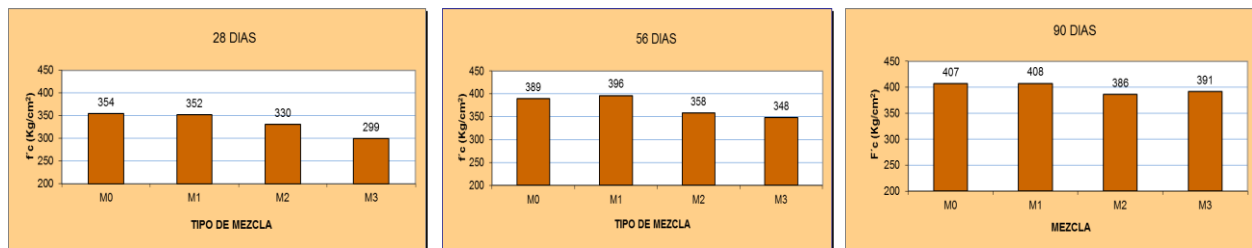
Tabla 3.- Composición química de los materiales en polvo empleados en el proyecto (wt.%)

Oxido base	CP	CBC	CV
SiO ₂	15.96	56.37	61.10
Al ₂ O ₃	4.46	14.61	20.58
Fe ₂ O ₃	2.24	5.04	2.78
CaO	62.75	2.36	4.83
MgO	1.49	1.43	1.20
Na ₂ O	0.42	1.57	1.28
K ₂ O	0.57	3.29	1.30
Fe	1.63	4.38	3.59
TiO ₂	0.15	0.96	0.72
P ₂ O ₅	0.33	0.85	0.22
MnO	0.09	0.18	0.05
LOI	10.03	10.53	3.69

En el cemento portland se encontró que la suma de óxidos mayores $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ es igual a 82.55% y se encuentra dentro del rango (50% a 90%) establecido en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004, sin embargo la suma de componentes minoritarios (5.58%) y las pérdidas por ignición (6.07%) se encuentran ligeramente por encima de los valores máximos permisibles (5% para ambos) por la misma norma. La CBC tuvo una suma de óxidos mayores de 76.02%, un contenido de CaO de 2.36% y pérdidas por ignición (LOI) de 10.53% (aunque el porcentaje de LOI de la CBC fue alto se decidió utilizarla así en el estudio y evitar una recalcinación), para la CV fueron de 85.74%, 5.47% y 3.69%, respectivamente; por lo cual se corrobora que es una puzolana clase F de acuerdo a la norma ASTM 618-05.

Resistencia a compresión

En la Figura 2 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a compresión a diferentes edades. La mezcla M1 fue la que presentó el mejor comportamiento el cual coincide con lo reportado por Bell²⁰ y Wang²¹, quienes publicaron que al sustituir 20% de CPC por CV en mezclas de concreto con relaciones a/c de 0.55, 0.35 y 0.31 la resistencia a compresión de 0 a 28 días es menor respecto al control. No obstante, a edades posteriores de 28 días la resistencia es mayor en concretos con CV, esto se debe a la reacción secundaria de la sílice con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ generado durante la hidratación del cemento.



a) Resistencia a 28 días

b) Resistencia a 56 días

c) Resistencia a 90 días

Figura 2.- Resultados de la prueba de resistencia a compresión

El valor promedio de resistencia a compresión para la mezcla M2, a la edad de 28 días, presentó una reducción de resistencia del 7% respecto a la mezcla M0, sin embargo superó a la resistencia de diseño. A la edad de 56 días esta diferencia fue de 8%, y a los 90 días de edad alcanzó una resistencia de 386 Kg/cm², 5% inferior a M0. Por lo tanto, la incorporación de 10% de CBC y 20% de CV en concretos ternarios, no afecta significativamente el desarrollo de la resistencia a compresión del concreto.

Para la mezcla M3 la resistencia obtenida a los 28 días fue de 299 Kg/cm², inferior a la considerada en el diseño y 15% inferior a M0, mientras que a los 56 días la diferencia se redujo a 10%. Posteriormente a los 90 días superó a la resistencia presentada por M2 y fue tan sólo 4% inferior a la M0. Por lo tanto, la resistencia a compresión se mejora a edades tardías al sustituir 40% de CPC por CBC y CV, lo anterior es respaldado por los datos de la composición química obtenidos en cada ceniza.

Potenciales de Corrosión

Las lecturas de potenciales de corrosión se muestran en la Figura 3, en ella se presentan resultados de 220 días de monitoreo. Con base en los parámetros de la norma ASTM C876 y los valores de la gráfica, desde el inicio de las pruebas, se observa una probabilidad mayor de 90% que al momento de las lecturas se estaba produciendo corrosión en el acero de refuerzo.

Es importante mencionar que el efecto de la temperatura en los potenciales de corrosión se pudo minimizar debido a que las probetas se mantuvieron en el interior de la cámara durante todo el periodo de exposición y prueba, esto permitió obtener lecturas relativamente estables. Sin embargo, la condición de humedad (95% en la cámara) promovió que las lecturas de potenciales fueran muy altas por el incremento de la conductividad entre poros en la matriz de concreto.

Tomado en cuenta lo anterior y que la prueba de potenciales indica probabilidades de corrosión, es posible distinguir que la mezcla que presentó mejor comportamiento durante el tiempo de la prueba fue la mezcla M1, ya que ésta presentó los valores menos negativos que el resto de las mezclas, lo anterior coincide con lo reportado por Chalee et al, 2007²².

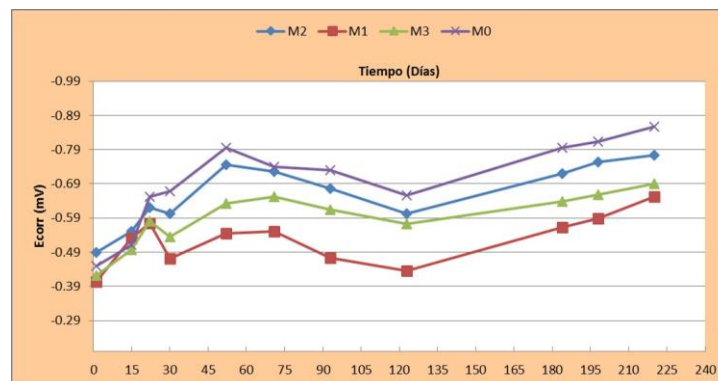


Figura 3.- Resultados de la prueba de potenciales de corrosión

Velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados de la prueba de VPU se presentan en la Figura 4. Los valores de VPU al igual que en investigaciones previas²³⁻²⁴ muestran gran variabilidad en los primeros días de medición para todas las mezclas, lo anterior es probable que sea consecuencia del proceso de hidratación del cemento. Después de 28 días hay un considerable decremento de la variabilidad entre lecturas y de la tasa de incremento de la VPU, es decir, las lecturas son más estables para las cuatro mezclas. Los concretos de las mezclas M0 y M1 presentaron mayores valores de VPU que las Mezclas M2 y M3 en la mayor parte del tiempo que duró la prueba, lo cual es congruente, ya que las éstas dos últimas mezclas contienen menos cemento que la M0 y M1, y por tanto son menos densas²⁵. Con el paso del tiempo los valores de VPU de los concretos ternarios aumentaron ligeramente, este incremento es muy probable que sea consecuencia de la densificación de las matrices, causada por la reacción puzolánica tardía de la CBC. Lo anterior coincide con los resultados de resistencia a la compresión obtenidos.

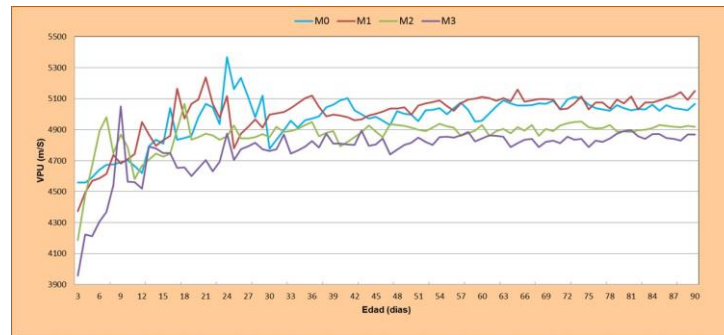


Figura 4.- Resultados de la prueba de potenciales de corrosión

La adición de la CBC a las mezclas de concretos ternarios influyó negativamente en las lecturas de VPU, principalmente por el tamaño de sus partículas, ya que este es uno de los factores que incide en la velocidad de la reacción puzolánica²⁶ de este tipo de materiales. Es probable que a edades mayores a 90 días los valores de VPU de la mezcla M2, aumenten y superen a las lecturas de VPU de la mezcla M3 y sean similares a las de la mezcla M0, así como sucedió en la prueba de resistencia a compresión.

CONCLUSIONES

La combinación de 10% de CBC y 20% de CV no afecta significativamente la resistencia a compresión del concreto a edades tempranas; no obstante, con la combinación de 20% de CBC y 20% de CV se mejora a los 90 días.

La sustitución parcial de cemento portland por CBC+CV reducen el riesgo de corrosión del acero de refuerzo en las probetas de concretos ternarios.

La adición de CV y CBC (con tamaño máximo de 75 μm) en concreto, disminuye las velocidades de pulso ultrasónico durante el tiempo evaluado.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Instituto Politécnico Nacional y a la COFAA del IPN, por el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo. De manera especial al M. en C. Venustiano Ríos Parada, su colaboración y apoyo.

REFERENCIAS

- 1.- Flatt, R. J., Roussel, N., & Cheeseman, C. R. "Concrete: An eco material that needs to improved", Journal of the European Ceramic Society 32, 11 (2012): pp. 2787-2798.
- 2- Rashad, A. M. "A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash", Materials & Design 53, 0 (2014): pp. 1005-1025.

- 3.-Anand, S., Vrat, P., & Dahiya, R. P. "Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry", *Journal of Environmental Management* 79, 4 (2006): pp. 383-398.
- 4.- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. "A review on emission analysis in cement Industries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 5 (2011): pp. 2252-2261.
- 5.- Ali Reza Bagheri, Hamed Zanganeh, Mohamad Mehdi Moalemi. "Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag", *Cement and Concrete Composites* 34. (2012): pp. 663–670.
- 6.- Tahir Kemal Erdem, Onder Kirca. "Use of binary and ternary blends in high strength concrete", *Construction and Building Materials* 22. (2008): pp. 1477–1483.
- 7.- Antiohos S., Maganari K., Tsimas S. "Evaluation of ternary fly ash intermixtures for use as supplementary cementing materials", *Cement and Concrete Composites* 27. (2005): pp. 349–356.
- 8.- Hassan EL-Chabib, Ahmed Ibrahim. "The performance of high-strength flowable concrete made with binary, ternary, or quaternary binder in hot climate", *Construction and Building Materials* 47. (2013):pp. 245–253.
- 9.- Mehmet Gesoglu, Erhan Güneyisi, Erdogan Özbay. "Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag and silica fume", *Construction and Building Materials* 23. (2009): pp. 847–1854.
- 10.- Saïd Laldji and Arezki Tagnit-Hamou "Properties of Ternary and Quaternary Concrete Incorporating New Alternative Cementitious Material". *ACI Materials Journal* 103, 2 (2006): pp. 83-89.
- 11.- S.K. Antiohos, V.G. Papadakis, S. Tsimas. "Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness", *Cement and Concrete Research* 61–62. (2014): pp. 20–27.
- 12.- Alireza Naji Givi, Suraya Abdul Rashid, Farah Nora A. Aziz, Mohamad Amran Mohd Salleh. "Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review". *Journal of American Science* 6. (2010): pp. 157-165.
- 13.- Ganesan K., Rajagopal K., Thangavel K. "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites* 29, (2007): pp. 515–524.
- 14.- B. Chatveera, P. Lertwattanakul. "Durability of conventional concretes containing black rice husk ash", *Journal of Environmental Management* 92. (2011): pp. 59-66.
- 15.- Maldonado-Bandala, E.E., Jiménez- Quero, V., Olguin-Coca, F.J., Lizarraga M, L.G., Baltazar-Zamora, M.A., Ortiz-C, A., Almeraya C, F., Zambrano R, P. "Electrochemical characterization of modified concretes with sugar cane bagasse ash", *International Journal of Electrochemical Science* 6 (10), (2011): pp. 4915-4926.
- 16.- Cordeiro G.C., Toledo Filho R.D., Tavares L.M. Fairbairn E.M.R. "Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete", *Cement Concrete Research* 39. (2009): pp. 110-115.
- 17.- Nuntachai Chusilp, Chai Jaturapitakkul, Kraiwood Kiattikomol. "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials* 23, (2009): pp. 3352–3358.
- 18.- Cordeiro G.C., Toledo-Filho R.D., Tavares L.M., Fairbairn E.M.R. "Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes", *Construction and Building Materials* 29, (2012): pp. 641-646.
- 19.- Morales E.V., Villar-Cociña E., Frías M., Santos S.F., Savastano Jr. H. "Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane, waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation". *Cement Concrete Composites* 31, 1 (2009): pp. 22-28.

- 20.- Beall, Christine y Jaffe, Rochelle. Concrete and Masonry Databook. McGraw-Hill. (2003): p.p 28.
- 21.- Wang Zhen-shuanga. "Influence of fly ash on the mechanical properties of frame concrete", Sustainable Cities and Society 1, (2011): pp. 164–169.
- 22.- W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, C. Jaturapitakkul. Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. Construction and Building Materials 21 (2007) 965–971.
- 23.- Flores, G. J. "Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico", Tesis de Maestría, CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca. (2008). Oaxaca, México.
- 24.- Martínez, H.A. "Evaluación del efecto de adiciones industriales y naturales en la resistencia a la penetración de cloruros en concreto hidráulico". Tesis de Maestría, CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca. (2009). Oaxaca, México.
- 25.- Neville A.M. Properties of concrete. Fourth Edition. 2000. Malaysia. Pp. 844.
- 26.- Martirena Hernández J.F., Middendorf B., Gehrke M., and Budelmann H. "Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction", Cement and Concrete Research 28, 11 (1998): p. 1525–1536.

EVALUACION DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO REALIZADOS MEDIANTE CEMENTANTES CUATERNARIOS.

A.R. Campos¹, L.Y. Gómez¹

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIME, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P: 66451, México.

RESUMEN

El cambio climático antropogénico es uno de los principales problemas que afectan a la humanidad, sus repercusiones están presentes en múltiples ámbitos de nuestra sociedad. En la industria de la construcción el cambio climático somete a las estructuras a ambientes cada vez más agresivos de exposición. Los concretos de alto desempeño han presentado un mejor comportamiento a ambiente agresivos de exposición debido principalmente a su baja porosidad y alta resistencia mecánica. En esta investigación se realizaron concretos de alta resistencia de relación a/c 0.35 con 35 y 50% de sustitución de cemento por materiales puzolánicos (Cemento Portland Ordinario, Cemento Portland Compuesto, humo de sílice, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín), los cuales fueron caracterizados mediante pruebas mecánicas (Resistencia a la compresión), físicas, (área superficial, densidad, peso volumétrico etc.) químicas (composición), dando especial importancia al estudio de la microestructura mediante difracción de rayos X, SEM. En otro aspecto la durabilidad de estos concretos también se estudio sometiendo todos los especímenes a pruebas de carbonatación acelerada, carbonatación y resistencia a los cloruros. Los resultados obtenidos nos permiten determinar las mejores condiciones de sustitución. Así como también a través de los datos obtenidos se obtiene la afectación causada por los diferentes ambientes de exposición y esta es comparada con los resultados obtenidos para un concreto normal.

Palabras clave: Durabilidad, Carbonatación, Cambio climático.

ABSTRACT

Anthropogenic climate change is one of the main problems that affect humanity, their effects are present in many areas of our society. In the construction industry climate change the structures subjected to increasingly aggressive environment exposure. High performance concretes have presented a better performance exposure to aggressive atmosphere mainly due to its low porosity and high mechanical strength. In this research concrete were made of high strength / c ratio 0.35 with 35 and 50% replacement of cement by pozzolanic materials (Ordinary Portland Cement, Portland Cement Composite, silica fume, granulated blast furnace slag, fly ash and metakaolin), which were characterized by mechanical tests (compressive strength), physical (surface area, density, volume and weight etc.) chemical (composition), with emphasis on the study of the microstructure by XRD, SEM. In another aspect the durability of these particular study also subjected to testing all specimens accelerated carbonation, carbonation and resistance to

chlorides. The results allow us to determine the best conditions for the replacement. As well as the data obtained through the effects caused by different exposure and this is compared with the results obtained for a normal concrete is obtained.

Keywords: Durability, carbonation, Climate Change.

1. Introducción.

El concreto hecho con cemento portland es probablemente el material más utilizado fabricado por el hombre en el mundo. Esto se atribuye principalmente al bajo costo de los materiales, así como también al bajo costo del mantenimiento. Por lo tanto, no es sorprendente que muchos avances en la tecnología del concreto hayan ocurrido como resultado de dos fuerzas impulsoras, específicamente la velocidad de construcción y la durabilidad del concreto [1]. Algunas estimaciones indican que la industria del concreto consume aproximadamente 8×10^9 toneladas de agregados naturales por año. La fabricación del cemento portland, el ligante más usado en el concreto, también requiere grandes cantidades de materias primas. El consumo mundial de cemento portland incrementó de aproximadamente 2×10^6 toneladas en 1880 a 1.5×10^9 en 1998. Además de otros materiales, cada tonelada de cemento portland requiere aproximadamente 1.5 toneladas de caliza y cantidades considerables de energía eléctrica y de combustibles fósiles. Las emisiones de CO_2 a la atmósfera son similares a la cantidad de cemento producido, esto significa que 1.5×10^9 toneladas de CO_2 son liberadas al medio ambiente al año.

1.1. Materiales de Reemplazo en el Cemento Portland.

Taylor define a un cemento compuesto o sustituido como un cemento hidráulico formado por cemento Portland y uno o más materiales inorgánicos (llamados materiales de reemplazo) que forman parte en las reacciones de hidratación, contribuyendo substancialmente a los productos de hidratación [2]. Los materiales de reemplazo se han utilizado tradicionalmente para mejorar las propiedades del cemento tanto fresco como endurecido, que conlleva además al ahorro de recursos económicos y energéticos.

En la Tabla 1 se muestran los diferentes tipos de cementos compuestos, de acuerdo con la norma ASTM C 595-98 [3] y el porcentaje de material a reemplazar. En la Tabla 2 se presentan los tipos de cemento y el rango de reemplazo de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-1999 ONNCCE [4].

Tabla 1. Tipos de Cemento compuesto y rangos de reemplazo, de acuerdo a ASTM C 595-98[2].

TIPO	MATERIALES DE REEMPLAZO
IP	15-40% en peso de puzolana (ceniza volante)
I(PM)	0-15% en peso de puzolana (ceniza volante)
P	15-40% en peso de puzolana (ceniza volante)
IS	25-70% en peso de escoria del alto horno alto
I(SM)	0-25% en peso de escoria del alto horno alto
S	70-100% en peso de escoria del alto horno alto

Tabla 2. Tipos de Cemento compuesto y rangos de reemplazo, de acuerdo a NMX-C-414-1999 ONNCCE [3].

COMPONENTES PRINCIPALES							
TIPO	Denominación	Cement o Portland A	GGBF S	Material Puzolánic o C	S F	CaCO ₃	Componente s minoritarios B
CPO	Cemento Portland Ordinario	95 – 100	---	---	---	---	0 – 5
CPP	Cemento Portland Puzolánic o	50 – 94	---	6 – 50	---	---	0 – 5
CPEG	Cemento Portland con GGBFS	40 – 94	6 – 60	---	---	---	0 – 5
CPC	Cemento Portland Compuesto D	50 – 94	6 – 29	6 – 29	---	6 – 35	0 – 5

El uso de materiales de reemplazo se ha ido incrementando considerablemente día a día ya que mundialmente se producen cerca de 700 millones de toneladas de materias potenciales como reemplazo del CPO [5]. Los materiales de reemplazo pueden dividirse en dos categorías de acuerdo a su composición química que se muestra en la Figura 1[4].

SiO₂

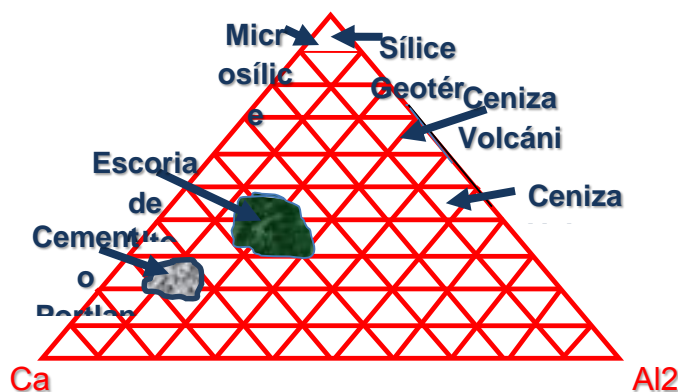


Figura 1. Diagrama ternario base sílice, calcio y alúmina, donde se muestran las diferentes composiciones de los materiales de reemplazo.

En general se ha encontrado que los materiales de reemplazo contribuyen a la durabilidad del cemento [6][7], sin embargo existen diversos estudios [8][9], que han demostrado que estos materiales pueden inducir la formación de fases dañinas y generar grietas y daño estructural. Algunos beneficios que ofrecen la utilización de materiales de reemplazo son:

- Mejoras en la impermeabilidad.
- Mejora la manejabilidad.
- Menor costo de producción.

1.2. El Concreto Reforzado.

El concreto reforzado es el material de construcción más utilizado en el mundo, su versatilidad, economía y alcance lo hacen un material único en su clase. Sin embargo, el concreto reforzado se deteriora al interactuar con el medio ambiente [10]. Muchas estructuras de concreto reforzado construidas desde hace 40 a 100 años, ahora se incluyen dentro del patrimonio cultural debido a su importancia arquitectónica y social. Estos incluyen por ejemplo edificios, infraestructuras y estructuras industriales. Muchas de estas estructuras sufren el daño debido a la carbonatación del concreto y la consecuente corrosión de las varillas de acero embebidas en el concreto [11].

1.3. Uso de Nanomateriales para la fabricación de concretos de Alto Comportamiento.

El uso de estos materiales en el desarrollo de concretos con alto comportamiento es un tema de relevancia a nivel internacional. Se han desarrollado concretos de alto comportamiento o ultra alto comportamiento para la construcción de estructuras tales como: The Sherbrooke Pedestrian Bridge en Canada y The Seonyu Pedestrian Bridge en Korea. Estas estructuras pueden proporcionar ventajas sobre otro tipo de construcciones, ya que son más ligeras y existe un importante ahorro en cimentación y en uso de acero. El uso de nanomateriales en el concreto base cemento Pórtland puede proporcionar grandes ventajas en el desarrollo de concretos de alto comportamiento, incrementando de forma importante su resistencia a la compresión y su durabilidad. Algunos de los mecanismos por los cuales se pueden modificar estas propiedades, disminuyendo la permeabilidad e incrementando la resistencia son: (a) los nanomateriales funcionan como rellenos de huecos, (b) incrementando la reactividad del cemento Pórtland, funcionando como sitios de nucleación, lo que puede aumentar la generación de productos cementivos, (c) los nanomateriales pueden reaccionar por si mismos generando mayor cantidad de productos cementivos, mediante reacciones puzolánicas con el hidróxido de calcio generado por el cemento. El uso de los concretos de alto comportamiento puede proporcionar materiales de construcción que posean combinaciones de propiedades únicas como altas resistencias en todas las direcciones, alta dureza y alta tenacidad a la fractura. Esto puede hacer posible diseñar y construir estructuras gigantescas, extremadamente delgadas, no tan frágiles y que posean cierto grado de ductilidad que no tiene un concreto convencional. Adicionalmente, al combinar los concretos de alto y ultra alto comportamiento con composites cerámico- matriz metálica, se

pueden obtener no solo materiales para uso en ingeniería civil, sino para aplicaciones industriales (como herramientas de corte, bombas o maquinaria) o médicas (como implantes) [12].

1.4. Corrosión en concretos.

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica [13]. En la Figura 2, se ilustra el proceso de corrosión del concreto reforzado donde se forma la celda electroquímica.

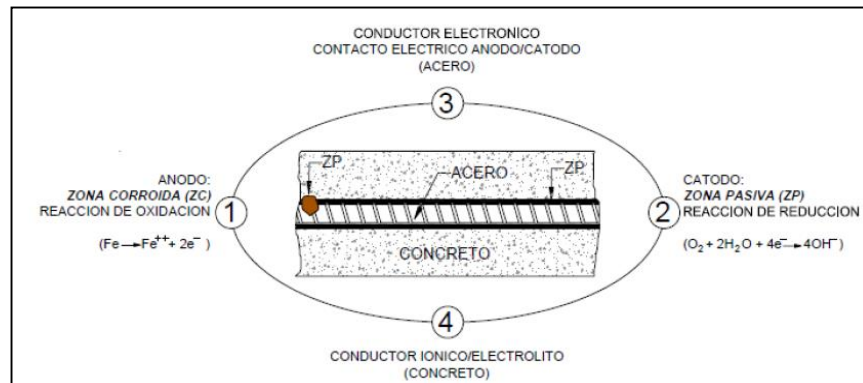


Figura 2.-Ilustración del proceso de corrosión.

La corrosión del acero es una de las causas más habituales responsable del deterioro de las estructuras de concreto que está llevando a elevados gastos de reparación y mantenimiento, con la preocupación que ello supone para las administraciones que son las propietarias de las obras públicas, y los particulares cuyas viviendas sufren deterioros prematuros [14].

1.4.1. Los daños causados por la corrosión.

Con el fin de contextualizar la importancia de la corrosión en las estructuras de concreto a continuación se presentan algunas cifras [15].

- Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América.
- Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión.

El deterioro de la infraestructura existente como, puentes, tuberías, tanques, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, ferrocarriles, etc., es un problema grave en la actualidad que afecta no sólo a las dependencias responsables de ellas, sino que repercute indirectamente a la sociedad debido a que estas estructuras quedan inservibles tiempo antes de alcanzar el final de su vida útil de proyecto, y muchas de las veces se debe a que no se tiene un correcto diagnóstico, de las condiciones que afectarán a la estructura a lo largo de su vida,

como es el caso del medio ambiente al cual estarán expuestas [16]. La Red Federal de Carreteras en México, cuenta con 6,854 puentes [17] la mayor parte de ellos construidos de concreto reforzado (67%) . Por su parte Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) tiene a su cargo 2500 puentes de los cuales gran parte de ellos son también de concreto reforzado. Las estructuras a cargo de la Red Federal de Carreteras, presentan diferentes grados de corrosión, debido a la penetración de cloruros y a la carbonatación, como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3.- Clasificación en función del tipo y nivel de daño de puentes inspeccionados.

Prioridad	Por penetración de cloruros [18]	Por carbonatación [19]
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

1.5. La carbonatación.

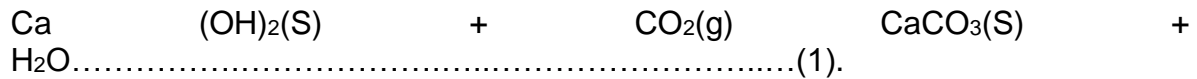
La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos [20]. La corrosión del acero de refuerzo es el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos de concreto reforzado. En ambientes tropicales no marinos, la carbonatación del concreto induce posteriormente la corrosión del acero de refuerzo siendo el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado [10].

La carbonatación como se ha mencionado es el proceso que causa mayor deterioro de las estructuras en un ambiente urbano, para que este proceso se dé requiere de ciertas condiciones:

- a) Contenido de humedad.
- b) Contenido de CO₂ y SO₂ atmosférico.
- c) Permeabilidad del concreto.
- d) Humedad Relativa.
- e) El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente [21].

Es conocido que la carbonatación es una reacción química la cual sucede entre la portlandita y el CO₂ [22]. La portlandita (CaOH₂), está presente como producto de la hidratación de los componentes del cemento como el silicato tricálcico (C₃S) y silicato dicálcico (C₂S)[23].

La reacción de la portlandita con el dióxido de carbono puede ser escrito como en la ecuación 1:



Cuando el CO₂ penetra en el concreto endurecido, este reacciona con la portlandita en presencia de humedad formando CaCO₃. El avance de la carbonatación depende de la humedad relativa, la concentración de CO₂, la presión de penetración y la temperatura del ambiente donde es colocado el concreto [24]. La carbonatación disminuye el pH del concreto de 12.5 unidades a valores entre 8 y 9 unidades [16] [25]. Una vez que el pH ha disminuido, el ambiente que rodea al refuerzo de acero pierde sus propiedades protectoras de la capa de óxido pasivo, generándose el proceso de la corrosión del acero y el agrietamiento del concreto, da fin al período de vida útil de la estructura [26]. El dióxido de carbono atmosférico se difunde dentro del concreto a través de la red de poros y microgrietas, y entonces reacciona con los componentes alcalinos de la solución del poro y las fases del cemento hidratado. Tales reacciones bajan la típica alcalinidad de la solución del poro. Esta reducción del PH dentro de la cubierta de concreto destruye la pasivación de la capa de óxidos inicialmente formada sobre el refuerzo y se inicia la corrosión. [27]. Las grietas no modifican significativamente la vida de servicio, pero las microgrietas de tensión reducen el tiempo que es necesario para que agentes agresivos alcancen el refuerzo a través de la cubierta de concreto. La cuantificación de este efecto es esencial para predecir la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado [28]. Para estimar los efectos de la carbonatación a largo plazo, es necesario un modelo de carbonatación fidedigno es necesario. Un número de propuestas pueden ser consideradas para la predicción de la vida de servicio del concreto tales como métodos semi-determinísticos, métodos experimentales relacionados con pruebas aceleradas basadas sobre un mecanismo de deterioro. En cualquier caso los modelos matemáticos proporcionan una expresión del proceso de degradación de la química y física del concreto [29].

1.6. La Durabilidad.

En los años más recientes se ha ido poniendo especial interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de las estructuras de concreto reforzado con el fin de programar eficientemente las acciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo [30].

En el concepto de durabilidad, no se da una definición específica que la describa claramente, dejando abierta la posibilidad de que los usuarios de las normativas la interpreten de diferente forma y ello afecte no solo a los proyectos sino a las predicciones de vida de servicio [31]. Cada vez con mayor importancia se ha planteado en la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras en servicio no deterioradas o estimar la futura en el caso de nuevas, influyendo desde la fase de proyecto [35].

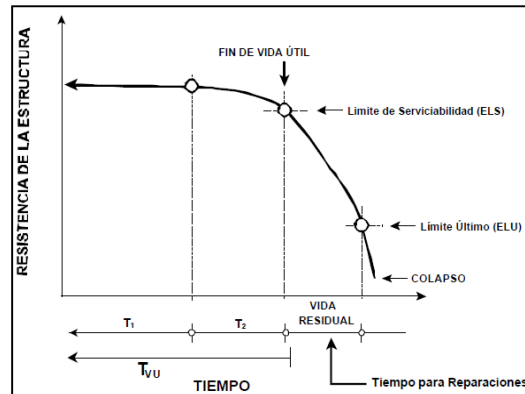


Figura 3.- Un Modelo de durabilidad de Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad de Andrés A. Torres Acosta y Miguel Martínez Madrid.

2. Procedimiento Experimental.

En el procedimiento experimental se presenta la metodología utilizada en esta investigación que se dividió en tres partes, Caracterización de Materiales. Diseño de Mezclas y Ensayes de Durabilidad.

Las características del cemento: La investigación se realizó con dos tipos de cementos, cemento portland ordinario CPO y cemento portland compuestos, ambos cumpliendo con la Norma NMX-C-414. Además se realizó la caracterización física y química de ambos cementos.

Las características de los materiales de reemplazo: Los materiales utilizados en nuestra investigación fueron, humo de sílice, metacaolín, escoria granulado de alto horno y ceniza volante, los cuales fueron caracterizados mediante pruebas de composición química, superficie Blaine y difracción de Rayos X.

Las características de los agregados: Los agregados utilizados para este proyecto fueron de origen calizo triturado de la región, el cual para el agregado grueso se utilizó la denominada grava de 3/8", estando éste dentro de los requerimientos granulométricos de la Norma ASTM C 33. Como agregado fino el material utilizado fue la denominada arena No. 4.

2.1. El diseño de las mezclas de concreto.

Se realizaron especímenes cilíndricos de 7.5 X15 cm, con ambos cementos CPO y CPC. En cuanto a la relación a/c se fijó el valor en 0.35 para todos los especímenes. Estos especímenes se sometieron a pruebas de resistencia de compresión, pruebas de durabilidad (Carbonatación y cloruros). Además se realizó la caracterización del concreto en estado endurecido a diferentes edades de curado mediante difracción de rayos X, SEM.

Tabla 4.- Características del concreto.

Condición	Cemento (CPO)	Ceniza Volante	Humo de Sílice	Metacaolín	EGAH	Sustitución
1	50%	--	10%	15%	25%	50%
2	50%	15%	10%	--	25%	50%
3	90%	--	10%	--	--	10%
4	50%	15%	--	10%	25%	50%
5	65%	25%	10%	--	15%	35%
6	65%	10%	5%	--	20%	35%
7	65%	20%	--	5%	10%	35%
8	65%	10%	--	5%	20%	35%

2.2. Durabilidad del concreto.

Las mezclas de concreto involucradas en esta investigación fueron sometidas a pruebas de durabilidad (carbonatación y penetración de cloruros), con la finalidad de relacionar el deterioro de la vida útil de los diferentes especímenes con su resistencia mecánica y su porcentaje de material de reemplazo.

Carbonatación natural: Los especímenes fueron expuestos a un ambiente natural localizado dentro de la zona metropolitana de Monterrey. Se realizaron la medición de las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad y concentración de CO₂, en todo el tiempo de exposición.

Carbonatación acelerada: Los especímenes fueron sometidos a una cámara de carbonatación en condiciones controladas con un contenido de CO₂ de 5%, humedad de 50-60%, temperatura 30°C expuestas a tiempos de exposición de 3, 7, 14 y 28 días.

Pruebas en cloruros: Se utilizaron probetas cilíndricas de 7.5X15cm con una varilla de acero embebida en su centro. Dichos especímenes fueron expuestos a cloruros en un ambiente artificial creado en laboratorio con la finalidad de determinar el potencial de corrosión y resistencia a la polarización. Los resultados obtenidos fueron comparados entre los diversos sistemas cementantes incluidos en esta investigación, además se realizó la comparación con los valores obtenidos para concretos convencionales.

3. Resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación. Se realizó la caracterización de los materiales cementantes, encontrando que sus valores están de acuerdo a los valores representados en la literatura científica.

Tabla 5.- Densidades de los cementantes.

Material	Densidad en gr/cm ³
Cemento Portland Ordinario (CPO 40)	3.16
Cemento Portland Compuesto (CPC 30R)	3.00
Ceniza Volante	2.5
Escoria granulada de alto horno	2.8
Humo de Sílice	2.21
Metacaolín	2.5

Los resultados de resistencia a la compresión nos permiten observar que en la condición de 10% de sustitución de cemento por humo de sílice, tiene mayor resistencia mecánica comparada con los cementantes cuaternarios utilizando 50 % de sustitución.

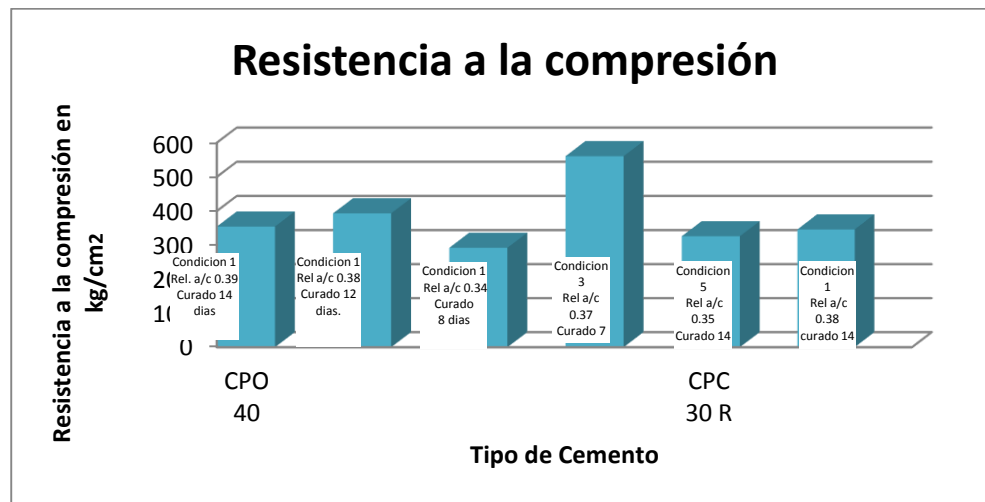


Figura 4. Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto.

4. Conclusiones preliminares.

Los resultados obtenidos en la presente investigación nos permiten concluir lo siguiente:

- ❖ Las mezclas de concreto con sustituciones de 50% presentan dificultades de trabajabilidad. Además la resistencia a la compresión de los concretos con dichas sustituciones requieren mayor tiempo de curado para obtener altas resistencias.
- ❖ Los concretos de alto desempeño presentan mayor vida útil que concretos de resistencias convencionales.
- ❖ Los concretos con mayor resistencia presentaron mayor resistividad y menor potencial de corrosión.

Referencias Bibliográficas

1. METHA, P. K., Tecnología del concreto para un desarrollo sustentable, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, <http://www.imcyc.com/>.
2. H. F. W, Taylor, "Cement Chemistry", Second edition, Thomas Telford, UK 1997.
3. ASTM C 595-98 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.01 Cement, gypsum and lime, 1999.
4. NMX-C-414-1999 ONNCCE, "Building industry – Hydraulic cements - Specifications and testing methods", 1999.

5. J.I. Escalante, "Materiales Alternativos al Cemento Portland", Avance y Perspectiva, Marzo-Abril 2002, Vol.21, pp. 79-88.
6. S. Diamond, "Effects of microsilica (silica fume) on pore solution chemistry of cement pastes" Journal of American Society, 66 5(1983) pp. 82-84.
7. C.L. Page, O.Vennesland, "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica Fume Cement Pastes" Mat et Const 16 (1983) pp. 19-25.
8. M. Kawamura, K.Takemoto, "Effects of Pozzolans and Blast Furnace, Slag on Alkali Hydroxide Concentrations in Pore solutions and Expansion by the Alkali-Silica Reaction" Semento Gijutsu Nenp 40 (1986) pp. 328-331.
9. C. Perry, J.E. Guillott, "Feasibility of Using Silica Fume to Control Expansion Due to alkali-aggregate reactions" Durability of Building Materials, (1985) pp. 133-146.
10. Serrano Ixtepan D., Moreno E. I., Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-2, 2006, pp. 37-45.
11. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R., Corrosion of steel in concrete - Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
12. Tang, M.C., High Performance Concrete – Past, Present and Future, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany, September 13-15, 2004 (884 pp)
13. Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.-CYTED.- Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. pp. 13-14, pp. 21, pp. 38-40.
14. De Rincón, O. y miembros de la Red DURAR, "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", 2ª edición, CYTED, Maracaibo, Venezuela, 1998.
15. Gundaker E. F., "Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects" 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE, 1996.
16. López Celis Raquel, Pérez Quiroz José Trinidad, Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel, Martínez Molina Wilfredo, Ariza Aguilar Luis Eduardo, Zamudio Cíntora Emilio, Genescá Llongueras Joan y Valdez Salas Benjamín, "Durabilidad de la Infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos", Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica No. 292, 2006, pp. 3-14.
17. <http://portal.sct.gob.mx/SctPortal/appmanager/Portal/Sct>, 2006.
18. <http://www.imt.mx/siget/galinfopuen7.htm>, 2006.
19. <http://www.imt.mx/siget/galinfopuen9.htm>, 2006.
20. Parrot, L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, 1987.
21. Francois R. y Arliguie G. "Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment", ACI SP-145.- American Concrete Institute, EUA, 1994.
22. Neville A.M., Brooks J.J. Concrete technology. Longman Group UK Ltd, 1993.
23. Neville Adam M., Tecnología del concreto, Cemento Portland, 4ª edición, México D.F., IMCYC, 2007.

24. Neville A. M., Properties of concrete. Fourth Edition. Longman Group UK Ltd, 1995.
25. Moreno E. I., "Carbonation of blended cement concretes," Disertación Doctoral, University of South Florida, 1999.
26. Moreno, E. I., "La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto," Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2000, pp. 43-48.
27. Parrott J.L. Measurement and modelling of porosity in drying cement paste. Materials Research Symposium Proceedings 1987, pp. 85 -104.
28. Konin A., François R., Arliguie G., Material and Structures, Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading, 1998, pp. 27-35.
29. Clifton, J.R., Predicting service life of concrete. ACI Material Journal, 1993, pp. 611-617.
30. ACI 365, Service-life prediction, State-of-the-art report. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2000.
31. Mendoza Rangel J. M., Castro-Borges P., Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual. Materiales de Construcción, Nota técnica, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Vol. 59, 2009, pp. 117-124.
32. NMX-C-403-ONNCCE-1999: "Construction Industry – Hydraulic Concrete for Structural Use" (in Spanish), Mexico, 1999.
33. Spanish Instruction of Structural Concrete (EHE), Chapter VII, B.O.E. January 13th, 1999.
34. American Concrete Institute (ACI) 365.1R-00: "Service-Life Prediction, State-of-the-Art Report", reported by ACI Committee 365, 2000.
35. Mangat, P. S. and Molloy, B. T. Materials and Structures, "Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete, 27, 1994, pp. 338-346.

CURADO INTERNO USANDO AGREGADOS CALIZOS DE ALTA ABSORCIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

R. Solís¹, E. I. Moreno¹, V. Terán²

1. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no Contaminantes por Periférico Norte, Apdo. Postal 150 Cordemex, Mérida, Yucatán.

2.- Estudiante de posgrado de la Universidad Autónoma de Yucatán.

RESUMEN

El curado interno es un medio alternativo para proporcionar agua adicional a la requerida para mezclar los componentes del concreto, de tal manera que esta cantidad extra de agua funcione como una reserva que reaccione con el cemento, cuando se vaya agotando el agua de mezclado. Estudios realizados en la Península de Yucatán, con concretos fabricados con agregados calizos, han sugerido que éstos podrían producir un curado interno; el objetivo del presente estudio fue explorar esta posibilidad. La metodología consistió en someter probetas de concreto a tres diferentes tratamientos de curado y analizar las diferencias de los valores medidos de resistencia a la compresión y permeabilidad. Los resultados mostraron valores similares de resistencia entre los concretos curados en ambientes húmedo y seco, lo cual se atribuyó al efecto del curado interno; y diferencias significativas en la permeabilidad, lo cual confirmó la importancia del curado húmedo para hacer durable al concreto.

Palabras clave: concreto, curado interno, resistencia, permeabilidad, durabilidad.

ABSTRACT

Internal curing is an alternative approach for providing additional water required for mixing the components of the concrete, so that this additional amount of water performs as a reserve to react with the cement, when the mixing water depletes. Studies in the Yucatan Peninsula using concrete made with limestone aggregates have suggested that they could produce an internal curing; the objective of this study was to explore this possibility. The methodology consisted of concrete specimens subjected to three different curing treatments and analyzes the differences of the measured values of compressive strength and permeability. The results showed similar resistance values between the concrete cured in wet and dry environments, which was attributed to the effect of internal curing; and significant differences in permeability, confirming the importance of moist curing for durable concrete.

Keywords: concrete, internal curing, compressive strength, permeability, durability.

INTRODUCCIÓN

Desde hace poco más de una década, el curado interno ha sido considerado como un medio alternativo para proporcionar agua al concreto, a partir de la liberación de aquella que ha sido absorbida por los agregados¹. Para que el curado interno se produzca, el agua de reserva contenida en los agregados debe ser fácilmente evacuada, y así poder reaccionar con los compuestos del cemento. El movimiento del agua, de los agregados hacia la pasta, inicia desde los poros más grandes y, al vaciarse éstos, continúa con los poros de menor diámetro. Cuando cierto diámetro de poro límite es alcanzado, el agua no tiene la energía necesaria para ser cedida y finaliza el efecto del curado interno.

El curado interno puede darse inmediatamente de iniciar la hidratación del cemento. En sus primeras horas la pasta de cemento es aún muy permeable, por lo que el agua es capaz de moverse fácilmente, hasta por 2 mm de la fuente de reserva interna²; más allá de los 28 días la permeabilidad de la pasta de cemento ha disminuido considerablemente, y se estima que el movimiento del agua se limita a distancias entre 100 y 200 μm .

La práctica común para promover el curado interno es utilizar agregados especiales que funcionan como agentes que incorporan agua al concreto. La cantidad de agregados absorbentes que es necesaria incluir en una mezcla, para tener un curado interno eficiente, ha sido modelada a partir del contenido y contracción química del cemento, el grado de hidratación esperado, y la absorción y grado de saturación del agregado².

El estudio que se reporta se llevó a cabo en Yucatán, en donde se emplean agregados producto de la trituración de roca caliza. El nivel en el cual se extraen las rocas que se utilizan para producir estos agregados es variable, pero generalmente es superior al nivel freático; en Mérida, éste tiene, en promedio, 7 m de profundidad. Conforme la profundidad del estrato de explotación se hace mayor, la roca se hace menos compacta; esta circunstancia provoca variabilidad en las características de las rocas, y por consecuencia en los agregados.

La composición geológica de la Península de Yucatán consiste en carbonatos autógenos y anhidritas, precipitados desde el Comancheano (Cretácico Medio-Aptiano), hasta el Mioceno³. Esta península se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos marinos del Terciario, que se van haciendo más jóvenes hacia el norte.

La composición química de esta caliza, obtenida a partir de muestras tomadas en la ciudad de Mérida, es la siguiente: 77 % de carbonato de calcio y 13 % de carbonato de magnesio; además de 2.25 % de arcillas y 1,11 % de dióxido de silicio; otros compuestos identificados fueron: óxido de hierro (0,08 %), sulfatos (0,004 %), nitratos (0,004 %) y cloruros (0,002 %)⁴.

Trabajos previos, realizados con concretos fabricados con los agregados anteriormente descritos, han sugerido que este tipo específico de agregados puede producir un curado interno; lo anterior en base a que no se han encontrado diferencias significativas entre la resistencia de los concretos con curado estándar y curado al ambiente⁵.

El objetivo de la presente investigación fue conocer si los agregados calizos de alta absorción de la Península de Yucatán se comportan como agente de curado interno en el concreto; para lo anterior se compararon los resultados de la medición de la

resistencia a la compresión y permeabilidad de concretos que fueron sujetos a tres diferentes tratamientos de curado.

METODOLOGÍA

Para observar el efecto del curado interno, atribuible a la capacidad de absorción de los agregados, se aplicaron tres diferentes tratamientos de curado a probetas de concreto fabricadas en laboratorio: curado por inmersión en agua (T1); curado natural al medio ambiente bajo sombra (T2); y curado en condiciones controladas de temperatura [$22 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$] y humedad relativa [$60 \pm 5,0 \%$] (T3).

Con el tratamiento T1 se buscó tener la condición óptima de humedad e hidratación en el concreto; con el tratamiento T2 se buscó limitar la humedad del concreto a la que pudiera obtener tanto del medio ambiente, como de la absorción de los agregados; y con el tratamiento T3 se buscó tener una condición de baja humedad ambiental, que forzara la liberación de la humedad de los agregados.

Se prepararon dos tipos de concretos: con agregados calizos (Ca), y con grava de mármol y arena de sílice (MS). Para el primer tipo se fabricaron probetas de concreto con dos muestras diferentes de agregado (concretos Ca1 y Ca2) provenientes de la misma región geológica, buscando observar la variabilidad de los resultados para el mismo tipo de agregado; **en la sección de resultados, se utilizó la abreviatura Ca's para indicar que se reunieron en un único grupo los concretos preparados con las dos muestras de agregado calizo.** En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas medidas en las muestras de agregados utilizados. Se puede apreciar que los agregados calizos presentan alta absorción.

Tabla 1. Propiedades de las muestras de agregados utilizadas.

Propiedad	Caliza 1		Caliza 2		Mármol	Sílice
	Grava	Arena	Grava	Arena	Grava	Arena
PVSS (Kg/m^3)	1 057	1 199	1 224	1 218	1 334	1 578
PVSC (Kg/m^3)	1 148	---	1 313	---	1 357	----
Desgaste (%)	42	---	29	---	24	----
Gravedad específica	2,20	2,28	2,38	2,38	2,70	2,65
Absorción (%)	10,40	6,72	7,10	7,98	0,49	0,77
Módulo finura	---	3,19	---	2,38	---	2,65

Todos los concretos se diseñaron con el método de volúmenes absolutos del ACI⁶, utilizando una misma relación agua/cemento de 0,50; el tipo de cemento fue CPC 30 (MPa) de fabricación mexicana, que corresponde al Tipo I⁷, con adición de caliza. **Al realizar la dosificación, para calcular el ajuste del agua de mezclado, se consideró que los agregados eran capaces de absorber durante la revoltura un 80% de su peso.**

Las variables que se midieron en el concreto, como una forma indirecta de observar la hidratación del cemento, fueron: la resistencia a la compresión⁸ y la permeabilidad⁹. La primera a edades de 28 y 90 días, y la segunda a 90 días.

Para medir la resistencia a la compresión se usaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura; y para la permeabilidad probetas prismáticas de 15 por 15

por 60 cm. Se realizaron tres repeticiones a las mediciones de las variables; y se hicieron tres réplicas del experimento completo.

Los parámetros climatológicos, durante el lapso que duró el experimento, fueron los siguientes: rango de humedad relativa mínima diaria de 45% a 97%; y rango de humedad relativa máxima diaria de 98% a 100%. Rango de temperatura mínima diaria de 11°C a 25°C; y rango de temperatura máxima diaria de 22°C a 37°C. La clasificación del clima de la región en la que se llevó a cabo el estudio es de Cálido Subhúmedo.

A partir de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión y de la permeabilidad se realizaron Análisis de Varianza (ANOVA), utilizando como estadístico de prueba la F de Fisher. El objetivo de este análisis fue probar si las medias de las variables estudiadas fueron estadísticamente diferentes, cuando los concretos se agruparon de acuerdo a los tratamientos de curado. Se aceptó como significancia el valor de 0,05, que representó la probabilidad de que las diferencias entre las medias se debieran al azar.

RESULTADOS

Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión medida a los 28 días se presentan en la Tabla 2, la cual contiene la media y la desviación estándar de cada tipo de concreto fabricado, para cada uno de los tres tratamientos de curado aplicados. Para el caso del concreto fabricado con agregados calizos, se presenta también como un tipo (Ca's) la agrupación de los concretos fabricados con las dos muestras de agregados calizos.

Tabla 2. Resistencia a la compresión a 28 días para cada tratamiento de curado (MPa).

Tipo de concreto	Tratamiento de curado					
	T1		T2		T3	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Ca1	27,7	2,0	28,8	2,5	28,1	1,7
Ca2	32,4	2,0	33,4	1,4	31,8	1,9
Ca's	30,1	3,3	31,1	3,3	30,0	2,6
MS	33,3	1,0	24,6	2,5	23,5	2,2

De la misma forma descrita para la edad de 28 días, los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión medidas a los 90 días se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resistencia a la compresión a 90 días para cada tratamiento de curado (MPa).

Tipo de concreto	Tratamientos de curado					
	T1		T2		T3	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Ca1	30,1	1,4	28,5	1,5	27,5	1,1
Ca2	34,7	1,1	34,6	2,4	32,2	1,7
Ca's	32,4	3,3	31,6	4,3	29,8	3,3
MS	36,5	1,3	24,7	1,5	23,7	2,1

La Figura 1 presenta el desarrollo en el tiempo de la resistencia a la compresión de los concretos con agregados calizos (Ca's); en esta gráfica se consideró en un solo grupo los concretos preparados con las dos muestras de este tipo de agregado (Ca1 y Ca2), para los tres tratamientos de curado. De la misma forma, la Figura 2 presenta el desarrollo en el tiempo de la resistencia a la compresión de los concretos fabricados con agregados mármol-sílice (MS).

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) para probar la diferencia estadística de las medias de la resistencia a la compresión de los tipos de concretos sujetos a los tres diferentes tratamientos de curado. Los resultados se muestran en la Tabla 4, en la que se puede apreciar que para los concretos preparados con agregados calizos no hubo diferencia entre las medias de la resistencia a la compresión (significancias mayores a 0,05), que pudiera ser atribuible a los diferentes tratamientos de curado; lo anterior para las dos edades de prueba. Mientras que para el tipo de concreto MS (agregados poco absorbentes de mármol-sílice) el bajo valor de la significancia (menor a 0,05) indica la existencia de diferencia significativa entre las medias. En la Figura 2 se observa con claridad que el concreto con tratamiento T1 es el que presenta valores diferentes de las medias; esto también se demostró con un análisis estadístico *post hoc*, que por brevedad se omite en este reporte.

De lo anterior se puede asumir que en los concretos con agregados calizos absorbentes, el grado de hidratación del cemento fue similar para los tres tratamientos de curado. Para en el caso del concreto que se expuso a un ambiente de curado de baja humedad, los poros capilares de la pasta de cemento debieron mantenerse en un estado cercano a la saturación; por lo que la evaporación, causada de manera deliberada en estos concretos, debió ser compensada por el efecto de la liberación del agua contenida en estos agregados de alta porosidad, es decir, por un curado interno. En contraste, se puede asumir que en los concretos con agregados no absorbentes el grado de hidratación del cemento fue menor cuando se curó el concreto en ambientes natural y de baja humedad, respecto del que tuvo el concreto con curado estándar. El análisis conjunto de las resistencias obtenidas en los concretos de alta y baja absorción, sugieren que el efecto observado en la Figura 1 (no diferencia significativa entre las medias de los tres tratamientos) se debe a la liberación del agua absorbida por los agregados calizos en los tratamientos T2 y T3.

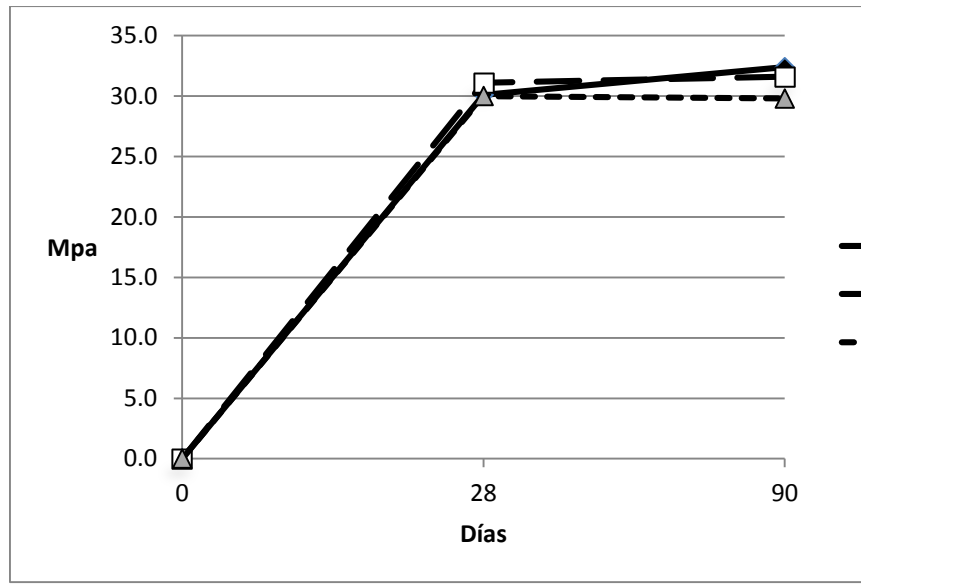


Figura 1. Desarrollo de la resistencia a la compresión de los concretos con agregados calizos (Ca's) para los tres tratamientos de curado.

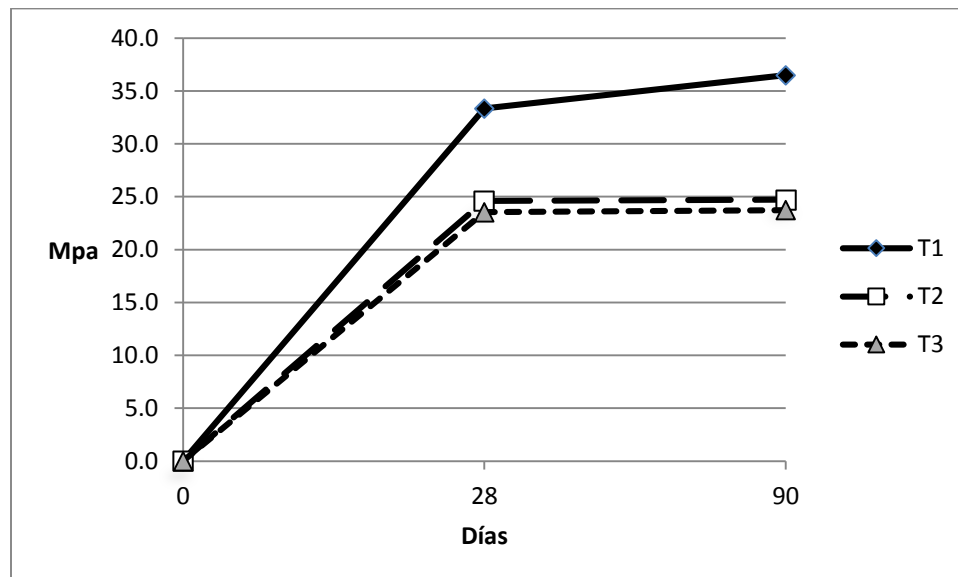


Figura 2. Desarrollo de la resistencia a la compresión de los concretos con agregados mármol-silíce (MS) para los tres tratamientos de curado.

Tabla 4.- Análisis de varianza de la resistencia a la compresión entre los tres tratamientos de curado.

Tipo de concreto	28 días		90 días	
	F de Fisher	Significancia	F de Fisher	Significancia
Ca1	0,183	0,837	3,113	0,118
Ca2	0,706	0,531	1,959	0,221
MS	28,815	<0,001	73,137	<0,001

Permeabilidad

Los resultados de las pruebas de permeabilidad al aire medida a los 90 días se presentan en la Tabla 5, la cual contiene la media y la desviación estándar de cada tipo de concreto fabricado, para cada uno de los tres tratamientos de curado aplicados. También se presenta el resultado considerando como un solo grupo (Ca's) los concreto fabricados con las dos muestras de agregado calizo.

Tabla 5.- Permeabilidad a 90 días para los tres tratamientos de curado ($10^{-6}m^2$).

Tipo de concreto	Tratamientos de curado					
	T1		T2		T3	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Ca1	0,212	0,061	5,256	1,949	9,707	3,484
Ca2	0,037	0,023	3,289	1,578	4,856	1,259
Ca's	0,125	0,124	4,273	1,391	7,282	3,430
MS	0,042	0,034	3,001	0,304	3,717	1,577

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) para probar la diferencia de las medias de la permeabilidad de los tipos de concretos sujetos a los tres diferentes tratamientos de curado. Los resultados se muestran en la Tabla 6, en la que se puede apreciar que, de acuerdo a los valores de las significancias (**menores a 0,05**), para todos los tipos de concreto las medias de la permeabilidad fueron diferentes entre algunos de los tratamientos de curado. De acuerdo a los criterios de calidad definidos a partir de la prueba de permeabilidad al aire⁹ todos los concretos **que tuvieron** curado estándar pueden ser calificados como concretos normal y muy bueno; mientras que todos los concretos **que fueron** curados en ambientes natural y de baja humedad pueden ser calificados como concretos pobres. **A partir de lo anterior, y sin que sea necesario un análisis post hoc, se puede afirmar que el tratamiento T1 es que el produjo concretos con permeabilidad significativamente diferente, respecto a las de los otros dos tratamientos.**

Tabla 6.- Análisis de varianza de la permeabilidad al aire del concreto entre los tres tratamientos de curado.

<i>Tipo de concreto</i>	<i>F de Fisher</i>	<i>Significancia</i>
Ca1	12.742	0.007
Ca2	13.344	0.006
MS	17.472	0.001

De lo anterior, se puede asumir que la capa superficial de los concretos curados en ambientes natural y de baja humedad tuvieron un grado de hidratación del cemento inferior al que tuvieron los concretos con curado estándar; **lo anterior significó que el curado interno no mostró ser un factor que produzca concretos durables.**

CONCLUSIONES

Los concretos con agregados calizos triturados de alta absorción, que fueron estudiados, alcanzan niveles de resistencia a la compresión similares, tanto aquellos con curado estándar, como aquellos curados en ambientes natural y de baja humedad; lo anterior es atribuible a un efecto de curado interno **que debió producirse en los dos últimos ambientes.**

La capa superficial de los concretos curados en ambientes natural y de baja humedad tuvo un alto nivel de permeabilidad, lo cual hace que en términos de su durabilidad sean considerados como concretos pobres; **mientras que los concretos con curado estándar tuvieron un nivel bajo de permeabilidad, lo cual** hace evidente la importancia de los procesos de curado húmedo para que el concreto **tenga un buen pronóstico de durabilidad.**

REFERENCIAS

- [1] D. Bentz, W. Weiss, Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review (United States: NISTIR 7765, U.S. Department of Commerce, 2011): pp. 4.
- [2] D. Bentz, K. Snyder, "Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate", Cement and Concrete Research 29, 11 (1999): pp. 1863-1867.
- [3] E. López, Estudio geológico de la Península de Yucatán (Mérida, México: Enciclopedia Yucatanense, Segunda Edición, Gobierno del Estado de Yucatán, 1985): pp. 33-75.

- [4] L. Alonzo, L. Espinosa, “Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán”, Ingeniería Revista Académica, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán 7, 1 (2003): pp. 27-36.
- [5] R. Solís, E. Moreno, C. Vázquez, “Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo”, Revista Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo - IMCYC 3, 1 (2011): 25-35.
- [6] ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Farmington Hills, MI, U.S.A: American Concrete Institute, 1991 Reapproved 2002): pp. 1-38.
- [7] ASTM C150/C150M-12, Standard Specification for Portland Cement (West Conshohocken, PA, U.S.A.: American Society for Testing and Materials, 2013): pp. 9.
- [8] ASTM C39/C39M-12a (2013), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. (West Conshohocken, PA, U.S.A.: American Society for Testing and Materials, 2013): pp. 7.
- [9] R. Torrent, G. Frenzer, “A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete” en: Symposium NDT-CE, (1995): pp. 985-991, Berlin, Germany.

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA MITIGAR LA DEGRADACIÓN DE CONCRETOS POR ATAQUE DE SULFATOS. ESTADO DEL ARTE.

L.I. Rodríguez¹, J.M. Mendoza¹, A. Durán¹, Dale P. Bentz².

¹Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

San Nicolás de los Garza, N.L, México 66450

²National Institute of Standards and Technology

100 Bureau Drive, Stop 8615

Gaithersburg, MD 20899-8615 USA

Resumen

El ataque por agentes químicos como los iones sulfato y cloruros en estructuras de concreto, es un problema de deterioro conocido reportado en la literatura. El problema consiste en el ingreso de agentes agresivos que a través de los poros capilares de la pasta de concreto interactúan con los productos de hidratación para dar lugar a productos de degradación. El presente documento pretende mostrar información que permita conocer el mecanismo de degradación de estos agentes químicos, así como diferentes métodos que han sido utilizados para reducir su ingreso, además de una tecnología implementada recientemente cuya aplicación ha resultado con éxito.

Abstract

The attack by chemicals such as sulfate and chloride ions in concrete structures is a known problem of deterioration reported in the literature. The problem is the penetration of aggressive agents through the capillary pores of the concrete paste interact with the hydration products to yield degradation products. This paper intends to show information to help determine the mechanism of degradation of these chemicals, as well as different methods have been used to reduce your income, along with a newly implemented technology whose application has been successfully.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzado son de gran importancia en el ámbito de la construcción. Las estructuras como puentes, carreteras y edificios, además de ser necesarias, representan el crecimiento de una sociedad prospera. Esto debido a que son países que aún tienen mucho que construir. La utilización del concreto reforzado en la construcción de estructuras para beneficio de una comunidad es muy común y conocido. Y es por esta razón que resulta necesario el mejoramiento y la prolongación de la vida útil de dichas estructuras.

En un principio las propiedades físico-mecánicas se asociaban a la durabilidad de los concretos, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación han demostrado que estos aspectos son necesarios más no fundamentales para la obtención de un concreto durable.

Según ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, sin perder sus propiedades de ingeniería [1]. Otra definición de durabilidad propuesta por J. M. Mendoza Rangel y P. Castro Borges, que toma en cuenta el efecto del cambio climático global. Como la “Capacidad que tiene un material de construcción, elemento o estructura de concreto de resistir a las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviciabilidad y conservando su forma original, propiedades químicas y condiciones de servicio”.[2]

De esta manera se entiende que la durabilidad del concreto no solo depende de la elaboración del concreto si no al medio ambiente que lo rodea.

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, es uno de los aspectos más importantes que actualmente se considera como prioridad en la estimación de la vida útil de las edificaciones siendo el deterioro uno de sus principales problemas. [3, 4] Este deterioro depende de las condiciones del entorno ambiental resultando fenómenos de degradación.

El deterioro por agentes químicos incluye generalmente interacciones químicas entre agentes agresivos presentes en el ambiente externo y los constituyentes de la pasta

de cemento. Cada uno de estos agentes provenientes de diferentes ambientes. Algunos de estos agentes químicos son: carbonatos, cloruros, y sulfatos entre otros.

Debido a problemas patológicos que presentan las estructuras de concreto, es necesario conocer el tipo de deterioro y mecanismo de degradación inducido por los diferentes agentes químicos, en nuestro caso deterioro inducido por el ingreso de iones cloro y sulfatos.

ATAQUES QUÍMICOS AL CONCRETO

Ataque por sulfatos

El ataque de los sulfatos es uno de los fenómenos que pueden causar daño gradual a las estructuras de concreto, conduce a la conversión de los productos de hidratación del cemento en etringita, yeso, y otros cambios de fase posibles, ^[5, 6] acompañado de un aumento de volumen. La expansión de volumen dentro del concreto puede causar daños y grietas que conduce finalmente a una pérdida de resistencia. ^[7]

La expansión en el concreto se debe a los compuestos débilmente solubles que se encuentran en el interior de la pasta de concreto y que dan origen al crecimiento de cristales, que generan una presión capaz de llevar a la ruptura de la estructura. Los iones sulfato principalmente se encuentran en aguas subterráneas, suelos, agua de mar, la descomposición de materia orgánica, y efluentes industriales. ^[8, 9, 10]

Según ACI 201, el agua utilizada en las torres de enfriamiento puede también ser una fuente potencial del ataque de sulfatos por el incremento gradual de estos al evaporarse el agua ^[1]. Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfato de calcio, de magnesio, y sodio cada uno de ellos de diferente solubilidad.

Los sulfatos de sodio reaccionan con el hidróxido de calcio para formar sulfato de calcio (yeso) y fundamentalmente sobre el aluminato tricálcico C_3A y el ferroaluminato tetracálcico C_4AF .

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferroaluminato tetracálcico, produciendo sulfoaluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

De los cuatro compuestos de cemento Portland (aluminato tricálcico, ferro aluminato tetra cálcico, silicato dicalcico y silicato tricálcico) el más vulnerable a los sulfatos es el aluminato tricálcico (C_3A) Este compuesto reacciona con el sulfato de calcio

(CaSO₄) más 32 moléculas de agua (32H₂O) formándose un sulfoaluminato cálcico llamado etringita (C₃A · CaSO₄). [11]

El sulfato de sodio reacciona primero con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de magnesio es el que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el pH de las pastas de cemento.

Ataque por cloruros

La principal causa de deterioro del acero de refuerzo en las estructuras de concreto es el causado por la exposición a los cloruros provenientes de sales de deshielo o de ambientes marinos. Los cloruros al igual que los sulfatos penetran por medio de los poros capilares presentes en el concreto, por transporte de agua que los contiene, así como por difusión y por absorción, con el tiempo existe formación de un óxido entre las barras de acero y concreto la cual llega a medir el doble del diámetro del acero de la barra de refuerzo, por lo que puede dar lugar a formación de grietas y desprendimiento del concreto. [12]

En condiciones normales, el concreto provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad hace que el acero se encuentre en un estado pasivo, siendo su velocidad de corrosión despreciable. Sin embargo la presencia de agentes agresivos (cloruros) en la superficie de las armaduras puede causar la pérdida de pasividad del acero y crear condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras.

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA MITIGAR EL ATAQUE QUÍMICO AL CONCRETO

De acuerdo a investigaciones anteriores se han generado múltiples recomendaciones y normas que especifican ciertas características con las cuales debe contarse para adquirir un concreto durable y resistente. Las características que debe tener un concreto para reducir el ingreso de agentes químicos son: Baja permeabilidad y porosidad del concreto. En caso de ataque por cloruros, en condiciones normales, el hormigón provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad (pH) hace que el acero se encuentre en un estado denominado pasivo, siendo su velocidad de corrosión despreciable. Alternativas empleadas para evitar la

corrosión del acero de refuerzo es el uso de inhibidores de corrosión, y pinturas epóxicas.

En caso de sulfatos normalmente se emplean prácticas para reducir al mínimo el ataque de este ion, de acuerdo a la especificación ASTM C 150 existen cementos resistentes a los sulfatos, cemento (Tipo II y tipo V) ^[13] los cuales tienen un contenido moderado de aluminato tricálcico; otra solución es la sustitución de una parte del cemento en la mezcla de concreto con cenizas volantes, y / o la reducción de la relación de agua/material cementante de la mezcla de concreto.

Con esto podemos adquirir una baja permeabilidad en el concreto. Pero con la reducción de la relación agua/cemento de la mezcla, debe tomarse en cuenta que esta no provoque posteriormente fisuras por contracción del concreto, por el calor de hidratación de la pasta de cemento.

Otro método utilizado recientemente es el curado interno con el propósito de lograr una mayor hidratación del cemento y con esto el aumento de los productos de hidratación, es una técnica que consiste en proporcionar humedad adicional en el concreto para una hidratación más eficaz del cemento y menor auto-deseccación. ^[14] Esto implica la introducción de un agente de curado en el concreto que proporcionará humedad adicional. Actualmente, dos métodos principales disponibles para el curado interno del concreto. El primer método consiste en utilizar polímeros súper absorbentes, ^[15] ya que estas partículas pueden absorber una gran cantidad de agua durante la mezcla de hormigón y formar grandes inclusiones que contienen agua libre, evitando así la auto-deseccación durante la hidratación del cemento. El segundo método consiste en utilizar un agregado de peso ligero poroso (pumicita) saturado ^[16] con el fin de suministrar una fuente interna de agua, que puede reemplazar el agua consumida por la contracción química durante la hidratación del cemento. El agente de curado interno debe poseer la capacidad de absorción de agua y altos porcentajes de desorción de agua. La cantidad de agua de curado interno necesario para reemplazar el agua de la mezcla consumida por contracción química.

Otra tecnología para mitigar el ingreso de agentes químicos a la pasta del concreto se le da el nombre de VERDiCT [incremento de la viscosidad para reducir la difusión en tecnología del concreto (por sus siglas en inglés)] la cual consiste en utilizar una

solución de curado interno que contiene el modificador de la viscosidad, que como es sabido, puede propiciar el aumento de la vida de servicio del concreto estructural. [17]

Esta tecnología se ha utilizado para reducir la entrada de iones cloruro en muestras de mortero [17,18] y concreto [19]. Posteriormente un artículo reciente demostró la misma tecnología para reducir el ataque de sulfatos en muestras de mortero. [20] faltando el implemento de la tecnología VERDICT para reducir el ingreso de iones sulfato en concreto, ya que no existe normativa disponible.

CONCLUSIONES

- Las tecnologías adicionales son buenas pero además de centrarnos en la parte durable, habrá que tomar en cuenta la parte sustentable que también es de suma importancia.
- Es importante tomar en cuenta además de factores que afectan las propiedades mecánicas de estructuras de concreto, obtener información que nos permita conocer otros factores que afectan su durabilidad dependiendo del ambiente al que sea expuesta cualquier estructura.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología Proyecto CONACyT

Ciencia Básica N°. 155363

REFERENCIAS

- 1.- Committee, ACI 201, **Guide to Durable Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice Part I-Materials and General Properties of Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1990.
- 2.- J. M. Mendoza Rangel, P. Castro Borges, **Credibility of Concepts and Models About Service life of Concrete Structures in the Face of the Effects of the Global Climatic Change. A Critical New**, construcción materials, 59 (296) 2009, pp. 117-124.
- 3.- Waddell y Dobrodolwski, **Manual de la construcción con concreto**, capítulo 3, McGraw Hill, México 1996.

- 4.- Castro P, **Corrosión en estructuras de concreto armado**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México 1998.
- 5.- A. Bonakdar, B. Mobasher, **Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials**, Constr Build Mater, 24 (1) 2010, pp. 61–70.
- 6.- K. Chen, M.Q. Jian, **Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion**, Constr Build Mater, 23 (2) 2009, pp. 812–816.
- 7.- E. Rozière, A. Loukili, R.E. Hachem, F. Grondin, **Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks**, Cem Concr Res, 39 (12) 2009, pp. 1188–1198.
- 8.- J.K. Chen, M.Q. Jiang, J. Zhu, **Damage evolution in cement mortar due to erosion of sulfate**, Corrosion Science, 50 (9) 2008, pp. 2478–2483.
- 9.- P.J.M. Monteiro, K.E. Kurtis, **Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack**, Cement and Concrete Research, 33 (7) 2003, pp. 987–993.
- 10.- N. Adam, **The confused world of sulfate attack on concrete**, Cement and Concrete Research, 34 (8) 2004, pp. 1275–1296.
- 11.- Aitcin Pierre Claude, **Binders For Durable and Sustainable Concrete**, modern concrete technology 16, Chapter 6, 2008.
- 12.- S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto**, Portland Cement Association Primera edición, 2004.
- 13.- ASTM C150-12, **Standard Specification for portland cement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- 14.- RILEM TC-196, **Internal curing of concrete, state-of-the-art report of RILEM technical committee 196-ICC**, K. Kovler, O.M. Jensen (Eds.), RILEM Publications S.A.R.L., France, Bagneux, 2007, pp. 139.
- 15.- S. Weber, H. W. Reinhardt, **A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing**, Advanced Cement Based Materials, 6 (2) 1997, pp. 59–68.
- 16.- O.M. Jensen, P.F. Hansen, **Water-entrained cement-based materials: I. Principle and theoretical background**, Cement and Concrete Research, 31 (4) 2001, pp. 647–654.
- 17.- D. P, Bentz, K. A. Snyder, and M. A. Peltz, **Doubling the Service Life of Concrete Structures. II: Performance of Nanoscale Viscosity Modifiers in Mortars**, Cement and Concrete Composites, 32(3), 2010, pp. 187-193.

18.- K. A. Snyder, D. P. Bentz, and J. M. Davis, ***Using Viscosity Modifiers to Reduce Effective Diffusivity in Mortars***, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (8), 2012, pp. 1017-1024.

19.- D. P. Bentz, K. A. Snyder, and M. A. Peltz, K. Obla, and H. Kim, ***Viscosity Modifiers to Enhance Concrete Performance***, submitted to ACI Materials Journal, 2012.

20.- D. P. Bentz, J. M. Davis, M. A. Peltz, K. A. Snyder, ***Influence of Internal Curing and Viscosity modifiers on Resistance to Sulfate Attack***, Materials and Structures, 2013.

DESEMPEÑO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE REPARACIÓN EXPUESTOS A AMBIENTE INDUSTRIAL

J.M. Flores-Jarquín¹, J.M. Mendoza¹, E.U. De Los Santos¹, P. Garcés²

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
2. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig S/N, San Vicente del Raspeig, España.

RESUMEN

El mantenimiento, la reparación y renovación de estructuras de concreto se han convertido en una parte importante en las actividades de la industria de la construcción. Por tal motivo, es necesario llevar a cabo investigaciones sobre los materiales de reparación adecuados para el entorno y las condiciones de servicio de cada estructura.

En el presente trabajo, se evalúa la durabilidad de dos morteros elaborados con diferentes adiciones de ceniza volante (20 y 50%) en sustitución de cemento, además de tres morteros de reparación comerciales, bajo el ataque de CO₂ en ambiente industrial. Para evaluar el desempeño como reparación de los materiales, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, flexión y adherencia, además de pruebas para medir durabilidad como potencial y velocidad de corrosión, permeabilidad y profundidad de carbonatación.

Palabras clave: Concreto, Materiales de Reparación, Corrosión, CO₂, Carbonatación, Durabilidad.

ABSTRACT

Maintenance, repair and renovation of concrete structures have become a very important part of the activities of the construction industry. Therefore, it is necessary to conduct research on appropriate materials for the environment and service conditions of each structure.

In this paper, the durability of two mortars made with different additions of fly ash (20 and 50%), by replacing of cement, plus three commercial repair mortars, under attack by CO₂ at industrial environments is evaluated. The tests to evaluate the performance of repair materials were compressive, flexural and bond strength, in addition tests to evaluate the durability were corrosion potential, corrosion rate, permeability and carbonation depth.

Palabras clave: Concrete, repair materials, Corrosion, CO₂, Carbonation, Durability.

INTRODUCCIÓN

El principal problema por el cual una estructura de concreto reforzado requiere reparación, es la corrosión del acero, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones, poniendo en riesgo su funcionalidad y seguridad¹. En ambientes industriales y urbanos, las grandes concentraciones de CO₂ son un problema para las edificaciones de concreto reforzado, debido a la carbonatación del concreto, reduciendo su alcalinidad y generando la despasivación y corrosión del acero.

Después de haber detectado el daño por corrosión en una estructura, es necesario emprender acciones para repararla y alargar su vida útil. El trabajo de reparación se puede dividir básicamente en los siguientes pasos: eliminación del concreto, limpieza del acero expuesto y la aplicación de un material de reparación².

La selección del material de reparación es el criterio más importante a considerar en el trabajo de reparación, normalmente la resistencia a la compresión es tomada para seleccionar un mortero de reparación, esto es totalmente insuficiente si no se tienen en cuenta otras cuestiones más importantes como es la compatibilidad del mortero con el sustrato de concreto. El tema de la compatibilidad nos lleva a estudiar la diferencia entre las propiedades del sustrato de concreto y el mortero de reparación, ya que dicha diferencia puede inducir efectos negativos sobre la reparación, generando agrietamiento y por lo tanto disminuyendo su durabilidad³.

Se han hecho muchos estudios para evaluar diferentes tipos de materiales de reparación disponibles en el mercado. Desafortunadamente, no están especificadas las propiedades que se deben considerar para la evaluación y selección de los materiales de reparación⁴. Algunos autores⁵, establecen las consideraciones que afectan la compatibilidad para una buena selección de los materiales de reparación. De estas consideraciones, probablemente la más importante es la capacidad de soportar los cambios de volumen, sin pérdida de adherencia ni agrietamientos, esto se conoce como "Compatibilidad dimensional". Además de los cambios de volumen, una reparación también debe de tener un efecto protector y para asegurar eso, se deben de considerar la compatibilidad química, electroquímica y la permeabilidad del material de reparación.

Los problemas relacionados a las propiedades a evaluar y la selección de los materiales de reparación, se atribuyen a la falta de regulación en relación a las actividades de reparación, mantenimiento y renovación^{6,7}. Además de la insuficiente información que proporcionan los fabricantes de los materiales de reparación.

Por tal motivo, es necesario llevar a cabo investigaciones sobre los materiales de reparación adecuados para el entorno y las condiciones de servicio de cada estructura. A su vez el empleo de materiales minerales alternos como la ceniza

volante, permitirán tener materiales de reparación de bajo costo ambiental y que cumplan con las características necesarias de una reparación duradera.

El objetivo de este trabajo es evaluar la durabilidad y el desempeño potencial de tres morteros preparados en el laboratorio, dos con sustitución de CV (20 y 50%) por CPO y tres morteros de reparación comerciales, en particular su comportamiento mecánico, estabilidad dimensional, adherencia y su capacidad para proteger al acero de la corrosión por carbonatación en un ambiente industrial.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La Tabla 1 muestra la proporción de los morteros elaborados en el laboratorio. El mortero MR es usado como referencia, los morteros M1 y M2 fueron elaborados con la misma relación agua/cemento y cemento-arena que la referencia, pero con adiciones de Ceniza Volante (CV) de 20 y 50% en sustitución de cemento. El cemento utilizado es un CPO 40 y la CV de tipo F, fue obtenida de la Carboeléctrica de la ciudad de Nava Coahuila. La composición química del CPO y CV se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Proporciones de los morteros de reparación fabricados en el laboratorio.

Mortero	Componente	Proporción
MR	CPO	1
	Arena	3
	Agua	0.5
M1	CPO	0.8
	CV	0.2
	Arena	3
M2	Agua	0.5
	CPO	0.5
	CV	0.5
	Arena	3
	Agua	0.5

Los morteros de reparación comerciales se identifican como C1, C2 y C3, estos son morteros pre-empacados, base cemento y de un solo componente, C1 es un mortero reforzado con fibras, C2 de fraguado rápido, C1 y C3 son modificados con polímeros y con adiciones de microsílíce en proporciones conocidas por el fabricante. El mezclado y las cantidades de agua que se utilizaron fueron los especificados en la ficha técnica de cada mortero.

Tabla 2. Composición Química en óxidos del Cemento Portland y la Ceniza Volante.

Óxidos	CPO (%)	CV (%)
SiO ₂	17.43	56.51
Al ₂ O ₃	4.67	33.11
Fe ₂ O ₃	2.25	1.49
CaO	63.27	0.70
MgO	1.23	1.67
SO ₃	4.98	0.34
Na ₂ O	0.56	3.32
K ₂ O	0.75	0.52

Después de la fabricación, los especímenes se conservaron en una cámara de curado a 100% de Humedad Relativa (RH) y a 21 ± 2 °C, durante 14 días. Una vez curados, los especímenes preparados para evaluar la capacidad de resistir el ingreso de agentes agresivos y el estado de corrosión de los morteros de reparación (Figura 1), fueron expuestos a la carbonatación en un ambiente industrial.

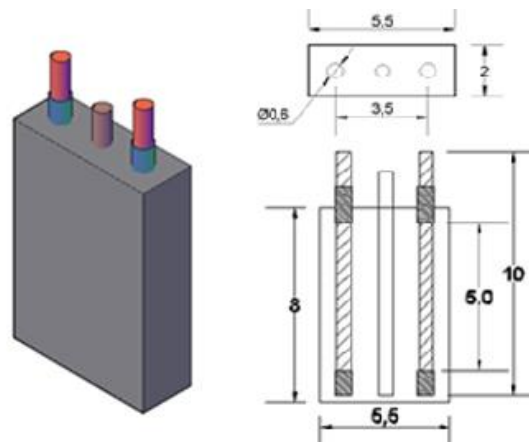


Figura 1. Especímen para evaluar la durabilidad de los morteros de reparación.

La industria donde fueron colocados los especímenes lleva a cabo procesos que crean un ambiente agresivo y dañino para el concreto, aquí se fabrica carbonato y bicarbonato de sodio.

El acero utilizado se preparó y limpio siguiendo el procedimiento establecido en ASTM G1, el cual consiste en remover completamente los productos de corrosión que pudiera tener antes de comenzar el ensayo. Después de la limpieza del acero, se pesó y se encintó cuidadosamente para delimitar el área a estudiar (50 mm).

Resistencia a compresión y flexión.

Para determinar la resistencia a la compresión de cada material se fabricaron cubos de mortero de 50 mm de lado. El procedimiento de llenado de los cubos y del ensaye, se realizó según lo establecido en la norma ASTM C 109⁸. La resistencia a la flexión se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C 348⁹, en probetas prismáticas de 40x40x160 mm

Adherencia.

El ensayo utilizado fue el conocido como de corte inclinado, el cual utiliza un prisma de 100x100x300 mm, hecho de dos mitades idénticas unidas a 30° y probados bajo compresión axial¹⁰.

Permeabilidad.

El procedimiento para determinar la permeabilidad al aire de los morteros de reparación se llevó a cabo mediante el ensayo de Permeabilidad de Torrent (TPT), sobre probetas cubicas de 150 mm ^{11,12}.

Profundidad de Carbonatación.

Para este ensayo, se fabricaron probetas prismáticas de 20x55x280 mm. El monitoreo se llevó a cabo usando fenolftaleína como indicador de la profundidad de carbonatación a diferentes edades.

Potenciales y Velocidades de Corrosión.

Los potenciales (E_{corr}) y velocidades (I_{corr}) de corrosión se determinaron mediante la prueba de resistencia a la polarización, Rp13 con una velocidad de barrido de 0.06 mV/s y solo en la zona catódica yendo de 0 a -10 mV. Esta metodología es aplicable para el estudio de la protección que ejercen los morteros de reparación sobre el acero de refuerzo.

RESULTADOS

La Tabla 3 muestra el comportamiento mecánico de cada mortero de reparación, se presentan los resultados de los ensayos a 28 días. Se puede observar que el mortero de reparación M1 muestra resistencias a la compresión más altas que cualquier otro mortero, incluso mayor que los morteros de reparación comerciales (C1, C2 y C3). En cuanto a la resistencia a la flexión, el mortero C1 muestra las resistencias más altas, debido a la adición de fibras, sin embargo el mortero M1 esta solo por debajo del C3. El mortero comercial C2 es el más bajo en cuanto a su comportamiento mecánico. De acuerdo a diferentes investigaciones^{14,15}, la menor resistencia de los morteros C2 y C3 es probablemente el resultado de sus adiciones.

Tabla 3. Comportamiento mecánico de los morteros de reparación.

Mortero	Resistencia a Compresión 28 días (MPa)	Resistencia a Flexión 28 días (MPa)
MR	57.4	12.7
M1	65.8	11.7
M2	32.6	10.6
C1	75.4	16.4
C2	30.0	7.4
C3	49.2	14.3

La adherencia se evaluó por el tipo de falla que presentan los prismas, en la Tabla 4 se muestra la resistencia a la adherencia de cada mortero a los 28 días y su tipo de falla. Si existe buena adherencia, la muestra falla monolíticamente en lugar de fallar a lo largo de la unión. Los resultados de la resistencia a la adherencia, muestran que los morteros con mejor comportamiento son el C1 y C3 debido a que la falla se presenta en conjunto con el concreto, a pesar de que el mortero M1 presenta la mayor resistencia a la adherencia¹⁶.

Tabla 4. Adherencia de los morteros de reparación.

Mortero	Resistencia a la Adherencia 28 días (MPa)	Tipo de Falla
MR	22.2	Interface
M1	26.1	Interface
M2	13.4	Interface
C1	19.4	Conc.-Mortero
C2	0	Interface
C3	22.53	Conc.-Mortero

La Figura 2 muestra la relación de la permeabilidad al aire en el tiempo para los diferentes morteros. Se observa como la permeabilidad va en aumento en casi todos los morteros, siendo el mortero C3 el que presenta los menores valores de permeabilidad y sin aumentos en relación con el tiempo. El mortero C2 no se observa por los rangos de la escala, debido a que es demasiado permeable. Mientras que el mortero comercial C1 no pudo ensayarse debido a presentar una superficie muy porosa.

Por lo tanto se puede decir que el mortero M1 presenta buena resistencia al ingreso de CO₂, tan buena como el mortero comercial C3. Según los parámetros establecidos para evaluar la calidad del mortero¹².

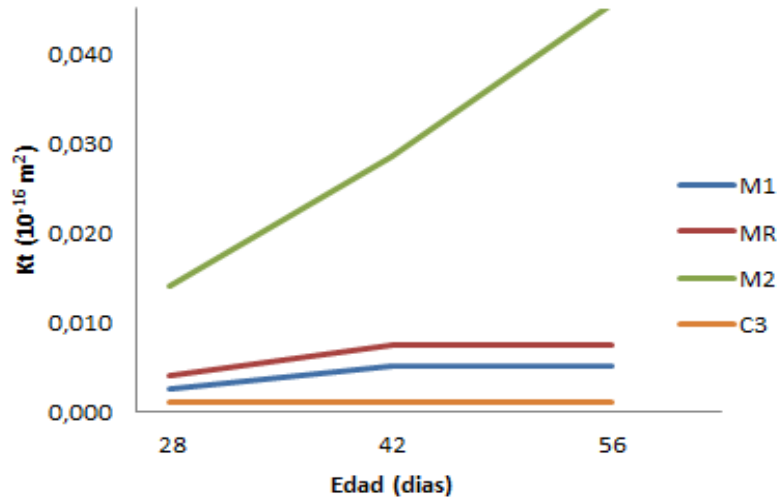


Figura 2. Evolución de la permeabilidad del concreto (Kt) en el transcurso del tiempo.

El comportamiento de los morteros de reparación frente al avance de la carbonatación se muestra en la Figura 3, los morteros que presentan mayor avance en la carbonatación son M2 y C2, mientras que los morteros M1, C1 y C3 los que muestran menor profundidad de carbonatación, estos resultados están directamente relacionados con la permeabilidad de cada mortero, a excepción del mortero C1 el cual puede que no presente carbonatación debido a su composición.

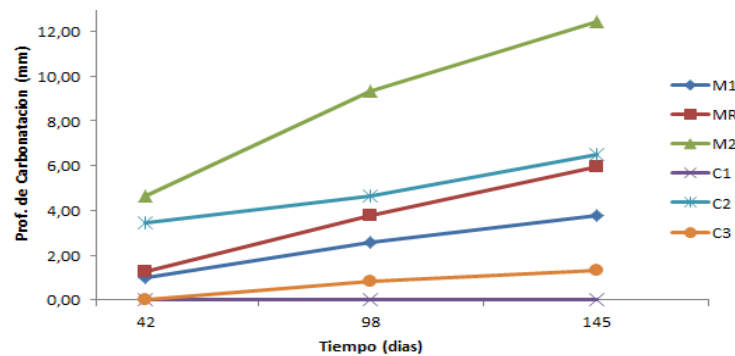


Figura 3. Profundidad de Carbonatación.

La profundidad de carbonatación nos da un indicativo del momento en que el CO₂ llega hasta el acero, esto ocurre cuando el recubrimiento que protege al acero ya ha sido carbonatado. En la Figura 4 se muestran los potenciales de corrosión (E_{corr}) con referencia al electrodo de Calomel.

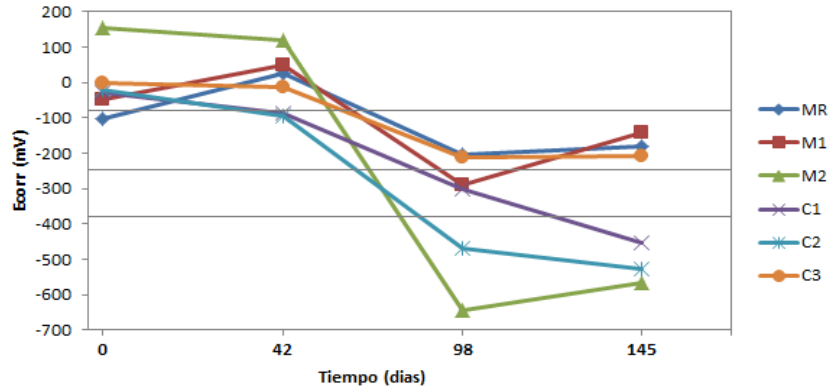


Figura 4. Evolución de Ecorr en el tiempo de exposición.

Los morteros M2, C1 y C2 muestran probabilidad alta de que se presente corrosión en el acero desde los 98 días, según lo especificado por la Tabla 5, de acuerdo a la norma ASTM C 867¹⁷. Los morteros que presentan menor probabilidad de corrosión son M1 y C3.

Tabla 5. Criterios para evaluar los potenciales de corrosión en el acero¹⁸.

Ecorr vs CuSO ₄ (mV)	Ecorr vs Calomel (mV)	Condición de corrosión
> - 200	> - 80	10% que se presente
- 200 a - 350	- 80 a - 230	Zona incierta
< - 350	< - 230	90% que se presente
< - 500	< - 380	Corrosión severa

La evolución del Icorr durante el proceso de carbonatación se muestra en la Figura 5. De aquí es posible decir que al inicio, los valores de Icorr a la primera edad muestran pasividad en el acero de refuerzo (menores a 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) en todos los morteros. Sin embargo, como indica el Ecorr, el acero dentro de los morteros M2, C1 y C2 se despasiva después de los 42 días.

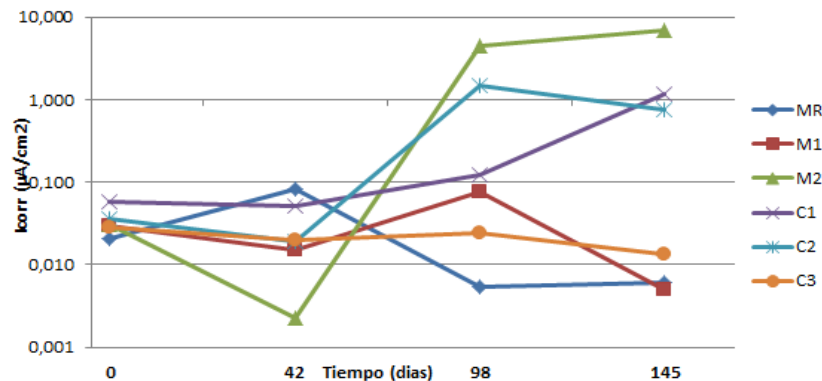


Figura 5. Velocidad de Corrosión (Icorr) en el acero de refuerzo para cada mortero de reparación.

El comportamiento de los morteros M2 y C2 se comprueba debido a su bajo comportamiento mecánico y la velocidad en que se ha carbonatado el recubrimiento del mortero. Mientras que el mortero C1 a pesar de tener excelentes propiedades mecánicas y es mínima la profundidad de carbonatación, por el hecho de ser muy permeable permite el ingreso de CO₂ hasta el acero, lo cual genera valores de corrosión altos.

CONCLUSIONES

Las pruebas de durabilidad llevadas a cabo, demuestran con mayor certeza la protección que da una reparación sobre la corrosión del acero de refuerzo. Estas pruebas sumadas a los ensayos de resistencia a compresión, flexión y adherencia nos dan la pauta para pensar que un mortero tradicional (cemento-arena con sustituciones minerales), puede comportarse como una reparación duradera.

En términos de desempeño y durabilidad los morteros que presentan el mejor comportamiento son M1 y C3. El mortero M1 con sustitución de CV de 20%, mejora el comportamiento de la referencia (MR) frente al ataque de CO₂, incluso mejor que algunos morteros comerciales.

Desde el punto de vista de la corrosión, no todos los morteros comerciales presentan buenas propiedades de durabilidad. Entonces en comparación con morteros tradicionales de buenas propiedades de durabilidad, no es necesario el uso de un mortero comercial de alto costo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por el apoyo económico a lo largo del proyecto, (Proyecto CONACYT Ciencia Básica No 155363). Al personal que nos dio acceso para la exposición de los especímenes en el ambiente Industrial.

REFERENCIAS

1. C. Andrade, "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras". Madrid, España, 1989.
2. M. Fernandez Cánovas, "Hormigón". Servicio de publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos", Madrid, 3ª edición, 1993.
3. M.H. Decter and C. Keeley, "Durable concrete repair-Importance of compatibility and low shrinkage" Const. Build. Mat. (11), 1997.
4. J.G. Cabrera and A.S. Al-Hasan, "Performance properties of concrete repair materials", Const. Build. Mat. 5, (11), 1997.
5. P. H. Emmons, A. M. Vaysburd and J. E. McDonald, "A rational approach to durable concrete repairs", Concr. Inter, 15, (9), 1993.
6. E. A. Kay, and J. Regan, "Acceptance and compliance testing of patch repair systems", Proceedings of the Second International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf; 1987.

7. K. W. J. Treadaway, "Testing the properties of materials for concrete repair- A review", Proceedings of the Second International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf; 1987.
8. ASTM C 109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" (Using 50 mm Cube Specimens), 1999.
9. ASTM C 348 "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars", 1997.
10. A. Momayez, M. R. Ehsani, A. A. Ramezaniyanpour and H. Rajaie, "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", Cem. Concr. Res. (35), 2005.
11. R. J. Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Materials and Structures 25(6) 1992.
12. B. Kucharczykova, P. Misak, and T. Vymazal, "The air permeability measurement by Torrent Permeability Tester", The 10th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques, (2010), Vilnius, Lithuania.
13. A. Nepomuceno y C. Andrade, "Steel protection capacity of polymeric based cement mortars against chloride and carbonation attacks studied using electrochemical polarization resistance", Cem. Concr. Compos. 29, 2006.
14. D. Bjegovic, V. Ukraincik, and Z. Beus, "Evaluation and Repair of Concrete Structure in Urban Environment: Case Study", SP 122-22, Paul Klieger Symposium.
15. J. Chaohua, C. Da, W. Yujuan and Z. Wei, "Study on the mechanisms and properties of repair mortar for hydraulic concrete surface", Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Nanjing, China 2008.
16. J.G. Cabrera and A.S. Al-Hasan, "Performance properties of concrete repair materials", Const. Build. Mat. 5, (11), 1997.
17. ASTM C 876 "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", 2009.
18. J. P. Broomfield, "Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair", Taylor and Francis, 2nd Edition, 2007.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ADHERENCIA ENTRE LA MATRIZ CEMENTANTE Y EL REFORZAMIENTO POR MEDIO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO.

J. A. Rodríguez¹ C.A. Juárez Alvarado² A. Durán Herrera.²

1. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, FIC-UANL

2. Docente Investigador de FIC-UANL, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

RESUMEN

El diseñar un Concreto Reforzado con Fibras (FRC), se debe de tener en cuenta características como la relación de aspecto (l/d), cantidad (v_f), orientación, propiedades de las fibras, la matriz cementante, tipo de fractura y la adherencia, esta última característica es de vital importancia debido a la unión de las fibras deben tener mayor área de contacto a la matriz cementante para que los esfuerzos se transfieran correctamente interface fibra / matriz y generar un concreto dúctil y tenaz. Si la adherencia es pobre, las fibras pueden extraerse de la matriz durante la carga, reduciendo así la resistencia mecánica del FRC, la Zona Interfase Transición (ITZ), es importante en términos de la durabilidad y resistencia, debido a la capacidad de servicio de la estructura, donde se puede predecir el ciclo de vida de la estructura, Las fibras polipropileno (PP), por su aspecto económico, durabilidad, resistencia en ambientes alcalinos y ácidos, han tenido buen desempeño con respecto de otras fibras, son hidrófobas, tienen la desventaja de una pobre adherencia interfaz fibra / matriz, debido a la nula interacción química, bajo módulo de elasticidad y anclaje mecánico. En la prueba individual de Pull Out se debe generar mayor resistencia mecánica. La solución a esta falta de resistencia es el adicionar materiales suplementarios minerales de bajo costo para dar mayor densificación a la ITZ, que genere mayor área de contacto y otros subproductos de hidratación CSH.

Palabras clave: Fibras Polipropileno, Ceniza Volante, Wollastonita Pull Out, ITZ

Designing a fibers reinforced concrete (FRC), must be taken into account features such as the aspect ratio (l/d), quantity (VF), orientation, properties of the fibers, the matrix, type of fracture and adherence, this last feature is of vital importance because of the union of the fibers should have greater contact area to the cementing matrix for which the efforts are transferred correctly fiber interface / matrix and generate a concrete ductile and tenacious. If the bond is poor, the fibers can be removed from the array during the load, thereby reducing the mechanical resistance of the FRC, the Interface Transition Zone (ITZ), it is important in terms of durability and resistance, due to the ability of service of the structure, where it is possible to predict the life cycle of the structure, the fiber polypropylene (PP), by its economic aspect, durability, resistance to acids and alkaline environments, have had good performance with respect to other fibers are hydrophobic, have the disadvantage of a poor adherence interface fiber / matrix, due to the null chemical interaction, low modulus of elasticity and mechanical anchorage. In the individual test Pull Out should generate higher mechanical resistance.

The solution to this lack of resistance is the addition supplementary materials minerals of low cost to give greater densification in the ITZ that generates a greater contact area and other by-products of hydration CSH.

Introducción

El desempeño estructural de un material compuesto reforzado con fibras, está fuertemente afectada por las propiedades de la interfaz de fibra / matriz. Sin embargo actualmente no existen métodos experimentales sencillos para determinar estas propiedades de la interfaz (ITZ). La ITZ es una constituyente que regula la resistencia del concreto, es una estructura compleja, donde se tiene cristales de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, silicato de calcio hidratado C-S-H y otros, debido a las dificultades para la realización de medidas en la deformación de las fibras cortas y delgadas así como aspectos geométricos. Sin embargo diferentes pruebas alternativas y técnicas experimentales, se han desarrollado en los últimos años para obtener más información sobre los mecanismos básicos que dominan las propiedades de la interfaz de fibra / matriz. Los parámetros de medición en las pruebas de mecánicas de la adherencia han dado a la existencia de varias pruebas como los son: Fragmentación, Pull Out, Micro unión y Microidentación. Estas han dado un sin número de características de ejemplos y correlaciones en la práctica a evaluar la interfaz. En forma muy particular evaluar la interfaz en la interacción fibra / matriz, es de un gran interés en la investigación, esta va depender de varias razones las cuales son: las pruebas micromecánica de la interfase; el fallo donde se hace el trabajo de adherencia; las fuerzas que actúan en el compuesto; el análisis teórico; el análisis experimental [1]. La interfase es la llave que determina un gran número de propiedades [2] [3], es un sistema heterogéneo dentro de los materiales compuestos como los es el Concreto Reforzado con Fibras (FRC), objeto de estudio de esta investigación. Una gran cantidad de investigaciones experimentales, se han realizado en la dedicación de la caracterización mecánica de la interfaz de fibra / matriz. Las pruebas de adherencia de los FRC han sido interpretadas por muchos investigadores; Una de las más populares es la prueba de Pull Out [4, 5], pero, que aún no ha sido estandarizada, esta consiste en el que una sola fibra en lo individual se extrae de la matriz circundante y la carga correspondiente frente relación desplazamiento, $P(\omega)$, se registra. Sin embargo, la resistencia P en la desunión y los procesos de Pull Out depende de las propiedades de enlace de la interfaz fibra / matriz y el área de adherencia interfacial, en función de la longitud de las fibras incrustadas y diámetro de la fibra, módulo de elasticidad de la fibra, composición química de la fibra [6]. Sin embargo, los datos aún son limitados se han presentado con fibras de diferentes composiciones, naturaleza y geometría. La mayor parte del trabajo de caracterización de la interfaz se ha relizado en acero, vidrio, fibras poliméricas [7, 8, 9, 10] y naturales [11, 12]. Hay cuatro factores principales que influyen en la adherencia entre interface fibra / la matriz: (i) la adhesión física y química, (ii) componente mecánico de la forma, rizadas, geometría y fibras de extremo en forma de gancho, (iii) -enclavamiento de la fibra, y (iv) la fricción. Peled y Bentur investigaron el comportamiento de extracción de fibras de polietileno recto y ondulado, donde encontraron que el aumento de la densidad mejora el anclaje mecánico y la resistencia equivalente de la unión y por lo tanto aumenta la adherencia [13]. Varios modelos han sido utilizados para la predicción y caracterización del comportamiento de Pull Out de

compuestos reforzados de fibra de cemento. Naamán propuso un modelo analítico para fibras o barras lisas con una relación de enlace con el esfuerzo de deslizamiento idealizada de la interfaz. La solución condujo a la predicción de la tensión-deslizamiento y donde graficando los datos dio como resultado una curva representativa la cual en su análisis se obtenía la adherencia al cortante por deslizamiento, en la adquisición de datos de entrada al modelo, se utiliza la carga de extracción de la fibra y la relación con el deslizamiento en la estimación de parámetros de los materiales compuestos [10]. Sueki modificó el modelo de Naamán para analizar los resultados de las pruebas de extracción y cuantificaron las propiedades de compuestos equivalentes el modelo es un enfoque discreto [14]. Banholzer propuso otro modelo analítico para simular la respuesta de extracción de fibra / matriz en la que se adopta un esfuerzo a tensión de adherencia lineal N-tramos frente relación de deslizamiento [6]. Todos estos modelos generalizan tres etapas durante la prueba y en la curva de cortante por deslizamiento (véase ilustración 1). Al principio, la curva muestra respuesta lineal, de la interface fibra / matriz, a cierto punto la curva que incrementa la carga, la respuesta se hace no lineal debido a la iniciación de la desunión, como la desunión se da a lo largo de la longitud de la fibra embebida (L_e), la rigidez de la matriz empieza a ceder y se observa que la carga no disminuye a lo largo de la curva que asciende escalarmente hasta alcanzar la carga máxima. En este punto donde se produce el cortante máximo por deslizamiento. La fibra sigue su extracción, todavía sigue en la región post-máxima hasta la longitud x , donde es se da totalmente la desunión, causando que la fibra empiece a deslizarse por fricción y dinámicamente hasta terminar su L_e .

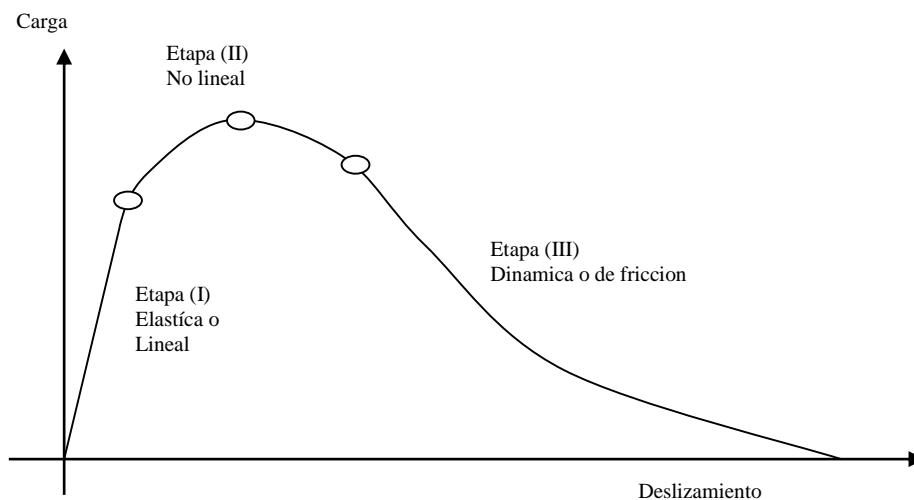


Ilustración 1. Etapas de la prueba de Pull Out en fibras individuales [4].

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{\pi A_{ef} L}$$

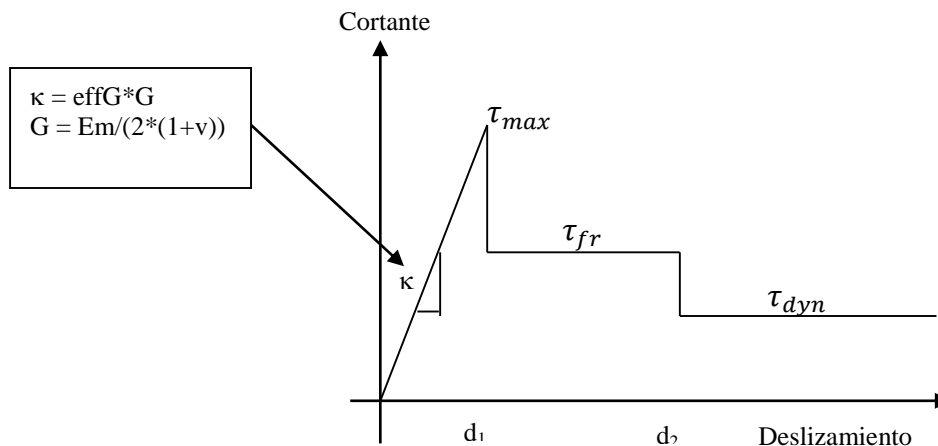


Ilustración 2. Etapas de Modelo de Pull Out cortante por deslizamiento [4].

En la presente investigación se realizaron 7 mezclas con diferentes proporcionamientos en adiciones minerales, para los especímenes de pruebas de fibra individual en las edades de 3 y 7 días con longitudes de embebidas (L_e) de 13 mm, 19mm y 25.40 mm, para las muestras se ensayaron después de 3 días de curado, con humedad relativa mayor al 90%. En la microestructura se caracterizó con análisis de la imagen de la fibra de polipropileno con el fin de calcular el área efectiva e investigar el efecto de adiciones minerales y longitudes de embebidas. Se utilizó el modelo no lineal de diferencias finitas desarrollado por Soranakom y Mobasher [15], para simular la respuesta de extracción de la fibra. El análisis numérico se compara con los experimentos y se muestra las modificaciones en el modelo, con el fin de adaptarse a la respuesta de la fibra.

Procedimiento experimental

Materiales y Procedimiento Experimental.

Las fibras de polipropileno utilizados en esta investigación fueron adquiridos de una fábrica de la región, la planta produce la fibra de polipropileno de monofilamento, se encuentra ubicada en la ciudad de Monterrey, estado de Nuevo León, México, las fibras de polipropileno, es un polímero derivado de los hidrocarburos, este pertenece a las poliolefinas, como ventaja tiene una alta resistencia contra los ataques químicos como los alcalis y ácidos, la fibra es de la que se denominan homopolímero obtenido de la polimerización del propileno puro, isostático el cual es de alta densidad, de similitud al polietileno con un peso específico entre 0.90gr/cm^3 a 0.92gr/cm^3 , con un punto de fusión 170°C , punto de ignición 590°C de color gris oscuro, esta tiene como ventaja que es hidrófugo de color gris oscuro de forma estriada, sus propiedades mecánicas consistieron en un módulo de elasticidad media y la resistencia a la tensión de 350 MPa y 80 MPa [16]. Como material cementante se utilizó CPO tipo I, conforme a la norma ASTM C 150 [17] producido de la región, con densidad de 3.06gr/cm^3 , con una finura de $399\text{ m}^2/\text{kg}$. Se utilizó como material suplementario mineral la Wollastonita (W), el uso de micro-fibra de refuerzo fue dirigido a aumentar la resistencia a la tensión

de la matriz y para ajustar la reología de la matriz, este es un mineral natural, es un silicato, según la clasificación de Strunz, de forma acicular de 15:1(longitud/diámetro), con densidad de 0.40 gr/cm³ (véase ilustración 3) [18, 19, 20]. También se usó Ceniza Volante (CV) de carbón bituminoso, conforme a lo descrito en ASTM C 618-12 de clasificación tipo F [21], la cual es producida en la planta carboeléctrica de Nava, Coahuila, con densidad 2.20 gr/cm³, que pasa la malla con abertura de 0.075mm. Como parte de las características a los materiales minerales suplementarios utilizados y del cemento, se les caracterizo por medio de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), en el laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería Civil de UANL en las siguientes tablas 1, 2 y 3 se muestra su composición analítica, también se observaron SEM-FIC-UANL de 10 kV (véase ilustración 4).

Compuest o Químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
%	21.30	4.773	3.7223	60.453	4.099	2.827	0.2964	0.455	0.246	0.095	0.077

Tabla 1. Compuestos analíticos del Cemento Tipo CPO.

Compuest o Químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SrO	MnO
%	48.616	0.748	0.9723	47.280	0.081	0.069	2.346	1.581	1.164	0.010	0.018

Tabla 2. Compuesto Químicos de Wollastonita.

Compuest o Químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	MnO
%	57.586	23.295	5.2653	4.707	0.965	0.528	2.346	1.581	1.164	0.039	0.018

Tabla 3. Compuesto Químicos de Ceniza Volante.

Todas las mezclas realizadas en la investigación tuvieron una relación agua/cementante de 0.40, usando el cemento Portland de composición química como se muestra en la tabla 4. También se utilizó dos subproductos minerales la ceniza volante y la wollastonita, como agregado fino se utilizó la arena sílicea que pasa la malla de abertura de 0.274mm, un superplastificante de policarboxilato en polvo. La matriz cementate se produjo usando un mezclador mecánico de banco de 5 litros de capacidad. Los materiales como la arena, wollastonita y ceniza volante se mezclaron en seco durante 5 minutos (para la homogeneización). Agua y superplastificante se añadieron lentamente en la mezcla y se mezcló durante 5 min. Los moldes se usaron niple de medida de 13mm x50mm para la fundición de especímenes un solo filamento (véase ilustración 5). Las bases de madera se utilizan para garantizar la precisión y orientación de la fibra de polipropileno en el eje centroide del molde, a través de un agujero perforado de dimensiones 0.39 mm en el centro de la placa base. La fibra de polipropileno se inserta a través del agujero. A continuación, la mezcla se vertió en el niple, seguido por compactación manual. Los especímenes fueron cubiertos en sus moldes durante 24 horas y para después de este tiempo se desmoldaran y ser curadas en agua.

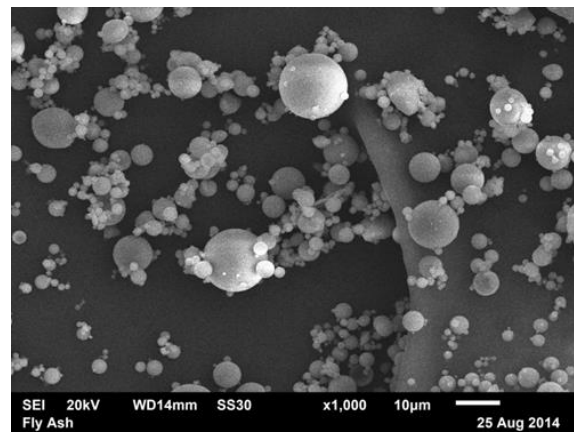
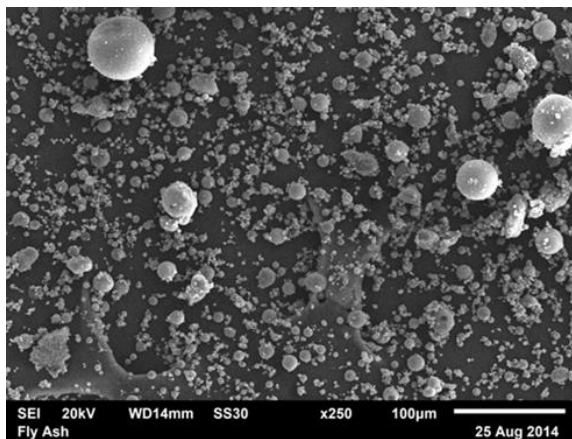
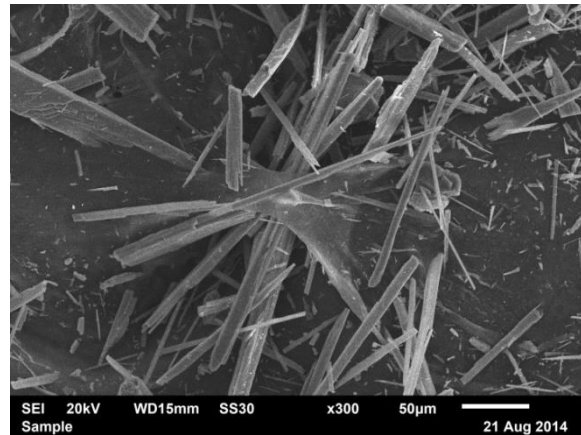
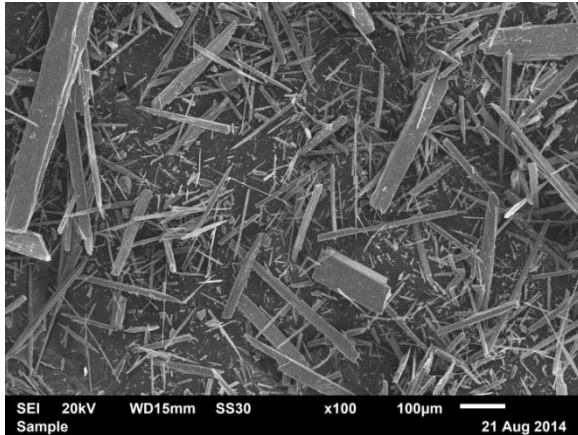


Ilustración 3. Imágenes de Wollastonita y Ceniza Volante respectivamente, SEM-FIC-UANL.

MEZCLA	TIPO DEL ESPÉCIMEN DE PASTA	EFEECTO
A	Longitud embebida (Le) = 25.4mm a/c=0.4, Pasta Cemento	Periodo de curado (3 días) Periodo de curado(7días)
B	Le =19.05mm a/c =0.4; Pasta Cemento; cemento - 15% W	Longitud Embebida Composición de la matriz
C	Le= 12.7mm a/c =0.4; Pasta Cemento	Longitud Embebida
D	Long. Embebida = 19.05 a/c =0.4; P. cemento - 15% CV	Periodo de curado (3 días) Periodo de curado(7días)
E	Long. Embebida = 25.4mm a/c =0.4; Mortero (c:s = 1:1)	Periodo de curado (3 días) Periodo de curado(7días)
F	Long. Embebida = 25.4mm a/c =0.4; P. Cemento - 15% W - 15 % CV	Composición de la matriz

G	Long. Embebida = 25.4mm a/c =0.4; P. Cemento - 15% W - 15 % CV + Arena Silica	Composición de la matriz
---	--	--------------------------

Tabla 4. Diseño y configuración de adiciones minerales suplementarias.

Pruebas de extracción de fibra individual

Se utilizó una maquina servo hidráulica MTS para las pruebas de extracción de fibras. La configuración de la prueba se muestra en la ilustración 6, un molde niple (diámetro de 13mm) donde se conecta a un 0,4448 kN (100 lb) de celdas de carga que se afianzan a la cruceta. La parte inferior consistía en un enganche de reducción en el que se sujeta el extremo libre de la fibra. La prueba se lleva a cabo bajo el control de desplazamiento de la cruceta a una velocidad constante de 0.1 mm / min. Se ensayaron después de 3 días de curado. Para investigar la influencia de la edad en la curación así como la longitud embebida y la composición de la matriz de la interface entre la fibra / matriz



Ilustración 4. Moldes de madera de sujeción de la fibra y niples de 13mm x 50mm donde se vierte la matriz cementante

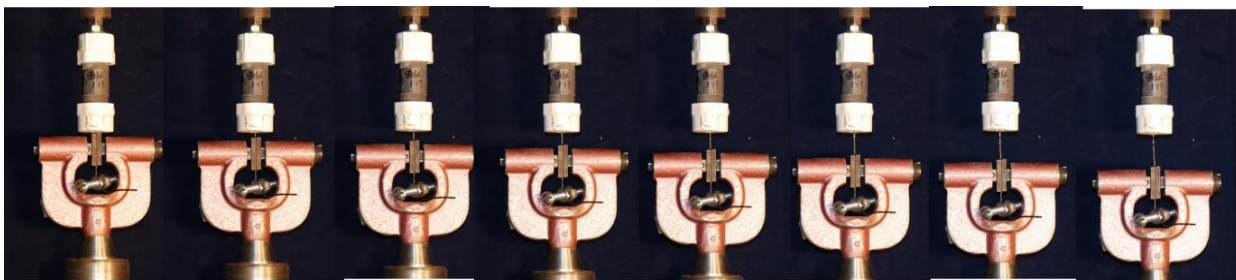


Ilustración 5. Imágenes de secuencia de prueba de Pull Out de la fibra en lo individual.

Microestructura

Microestructura de la fibra de polipropileno se investigó mediante un SEM-FIC-UANL, fue bajo la cámara bajo vacío para eliminar el alto restricción de vacío en el entorno de la muestra. El microscopio se hizo funcionar a 10 kV. Con pre-recubrimiento de oro, como se hace para el alto vacío estándar del SEM. La presión de la cámara de

muestras se ajustó a valores de entre 25 y 70 Pa. Con el fin de medir el área de la sección transversal de la fibra, se mantuvo para la medición futura y su caracterización de la morfología utilizando el SEM (véase ilustración 7).

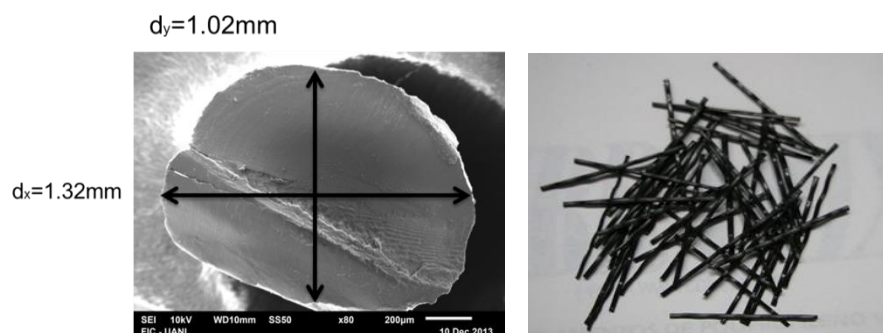


Ilustración 6. Imagen axial de la fibra de PP por SEM-FIC-UANL de 10kV, vista de producto de venta.

Resultados y discusión

Las fibras de polipropileno por su geometría irregular de sección transversal y su longitud estriada y ondulada (véase la ilustración 7). En la curva de esfuerzo-deslizamiento que se muestra en la ilustración 1, existen tres regiones distintas que son identificadas por números romanos. La región I corresponde a la elástica lineal con de incremento en la carga, la carga se aumenta más allá de la región lineal, se observa un grado de no linealidad y de este intervalo se designa la región II, que define el punto inicial de la fibra de desunión. La respuesta máxima se alcanza en la región II en condiciones de desunión parciales, donde la fuerza de extracción alcanza un valor máximo ($P_{\text{máx.}}$). El deslizamiento (s) de la fibra en este punto se define como el deslizamiento en el pico y puede ser considerado como la longitud crítica desligada. Para una condición de la matriz y la interfaz dada la fuerza de extracción máxima depende de la longitud embebida, el diámetro de la fibra y el período de curado. La resistencia al corte nominal calculado en $P_{\text{máx}}$ se define como la fuerza adherencia ($T_{\text{máx}}$). En la región III de la carga se reduce a un valor fijo y se mantiene constante a partir de entonces, el comportamiento en la región post-pico se rige por la resistencia al cortante de fricción de la interfaz fibra / matriz y continúa hasta que la fibra se despegada completamente de la interfaz. La resistencia al cortante en esta región se define como la fuerza resistente de fricción (T_{fric}). Los componentes adherencia y fricción fueron cuantificados en términos de resistencia $T_{\text{máx}}$ y T_{fric} , iguales, respectivamente, utilizando el modelo Soranakom y de Mobasher [14]. La correlación del modelo en el comportamiento de extracción de la fibra de polipropileno experimentalmente, se puede ver en las ilustraciones 7,8 y 9. El efecto del tiempo de curado de 3 a 7 días fue investigado con resultados presentados en la de las Mezcla A, donde la resistencia al cortante por deslizamiento fue un incremento del 10% más en el tiempo de 7 días, pero existen recomendaciones que su capacidad máxima a los 28 días como lo mencionan otros investigadores [6], sin embargo en un elemento pequeño como lo es el niple de 13mm de diámetro fue suficiente con 7 días, se decidió evaluar las otras mezclas a 7 días, la de menor resistencia de cortante por deslizamiento fue la Mezcla E, por lo que el efecto pared del agregado fino se genera en esta mezcla y por su disminución área de contacto de la interface fibra / matriz, la cual se cuantifica su

esfuerzo de cortante máximo de 0.47MPa con respecto la Mezcla A de 0.70MPa. La Mezcla G se sustituyó al mismo tiempo los dos materiales minerales suplementarios y la arena silica se obtuvo una resistencia por cortante de 0.65MPa, en la Mezcla F es mejor el acomodo de las partículas a lo largo de la longitud embebida de la fibra por la sustitución matriz cementante por Wollastonita y Ceniza Volante con un valor de 0.67MPa (véase ilustración 8). Las Pruebas de extracción se llevaron a cabo en longitudes embebidas de 13, 19, 25.40mm, después de 7 días de curado y los resultados. Se encontró que el aumento de la longitud embebida de las longitudes de 13.0 mm en la Mezcla C a 19.0mm aumentó el esfuerzo extracción máxima de 0.70MPa, sin embargo el aporte de wollastonita en la Mezcla B 0.62MPa, pero en su etapa no lineal y de fricción tuvo mayor aporte (véase ilustración 9).

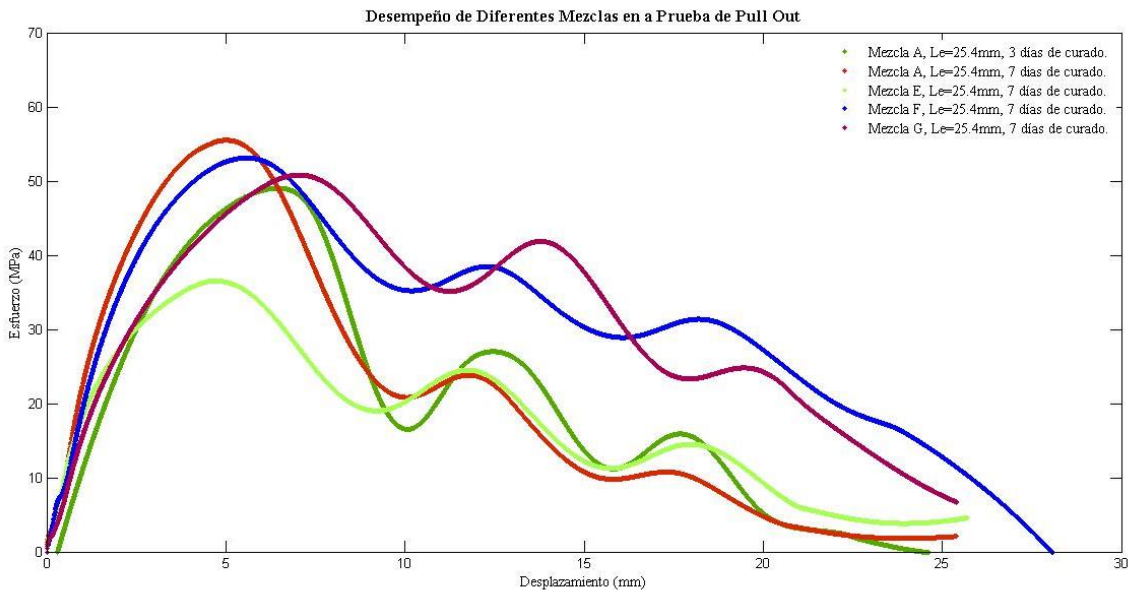


Ilustración 7. Desempeño de 4 mezclas diferentes con adiciones minerales y misma longitud embebida.

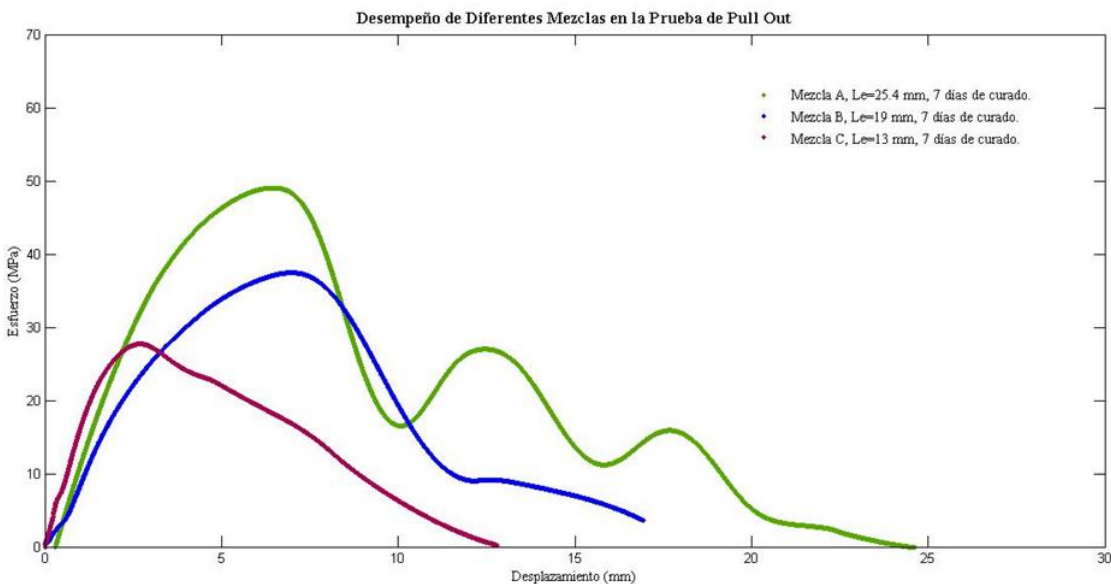


Ilustración 8. Desempeño de 3 mezclas con diferente longitud embebida y adiciones minerales.

Los dos materiales suplementarios minerales, tuvieron buen desempeño, pero la mejor fue la Ceniza volante en la Mezcla D a los 7 días de curado, con un esfuerzo 0.78MPa en cambio la Mezcla B de 0.63MPa es decir un 20% menos (véase la ilustración 10).

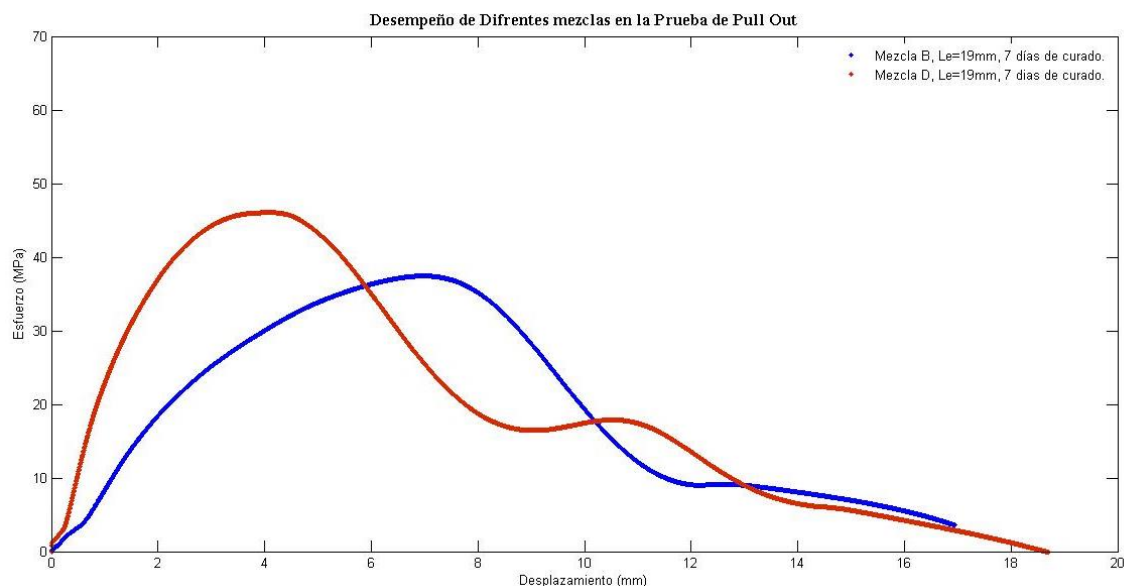


Ilustración 9. Dos mezclas adicionadas con Wollastonita y la segunda con Ceniza Volante en misma Le.

Conclusiones

Se llevó a cabo una investigación del comportamiento de extracción de la fibra de polipropileno en una matriz de cementante utilizando como variables la edad de curado, morfología de la fibra, y la longitud de embebida. Los resultados se evaluaron utilizando un modelo de diferencias finitas para determinar la relación constitutiva unión interfacial y para predecir la fibra de polipropileno, y reforzamiento a la tensión de material compuesto. Las siguientes conclusiones se pueden derivar: es evidente que las 7 mezclas realizadas con diferentes adiciones minerales, la Ceniza Volante aporta mayores beneficios que mejoran su desempeño en la prueba de Pull Out de la fibras de polipropileno, también durante el tiempo de curado y de longitud embebida, una de las ventajas más importantes que posee una con ceniza volante es la baja permeabilidad, esta puede modificar el tamaño de los poros y minimizar significativamente el efecto adverso que se produce en la zona de la transición, se optimiza el empaquetamiento de partículas de la matriz cementante, mejorando como consecuencia el enlace de la fibra y las propiedades mecánicas matriz cementante [22]. La resistencia de la unión de las fibras de polipropileno con la matriz utilizada (para una sustitución de volumen de wollastonita de 15%) dio como resultado un material compuesto con un comportamiento de resistencia menor con respecto a la ceniza volante. En la comparativa de las Mezcla B y la Mezcla D, se observa en la curva el aporte compuesto mineral de Sílice (SiO_2) de la Ceniza Volante que es amorfa y que generó una reacción puzolánica entre la portlandita de la reacción de hidratación del

cemento y apor to mayor densificación de la matriz más subproductos de hidratación CSH y mayor resistencia al cortante por deslizamiento, en cambio la Wollastonita no fue así, solamente fue de refuerzo de la microfibr a en la matriz cementante.

Referencias

- [1] S. Z. E. M. E. Pisanova, «How can adhesion be determined from micromechanical tests?,» *Composites*, vol. Part A 32, pp. 425-434, 2001.
- [2] E. M. Serge Zhandarov, «Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters,» *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 149-160, 2005.
- [3] P. C. Atzin, *High Performance Concrete*, London: E and FN Spon, 1998.
- [4] T. C. W. a. R. O. C. C6lene Di Francis, «The single-fibre pull-out test 1: Review and interpretation,» *Composites*, vol. A 27 A, pp. 597-612, 1996.
- [5] D. P. a. D. Tabor, «Interfacial Phenomena In Steel Fibre Reinforced Cement li: Pull-Out Behaviour Of Steel Wires,» *Cement and Concrete Research*, vol. 8, pp. 139-150, 1978.
- [6] W. B. W. J. B. Banholzer, «Analytical evaluation of pull-out tests—The inverse problem,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, pp. 564-571, 2006.
- [7] H. R. AE Naamán, «High performance fiber reinforced cement composites HPFRCC-4: International workshop Ann Arbor, Michigan, June 16–18, 2003,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 757-759, 2004.
- [8] A. E. Naaman, «High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification And Applications,» *CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan*, vol. 1, pp. 289-401, 2004.
- [9] R. G. Nemkumar Banthia, «Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 36, p. 1263–1267, 2006.
- [10] N. Banthia, «Fiber Reinforced Concrete,» *Cement and Concrete Science and Technology*, vol. 1, pp. 288-320, 1992.
- [11] B. M. R. D. T. F. Flávio de Andrade Silva, «Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 31, pp. 721-730, 2009.
- [12] P. V. A. D. César Juárez, «Natural fibers of lechuguilla as reinforcement in,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 19, pp. 83-92, 2004.
- [13] A. B. & D. Z. Y. A. Peled, «The Nature of Bonding Between Monofilament Polyethylene Yarns and Cement Matrices,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, pp. 319-327, 1998.
- [14] S. C. M. B. P. A. Sueki S, «A pullout–slip response of fabrics,» *Mater Civil Eng*, vol. 04, pp. 33-41, 2007.
- [15] C. S. B. M. M. a. A. P. S. Sueki, «Pullout-Slip Response of Fabrics Embedded in a Cement Paste Matrix,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 718-727, 2007.

- [16] Cofisa, «<http://fibramix.com/macrofibra-sintetica.htm>,» Cofisa, 30 agosto 2014. [En línea]. [Último acceso: 2014].
- [17] A. International, «Standard Specification for Portland Cement,» ASTM, United State, 2012.
- [18] NYCO, «Wollastonita,» NYCO, Hermosillo, Sonora, 2014.
- [19] J. J. B. Norman M. P. Low, «The Effect Of Wollastonite Micro-Fibre Aspect Ratio On Reinforcement Of Portland Cement-Based Binders,» *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*, vol. 23, pp. 1467-1479, 1993.
- [20] J. J. B. Norman M. P. Low, «The Flexural Toughness And Ductility Of Portland Cement-Based,» *Cement and Concrete Research*, vol. 24, pp. 250-258, 1994.
- [21] A. Interntional, «Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete,» ASTM, United States, 2012.
- [22] A. D. J. M. R. C. A. J. Pedro L. Valdez, «Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante,» *CIENCIA UANL*, vol. X, pp. 49-58, 2007.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A EDADES TARDÍAS EN ESPECÍMENES ELABORADOS CON CONCRETO RECICLADO, ADICIONADOS CON FIBRAS DESHIDRATADAS DE CACTUS OPUNTIA BLANCO.

A. Zalapa¹, W. Martínez, E. M. Alonso², C. Lara², H. L. Chávez², R. A. Figueroa¹, E. Contreras¹.

¹ Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, e-mail: arturo.zada@gmail.com

² Cuerpo Académico Consolidado CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, e-mail: wilfridomartinezmolina@gmail.com

Resumen

Este artículo muestra los resultados a edades tardías de la prueba de compresión simple que se llevó a cabo en especímenes cilíndricos de 10 x 20 centímetros, con un f'_c de diseño de 34.32 MPa (350 kg/cm²). Dichos especímenes se elaboraron sustituyendo los agregados pétreos gruesos y finos naturales (grava y arena) por agregados reciclados, los cuales se obtuvieron al triturar elementos de concreto que pertenecían a una de las torres del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicado en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se sustituyó en un cien por ciento la grava natural por agregado grueso reciclado, mientras que para el agregado fino se hizo una mezcla que contenía un cuarenta por ciento de agregado fino reciclado y un sesenta por ciento de agregado natural, a esta mezcla se le denominó CR. Adicionalmente se elaboró una mezcla con los mismos porcentajes de agregado reciclado, pero con una adición de fibras deshidratadas de Cactus Opuntia Blanco (CR+COB), este material se añadió en un porcentaje del 1.5% con respecto a la masa del cemento utilizada en la mezcla, la cual se proporcionó con el método del ACI. Los resultados muestran un mejor desempeño en los especímenes elaborados con la mezcla CR, además esta mezcla presentó una mejor trabajabilidad. Las resistencias alcanzadas a edades tardías fueron superiores a las de diseño.

Palabras clave: Concreto, reciclado, compresión, cactus.

INTRODUCCIÓN

El concreto como material de construcción presenta grandes ventajas, de acuerdo con Pierre-Claude¹ es un material que se elabora con materiales locales y puede desarrollar cualquier forma en la que se moldee. Además presenta alta resistencia a la compresión, no es flamable, no se pudre y no es atacado por insectos, aunque si por algunas bacterias. Sin embargo, el concreto es un material que no se degrada fácilmente, y en la mayoría de las ocasiones no se le trata de manera correcta después de haber cumplido su vida útil, lo que ocasiona contaminación al ambiente. Según datos de Cruz y Velázquez², en México se producen más de 20 millones de metros cúbicos de concreto, de los cuales no se recicla ni el 1%.

Al reciclar el concreto se busca que se disminuya la cantidad de escombro causado por la demolición de estructuras que hayan cumplido su vida útil, pero para que el uso de concreto reciclado sea viable desde el punto de vista económico como técnico, se debe analizar de manera amplia su desempeño físico y mecánico.

El nopal en México, más que una planta, es un referente de nuestra cultura. Esto lo podemos observar en las diferentes facetas en las se hace mención de esta planta como la gastronomía, en la cual, Granados y Castañeda³ señalan que el nopal representa un alimento que ha sido consumido desde la época prehispánica por las culturas del centro de México y los grupos chichimecas en el centro y el norte del país. Además también se consumía en algunas culturas del sureste como la mixteca y la zapoteca. Estas plantas también tiene un espacio muy especial en nuestra historia, Bravo⁴ señala que en la vida económica, social y religiosa de los nahuas, estas plantas desempeñaron un papel importante, a tal grado que el emblema de la Gran Tenochtitlán ostentaba airoosamente un nopal, símbolo que conserva el escudo de la bandera nacional del México actual.

Torres et al.⁵ señalan que en caso de aplicarse a una vivienda, el impermeabilizante hecho a base de nopal, protege a la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos. Sáenz y Berger⁶ señalan que desde hace muchos siglos se agrega jugo de nopal como adhesivo orgánico a la cal para restaurar y proteger edificios históricos en México.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La caracterización de los materiales utilizados se llevó a cabo mediante los procedimientos descritos en el las Normas Mexicanas vigentes (NMX) y en el Manual de Análisis de Materiales⁷ de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el cual está basado en dichas normas.

El concreto reciclado se obtuvo recolectando el material producto de la demolición de la torre del Hospital Regional No. 1 del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicado en la avenida Héroes de Nocupétaro de la ciudad de Morelia, Michoacán, Las piezas seleccionadas contaban con una dimensión de 10 a 15 centímetros en su lado más largo y presentaban formas irregulares (figura 1). Dichas piezas fueron reducidas de tamaño en una máquina trituradora tipo Denver de quijadas fijas para obtener el tamaño adecuado para utilizarse como agregado grueso y fino, en la mezcla del concreto.

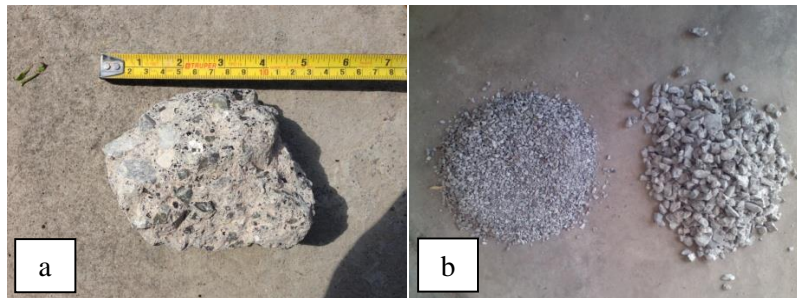


Figura 1a: Dimensiones de las muestras recolectadas. Figura 1b: Agregados resultados de la trituración del material.

Caracterización de los agregados

Las pruebas realizadas a los agregados finos y gruesos fueron: porcentaje de absorción, densidad, peso volumétrico seco suelto y seco varillado, granulometría, módulo de finura (arenas) y tamaño máximo (gravas). Dichas pruebas se llevaron a cabo en el agregado grueso reciclado, agregado fino reciclado, agregado fino natural y en mezclas de agregado fino reciclado y agregado fino natural. Estas mezclas se realizaron tomando como base la arena reciclada y añadiendo diferentes porcentajes de sustitución de arena natural, los porcentajes estuvieron en el rango del 10% al 80%. Se optó por hacer estas mezclas ya que la caracterización de la arena reciclada mostró deficiencias y se requirió hacer una mejora de las propiedades, lo cual se logró con la sustitución del 60% de arena reciclada por arena natural.

Elaboración de los especímenes

Se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, El proporcionamiento de la mezcla se diseñó con el método del ACI (American Concrete Institute), para un $f'c$ 34.32 MPa (350 kg/cm²) y un revenimiento de 10 centímetros. Se hicieron cilindros (CR), los cuales se probaron a compresión a 14, 28,

60, 90 y 607 días de edad, en dichos cilindros se sustituyó en su totalidad el uso de grava natural por grava producto de la demolición del escombro; en cuanto a la sustitución de la arena, se llevó a cabo una combinación de agregado natural y agregado reciclado, en porcentajes de 60% y 40% respectivamente, esto debido a que la arena reciclada no contaba con las características apropiadas para ser utilizada en su totalidad en la mezcla del concreto. Los porcentajes óptimos (60% y 40%) fueron seleccionados mediante las pruebas de caracterización antes mencionadas y la prueba de compresión axial en cilindros que se elaboraron antes de las mezclas finales para tomar la decisión de cuáles porcentajes utilizar, dichos especímenes tenían dimensiones de 10 x 20 centímetros y se probaron a edades de 7, 14 y 28 días.

Los cilindros (CR) se compararon con otros especímenes elaborados con las mismas cantidades de materiales, pero con la adición de fibras deshidratadas de Cactus Opuntia Blanco (CR-COB). Dicho material se añadió en un 1.5% con respecto a la masa del cemento utilizado en la mezcla, dicho porcentaje se consideró tomando como referencia estudios realizados por Díaz⁸ en concretos, a los que se les añadió dicho aditivo, cuyos resultados fueron favorables en la mejora de las propiedades de los especímenes elaborados por dicho autor. Debido a la baja manejabilidad de la mezcla, se optó por utilizar un aditivo fluidificante que ayudara a mejorar esta propiedad en las dos mezclas, de éste se adicionaron 10 gramos por cada kilogramo de cemento utilizado en la mezcla, el fluidificante utilizado era en polvo y fue de la marca Sika.



Figura 2. Prueba de resistencia a la compresión en cilindros de 10 x 20 cm.

RESULTADOS

Caracterización

El porcentaje de absorción del agregado grueso reciclado resultó de 9.71%, el cual es un porcentaje alto comparado con el rango de 0.2% a 4% que propone Kosmatka⁹ para agregados gruesos naturales, pero que concuerda con los valores de absorción de agregados reciclados que señala el mismo autor, los cuales varían del 3% al 10. La densidad del agregado de 2.31 g/cm³ es muy cercana a la que propone el mismo autor para agregados naturales: 2.4 g/cm³ - 2.9 g/cm³, lo que nos indica que en este rubro no existiría problema al utilizar este tipo de agregado. Para los resultados de la masa volumétrica seca suelta y seca varillada encontramos que los resultados de 1.17 g/cm³ y 1.26 g/cm³ respectivamente, son muy cercanos a los que según Kosmatka son para agregados naturales comúnmente usados en la elaboración de mezclas de concreto: de 1.2 g/cm³ a 1.75 g/cm³, por lo tanto la masa volumétrica de la mezcla no

se vería afectada por el uso del agregado reciclado. En lo que respecta a la granulometría, ésta cumplió con lo que especifica la norma para muestras con un tamaño máximo de 1/2". Estos resultados relativamente favorables fueron los que se consideraron para el uso de agregados gruesos reciclados como sustituto total de la grava natural.

En los agregados finos reciclados se encontró que la humedad de absorción es muy alta (18.27%) con respecto a la de la grava reciclada y a lo que señala la literatura para agregados finos naturales y reciclados, en contraste con la densidad (2.24 g/cm^3), la cual no dista mucho de la del agregado grueso y la que señala Kosmatka, la cual va desde 2.4 g/cm^3 a 2.9 g/cm^3 . Lo mismo ocurre con las masas volumétricas secas sueltas y varilladas (1.14 g/cm^3 y 1.30 g/cm^3 respectivamente). Se observó al analizar las sustituciones de agregado reciclado por natural que a medida que se disminuía el porcentaje de arena reciclada el módulo de finura también disminuyó, de igual forma el porcentaje de absorción disminuyó con el incremento del porcentaje de la arena natural. Mientras que la densidad aumentó con la disminución del agregado reciclado.

Tabla 1. Caracterización del agregado reciclado.

	Densidad (g/cm^3)	% de Absorción	M. V. S. V.	M. V. S. S.	T. M.	M. F.
Grava	2.31	9.7	1.17	1.26	1/2"	
Arena	2.29	6.12	1.45	1.34		2.85

Resistencia a la compresión simple

Se observó un mejor desempeño en los especímenes CR, ya que presentaron resultados más altos en la prueba de resistencia a la compresión simple en todas las edades con respecto a la mezcla CR-COB, la cual a la edad de 607 días no alcanzó la resistencia de diseño, manteniendo la misma resistencia que a los 90 días. Por otra parte, los especímenes de CR estuvieron 16.6 % por encima de la resistencia de proyecto.

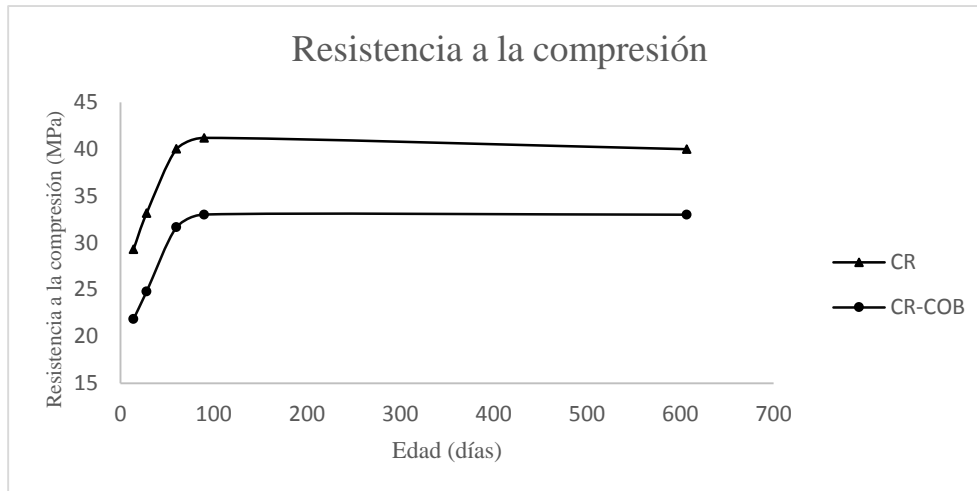


Figura 3. Prueba de compresión simple a cilindros de 10 x 20 cm a edades de 14, 28, 90 y 607 días.

CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas realizadas a los especímenes elaborados con las características mencionadas en este trabajo, muestran que el uso de concreto elaborado con agregados reciclados producto de la demolición es factible en cuanto a la característica de compresión simple, sin embargo, cabe mencionar que la trabajabilidad de la mezcla no fue la esperada. Por otra parte la mezcla a la que se le adicionó Cactus Opuntia Blanco no alcanzó la resistencia de diseño, aún a la edad de 607 días, por lo que se pretende bajar el porcentaje de adición en experimentaciones posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a todo el personal del laboratorio “Ingeniero Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por todo el apoyo brindado para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

1. Pierre-Claude A. (2008). Binders for Durable and Sustainable Concrete, Ed. Taylor & Francis, Ney York, E.U.A.
2. Cruz J., Velázquez R. (2004). Concreto reciclado, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
3. Granados D., Castañeda A. (2000). El nopal: historia, fisiología, genética e importancia frutícola, Ed. Trillas, tercera reimpresión, México, D. F.

4. Bravo H. (1978). Las Cactáceas de México vol. 1, Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición.
5. Torres A. A., Martínez W., Lomelí Ma. G., Pérez A. (2010), Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto, Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
6. Sáenz C. et al. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 162. Roma, Italia.
7. Espinoza, J. A.; Martínez, W & Navarro, L. M. (2001). Análisis de materiales, Resistencia de materiales (3ed). Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- 8.- Díaz N. (2011), Efecto del agregado grueso pétreo triturado en sollicitaciones mecánicas dinámicas y estáticas. Caso de concreto hidráulico simple adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.
- 9.- Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Tanesi J. (2004), Diseño y Control de Mezclas de Concreto (1ed). Portland Cement Association.
- 10.- Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal Caso Milpa Alta, censo agropecuario 2007, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- 11.- Casuccio M., Torrijos M., Giaccio G., Zerbino R. (2007). *Failure mechanism of recycled aggregate concrete*. Construction and Buildings Materials.
12. Corinaldesi V., Moriconi G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Constructions and Buildings Material.
13. Gambhir M. (2004). Concrete Technology, Ed. McGraw-Hill, tercera edición, New Delhi.
- 14.- Gómez-Soberón J. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study. Cement and Concrete Research 32, 1301–1311.
15. Levy S., Helene P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research 34 (2004) 1975 - 1980.
- 16.- NMX-C-083-ONNCCE-2002. Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba.
- 17.- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – Agregados – Masa Volumétrica – Método de prueba.

18.- NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de prueba.

19.- NMX-C-199-ONNCCE-2010. Industria de la construcción – Aditivos para concreto – Terminología y clasificación en concreto hidráulico y mortero.

CONCRETO CON ADICIONES PARA SOPORTAR SOLICITACIONES DE DURABILIDAD EN INFRAESTRUCTURA

J.A. Guzman¹, E.M. Alonso², W. Martínez², A. A. Torres³

1. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040; 2. Cuerpo Académico Consolidado-147, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040; 3. Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, Sanfandila, Querétaro, México, 76703

RESUMEN

La investigación está dirigida a usos de materiales locales, adiciones, durabilidad, nuevos cementos. Este trabajo versa sobre la caracterización de un concreto con una Relación Agua/Cemento de 0.35 con un fluidificante que permita mejorar la Trabajabilidad y un Polímero orgánico que permita mejorar la respuesta de la estructura interna del concreto ante esfuerzos mecánicos, y dinámicos, y al mismo tiempo se logre un mejor desempeño en solicitaciones de durabilidad y efectos de expansión y contracción, así mismo tener un concreto de alto desempeño y que su costo-beneficio sea considerable. Se tienen 3 mezclas caracterizadas en total: a) grupo Control; b) fluidificante; c) polímero + fluidificante. Se diseñaron las mezclas con el criterio de diseño del ACI y la elaboración de los especímenes fue según la ASTM.

Palabras Clave: Concreto, Durabilidad, Adiciones, fluidificante, Trabajabilidad

ABSTRACT

The research is aimed at use of local materials, additions, durability, new cements. This paper deals with the characterization of a concrete with a water / cement ratio of 0.35 with a fluidizing that will improve the workability and an organic polymer that improves the response of the internal structure of concrete with mechanical influences, and dynamic, and at the same time to achieve a better performance in durability and impact stresses of expansion and contraction, also have a high performance concrete and its cost-benefit is considerable. They have 3 total mixtures characterized: a) Control group; b) plasticizer; c) polymer + plasticizer. Mixtures were designed with the design criteria of ACI and processing of specimens was ASTM.

Keywords: Concrete, Durability, Additions, fluidizing, Workability

INTRODUCCIÓN

Se tiene la problemática de una infraestructura existente que parece que llegó al estado límite de servicio por cause de daños medioambientales; su diseño fue para 50 años promedio, y los costos de mantenimiento que se tiene para la infraestructura, que por lo general son algo elevados, sin mencionar que el mantenimiento de estas no siempre es el adecuado y no se implementa de forma correcta, por las políticas a que se encuentran sujetos los organismos encargados de este suministro. Aunado a esto, el problema de contaminación que se tiene debido a las exageradas emisiones de dióxido de carbono por la producción de cemento, por emisiones de fuentes móviles (vehículos automotores), calefacción, industria. A toda esta problemática se ve la necesidad de implementar un concreto resistente, durable y sobre todo amigable con el medio ambiente que soporte solicitaciones de congelamiento y humedad, estudiando el “MR” que es un valor intrínseco en el diseño de pavimentos rígidos. Este trabajo de investigación está dirigido para las personas que se encuentran en el ámbito de la construcción, y que se interesen por métodos novedosos, naturales y económicos para poder encontrar una mejor resistencia y durabilidad para cualquier tipo de obra civil que se construya. Desde la antigüedad el hombre ha tenido la necesidad de construir cualquier tipo de obra civil para llevar una forma de vida más cómoda y ágil, esta necesidad de construir los ha llevado a tratar de encontrar aditivos para el concreto, aditivos que le den algún tipo de beneficio al concreto como puede ser mayor resistencia a la compresión, mayor resistencia a la tensión, al módulo de ruptura, etc.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales pétreos finos y gruesos fueron muestreados por los autores en época de estiaje. Se transportaron al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, donde se secaron, se cuartearon y se caracterizaron macroscópicamente. Todas las pruebas normadas realizadas se hicieron por quintuplicado, los valores indicados son el promedio de 5 pruebas, y no existieron variaciones mayores al 10%, en ningún caso. La experimentación se llevó a cabo en 2 diferentes fases, la primera consistió en caracterizar los agregados gruesos y finos. El cemento que se utilizó para realizar esta investigación fue un cemento CPC 40 R, que según la normativa NMX-C-414-ONNCCE¹, es un cemento portland compuesto de 40 MPa de resistencia al esfuerzo de compresión simple. La siguiente fase consistió en caracterizar el material una vez realizada la mezcla en estado fresco y en estado endurecido, para esto, el diseño de mezclas se realizó con el método de dosificación del American Concrete Institute (ACI)². El método del ACI es un método de diseño de mezclas de concreto normal que se basa en las propiedades físicas de los materiales como lo son: la Densidad, Masa Volumétrica Seca y Suelta, Mas Volumétrica Seca y Varillada, % de Absorción, % de Humedad Actual, Módulo de finura, y Tamaño Máximo del agregado, estas propiedades las usa para obtener la cantidad necesaria del concreto por unidad de volumen para un concreto de peso normal. Este procedimiento tiene en consideración los requisitos para la facilidad de colocación, la coherencia, fuerza y durabilidad. El cálculo de las cantidades de material se realizó para cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura respetando la relación ancho-espesor 1:2, con una mezcla sin aire incluido. El concreto se diseñó para un $f'c$ de 350 kg/cm², pero el Artículo 308 del Reglamento de

Construcciones para el Estado de Michoacán sugiere que el valor de la desviación estándar en condiciones normales debe ser del orden de 35 kgf/cm² para lograr que sólo el 5% de los valores de los especímenes probados diera por debajo del valor del f'c, por lo que el valor de diseño de la mezcla de concreto calculado fue fcr = 400 kgf/cm², para tener un revenimiento o trabajabilidad de 3.1 pulgadas/8 cm. Además también se elaboraron especímenes prismáticos de un área de 15 cm x 15 cm y con una longitud de 60 cm, con un revenimiento de proyecto de 3.1 pulgadas/8 cm y un f'c de proyecto de 350 kgf/cm². Se manejan 3 mezclas de concreto, la primera con una relación agua/cemento de 0.42 la cual se denomina grupo control y la segunda relación agua/cemento es de 0.35 para la mezcla 2 y 3, las cuales constan de un concreto con un fluidificante y con un concreto con fluidificante y polímero orgánico natural respectivamente. La adición del polímero fue agregada después de realizar la mezcla para evitar una posible absorción de agua y se viera modificada la mezcla, y la adición del fluidificante fue llevada a cabo directamente sobre el solvente antes de interactuar con la mezcla. Con la mezcla elaborada se procedió a la elaboración de especímenes de concreto de moldes cilíndricos y prismáticos, los moldes fueron recubiertos con una delgada capa de aceite para evitar adherencias con los especímenes en el momento de descimbrarlos una vez que se encontraran endurecidos. Los especímenes cilíndricos se probaron a 40, 60, 90, 120 días a partir de la fecha de elaboración, y los especímenes prismáticos se probaron a 60, 90, 140 y 180 días a partir de la fecha de elaboración. Finalizadas las pruebas no destructivas, se procedió a realizar las pruebas destructivas.

RESULTADOS

Los resultados de las pruebas no destructivas como lo son velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y frecuencias de resonancia se muestran en las figuras 1, 2 y 3 respectivamente. Los resultados de la resistencia a la compresión simple, de la resistencia a la tensión indirecta y de la resistencia a la flexión se muestran en las Figuras 4, 5 y 6 respectivamente.

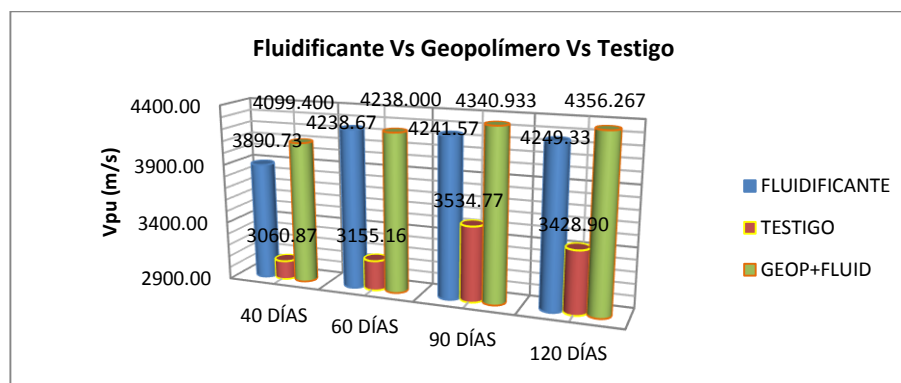


Figura. 1. Velocidad de Pulso Ultrasónico

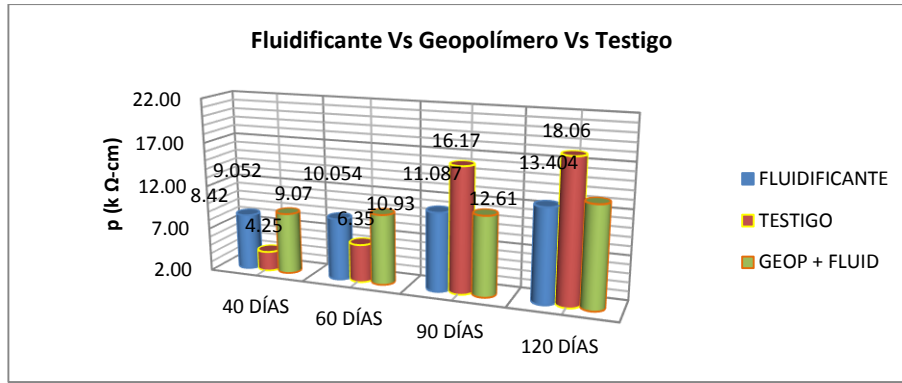


Figura. 2. Resistividad Eléctrica

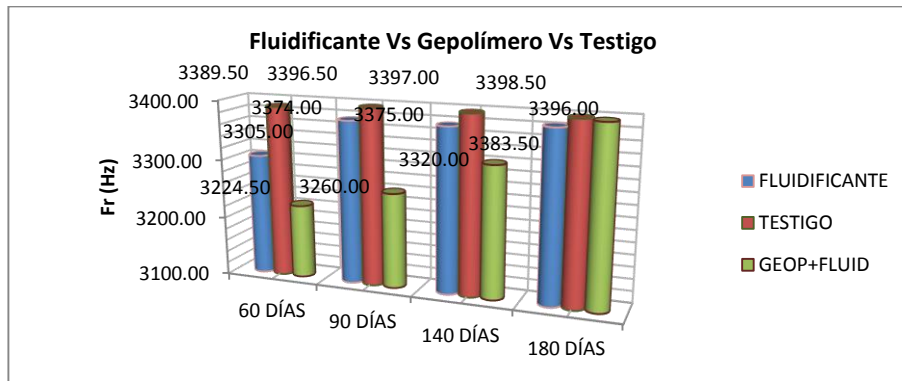


Fig. 3. Frecuencias de resonancia

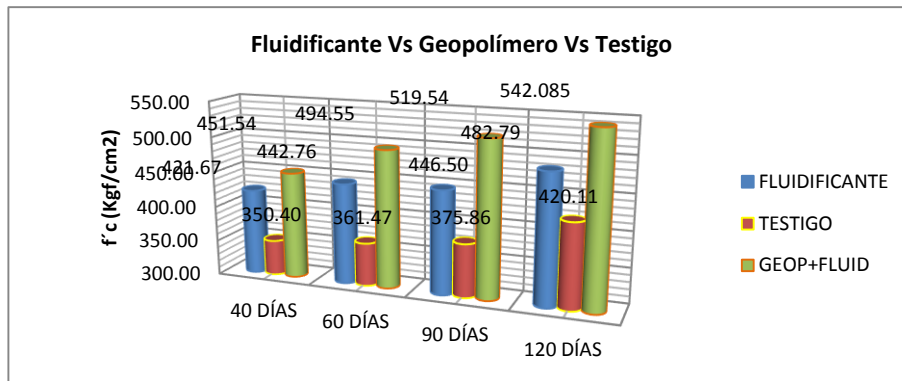


Fig. 4. Resistencia al esfuerzo de Compresión Simple

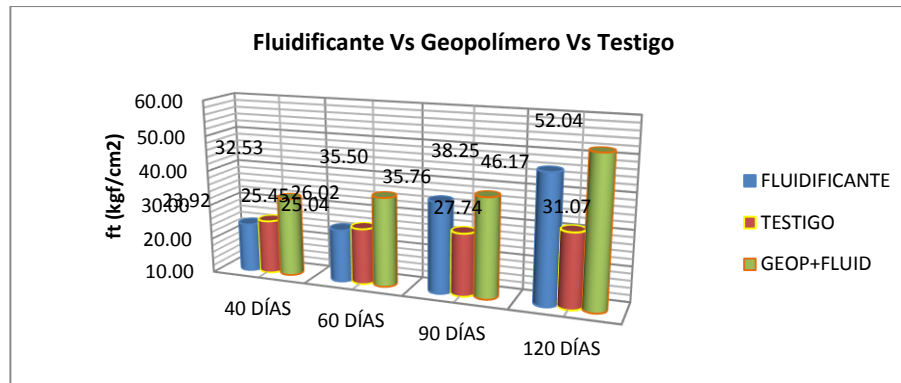


Fig. 5. Resistencia a la Tensión Indirecta

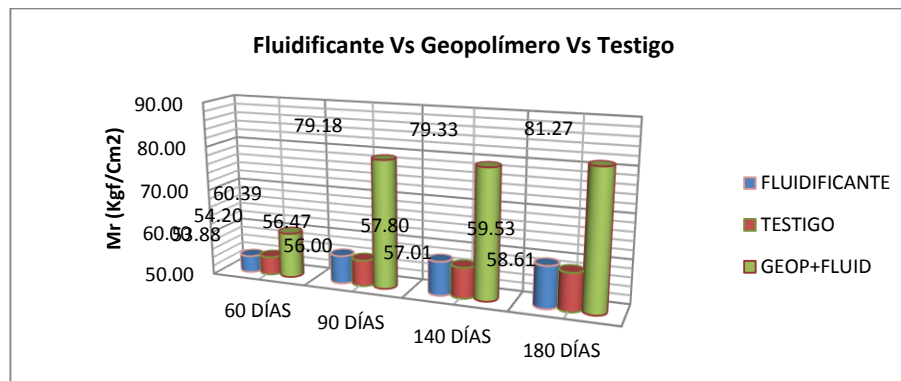


Fig. 6. Resistencia a la Flexión

Para poder determinar la profundidad de carbonatación en los especímenes realizados hubo la necesidad de colocar los especímenes sobre un lugar en donde estuvieran directamente expuestos al intemperismo, en donde los vientos dominantes golpearan al elemento sobre una de sus caras para poder comprobar su influencia en la degradación del concreto¹³.

CONCLUSIONES

Las tres mezclas tuvieron un comportamiento adecuado debido a que la relación agua/cemento que se manejó pues era relativamente baja en comparación con un concreto convencional, pero dentro de sus buenas características, también hay diferencias entre ellos, esas diferencias son las que marcan un comportamiento adecuado y óptimo en un concreto con criterios de alta durabilidad. Se observó que la mezcla con polímero + el fluidificante se comportó de manera adecuada ya que el contenido de fluidez fue adecuado para poder cumplir con el revenimiento de proyecto que se tenía en el diseño de mezclas, la mezcla del grupo control (mezcla que no contenía ningún tipo de aditivo) tuvo un buen contenido de fluidez debido a que la cantidad de agua era mayor y esto disminuía los criterios de durabilidad de la mezcla, la mezcla que solo contenía fluidificante era trabajable y eso es bueno porque se respeta la relación agua cemento de 0.35, una vez elaborados los especímenes, y después de

24 horas se procedió a realizar el descimbrado y el curado de los especímenes, el cual se llevó a cabo por inmersión durante todo el tiempo. La primer prueba que se realizó fue la de resistividad¹⁴, debido a que los especímenes deben estar saturados para poder realizar la prueba ya que esta prueba está en función del grado de saturación de los poros del concreto, en esta prueba se observó que el mejor comportamiento lo obtuvo el grupo control, por encima de la mezcla 2 en un 30.17 % y por encima de la mezcla 3 en un 25.80% a la edad de 120 días, en realidad estos valores no son muy diferentes, sin embargo se puede justificar esa diferencia debido a que las mezclas 2 y 3 tenían una relación a/c de 0.35, lo cual las hace menos trabajables, y aunque se haya utilizado un aditivo fluidificante en ambas mezclas, el proceso de elaboración, el cual se realizó a mano no aprovecha al 100% las características del fluidificante, ya que la energía cinética que se crea es menor contra una mezcla que se elabora en una revolvedora.

La prueba de Velocidad nos dio un panorama más amplio sobre la calidad del concreto ya que las mezclas 2 y 3 presentaron los valores más altos, pero en especial la mezcla 3 presento el resultado más alto a los 120 días de prueba, por encima de la mezcla 1 con un 21.28% y encima de la mezcla 2 con un 2.45% respectivamente lo cual nos indica que la calidad del concreto cuando se tiene una relación de agua/cemento baja es muy superior a una relación agua cemento alta. Obteniéndose un criterio de calidad del concreto para la mezcla 1 de "Alta", para la mezcla No. 2 un criterio de calidad "Durable", para la mezcla No. 3 un criterio de calidad "Durable", la calidad de los concretos proporcionada es una calidad cualitativa ya que depende de varios factores. La "Frecuencias de Resonancia" más alta la obtuvo la mezcla No. 1 con un valor de 3398.5 Hertz, seguido de la mezcla No.3 con un valor obtenido de 3396 Hertz y la mezcla No. 2 con un valor obtenido de 3383.5 Hertz, como se puede observar la diferencia entre ellas es mínima ya que la mezcla No.1 es superior a la mezcla No 3 en un 0.07%, y en un 0.44% a la mezcla No. 2, esto nos da una idea de que sin importar la relación agua cemento las frecuencias de resonancia en el concreto son muy similares, ya que no pinta ningún aditivo para esta prueba, lo que indica que es el tipo de agregado pétreo utilizado en la mezcla el que se ve intrínseco de manera directa en las frecuencias de resonancia, es decir la manera en que se propagan las ondas oscilatorias en el concreto está en función de las características del agregado pétreo, como lo son la densidad y la morfología. Debido a que las 3 mezclas llevan el mismo agregado pétreo el resultado es muy similar entre ellas, las diferencias que se observaron a las diferentes fechas fueron porque los aditivos implementados en las mezclas 2 y 3 tardaron más tiempo en estabilizar químicamente la matriz cementicia. En las pruebas de resistencia a compresión simple¹⁸, se pudieron observar que los especímenes que contenían el fluidificante fueron superiores en un 14.92% a los especímenes del grupo control en un periodo de prueba de 120 días, es decir los que se realizaron de manera convencional, esta es una cifra realmente considerable ya que los especímenes que tienen fluidificante pueden tener más resistencia al esfuerzo de compresión que un concreto convencional con una cantidad de agua superior. Los especímenes que tiene el polímero + fluidificante fueron los que mejores resultados tuvieron, sus valores fueron muy notables y superiores ante los demás especímenes, es decir se habla de una resistencia al esfuerzo de compresión mayor en un 29.03% vs los especímenes del grupo control es decir se eleva el f_c casi una tercera parte en un periodo de 120 días, comparada con la mezcla que solo tiene fluidificante también hay

cierto porcentaje arriba ya que la mezcla del polímero + fluidificante es superior en un 12.28% a una edad de prueba de 120 días, como se puede observar el $f'c$ del concreto se incrementa con el polímero orgánico natural y el fluidificante, además de que en esta mezcla el comportamiento es más homogéneo. Al realizar la prueba de compresión simple se pudo observar que existen ciertos comportamientos en el concreto cuando no se realiza un buen proceso de cabeceado, o cuando no se tiene un buen aditamento para poder proporcionar una superficie uniforme y aplicar la carga, por lo tanto se hizo un análisis el cual se tratara en breve.

La prueba de resistencia a la tensión indirecta¹⁹ en el concreto es una prueba que ayuda determinar el comportamiento mecánico del concreto de una muestra sujeta a esfuerzos de tensión, se conoce que el concreto por naturaleza es una roca artificial y su comportamiento es muy rígido por lo que los esfuerzos de tensión que se presentan en el concreto por lo general son despreciables, en esta investigación se obtuvieron los siguientes resultados. La mezcla del grupo control fue la mezcla que más homogeneidad presento en los resultados, ya que los resultados obtenidos no variaban mucho según se incrementaba el tiempo transcurrido, obteniéndose 25.45 kg/cm² a los 40 días de prueba y 31.07 kg/cm² a los 120 días de prueba, como se puede ver el incremento de resistencia a este esfuerzo es poco, además de que a la edad de 40 días el porcentaje de f_t que hay en relación con el $f'c$ es de un 6.05% y la relación que hay con el $f'c$ de diseño es de 7.27%, a los 120 días es de 8.71% en relación con el $f'c$, y de 7.43% con el $f'c$ de diseño, en la mezcla que solo contenía el fluidificante para mejorar las condiciones de trabajabilidad de la mezcla se obtuvo que a los 40 días de prueba el valor del f_t era de 23.92 kg/cm² teniéndose un 5.65 % de relación con el esfuerzo de compresión obtenido a esa fecha y un 10.21% con el $f'c$ de diseño de la mezcla, y a los 120 días de prueba teniéndose 46.17 kg/cm² es decir un 9.56% en relación al esfuerzo de compresión obtenido para esa fecha con ese tipo de muestras y un 13.19% con el $f'c$ de diseño, como se puede ver el esfuerzo de tensión se incrementó al paso del tiempo y supero a la mezcla control a la edad de 120 días ya que a la edad de 40 días los resultados eran similares y parecía que no habría alguna mejoría. Finalmente en la mezcla que contenía el polímero y estaba adicionado con fluidificante para mejorar las características maleables de la mezcla se obtuvo que a los 40 días se tenía una resistencia de 32.53 kg/cm² de resistencia a la tensión indirecta y teniéndose un 7.204% de relación con el esfuerzo de compresión($f'c$) a esa fecha y un 10.92% con el $f'c$ de diseño, obteniéndose una resistencia a la tensión a la edad de 120 días de prueba de 52.043kg/cm² y un 9.6% en relación con el $f'c$ para esa fecha de prueba y un 14.86% con el $f'c$ de diseño. En esta prueba se obtuvo que la mezcla con el polímero + el fluidificante fue la que mostró un mejor desempeño obteniendo un 14.86% del $f'c$ de diseño, porcentaje que es un buen factor para no presentar fallas sumamente frágiles. Se puede observar que desde la primera fecha de prueba la resistencia a la tensión fue más alta esto puede ser porque el polímero actuó en la mezcla dando un poco de ductilidad al concreto, ductilidad que generalmente es proporcionada por el acero. En la prueba de Carbonatación²¹, los resultados fueron satisfactorios, ya que ninguna de las muestras mostraba valores de carbonatación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y el soporte técnico del personal del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

REFERENCIAS

- [1] NMX-C-414-2006-ONNCCE. Industria de la construcción - cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba.
- [2] Reglamento ACI 318S y Comentarios, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05) (Versión en español y en sistema métrico), american concrete institute P.O. BOX 9094 FARMINGTON HILLS, MICHIGAN 48333-9094 USA, ISBN 0-087031-083-6.
- [3] NMX-C-030-ONNCCE-2004 Industria de la construcción–Agregados–Muestreo
- [4] NMX–C–170–1997–ONNCCE Industria de la construcción–Agregados–Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.
- [5] NMX–C–166–ONNCCE–2006. Industria de la construcción–Agregados–Contenido de agua por secado–Método de prueba
- [6] NMX–C–165–ONNCCE-2004 Industria de la construcción–Agregados–Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – Método de prueba
- [7] NMX-C-077-ONNCCE-1997 Industria de la construcción–Agregados para concreto–Análisis granulométrico–Método de prueba
- [8] NMX–C–073–ONNCCE–2004 Industria de la construcción–Agregados–Masa volumétrica – Método de prueba
- [9] ASTM C-40-99 Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto
- [10] NMX-C-416-ONNCCE Industria de la construcción–Muestreo estructuras terreas y métodos de prueba
- [11] ASTM C-127-01 Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa y la absorción de los agregados gruesos
- [12] Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa y la absorción de los agregados finos
- [13] Torres Acosta, A., Martínez Madrid, M., 2001 Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, instituto Mexicano del transporte, publicación técnica No.181
- [14] ASTM G-57-84': Standard Method for Field "Measurement of Soil Resistivity using the Wenner four-electrode Method
- [15] ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [16] San juan barbudo, Miguel Ángel, castro Borges, Pedro 2001, Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto IMCYC
- [17] ASTM C215 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens
- [18] NMX-C-083-ONNCCE-2002 Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba

- [19] ASTM C 496-96 Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Tracción indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto
- [20] NMX-C-191-ONNCCE-2004 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
- [21] DURAR, Red Temática XV.B Durabilidad de la armadura, manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón Armado CYTED, 2ª Edición ISBN 980-296-541-3 pp, 101-106

COMPORTAMIENTO FÍSICO MECÁNICO DE CONCRETO HIDRÁULICO CON SUSTITUCIONES DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA Y ESCORIA DE ALTO HORNO.

M. A. Villicaña Cupa¹, E. M. Alonso Guzmán², W. Martínez Molina², H. L. Chávez García², Cindy Lara Gómez², J. T. Pérez Quiroz², C. Bernabé Reyes².

1. Posgrado de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, Morelia, Michoacán, México 58040;
2. Cuerpo Académico Consolidado CAC-UMSNH-147, Departamento y Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040.

RESUMEN

Para mejorar propiedades mecánicas del concreto fabricado con cemento Portland, es necesario implementar la utilización de materiales suplementarios como materiales puzolánicos de origen natural como procesados artificialmente. La utilización de residuos de origen orgánico ricos en sílice y alúmina, en la producción de concreto trae beneficios para el medio ambiente. El presente trabajo tiene por objetivo comparar tres diferentes mezclas de concreto, una mezcla testigo, una mezcla con sustitución de Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) y una mezcla con sustitución de Escoria de Alto Horno (EAH), analizando sus propiedades mecánicas, para determinar que mezcla se comporta adecuadamente ante las sollicitaciones. Los porcentajes de sustitución fueron: 20% de CBC con respecto al peso del cemento y de 100% de EAH con respecto al agregado fino, para cumplir edades de, 28 y 60 días. El cemento utilizado fue CPC 30R con relación $A/C < 0.4$.

Palabras clave: Concreto, propiedades mecánicas, Ceniza de Bagazo de Caña (CBC), Escoria de Alto Horno (EAH).

ABSTRACT

To improve mechanical properties of the concrete made with cement Portland, it is necessary to implement the utilization of supplementary materials as pozzolanic materials of origin natural as tried artificially. The utilization of rich residues of organic origin in silica and alumina, in the production of concrete it brings benefits for the environment. The present work has for aim compare three different mixings of concrete, a control mixing, a mixing with substitution of Ash of Bagasse of Cane (CBC) and a mixing with substitution of Slag of High Oven (EAH), analyzing his mechanical properties. The percentages of substitution were: 20 % of CBC with regard to the weight of the cement and of 100 % of EAH with regard to the sand, to fulfill ages of, 28 and 60 days. The used cement was CPC 30R with relation $A/C < 0.4$.

Keywords: Concrete, mechanical properties, Ash of bagasse of cane (CBC), Slag of High Oven (EAH).

INTRODUCCIÓN

El concreto es el producto resultante de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento) arena, grava y agua, que al fraguar y endurecer adquiere una resistencia. El concreto puede sufrir daños debido a agentes agresivos que están presentes en el medio ambiente, por lo que puede tener problemas de durabilidad, que implicarán recursos destinados a mantenimiento y reparación.

En las últimas décadas se ha dado mucha importancia a la durabilidad del concreto, ya que el comportamiento que han presentado las estructuras diseñadas bajo los criterios de resistencia no han sido los adecuados y por lo tanto disminuir costos de reparaciones y conservación. Se ha comprobado que para lograr que una estructura de concreto reforzado cubra su vida útil en condiciones óptimas de servicio, es indispensable considerar, además de un buen diseño por resistencia, un diseño por durabilidad. Existen varios mecanismos que disminuyen la durabilidad del concreto, y con ello disminuye la vida útil de una estructura, como son las reacciones álcali-sílice, reacciones álcali-carbonato y ataques por sulfatos.

Una manera de prevenir la acción de estos mecanismos en el concreto, es la utilización de puzolanas como aditivos en el concreto. Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto mejoran sus características físico-mecánicas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El programa experimental contempla las siguientes actividades:

1. Obtención de las puzolanas artificiales a emplear en la mezcla de concreto
2. Reducción de tamaño de partícula de las puzolanas (Molienda)
3. Pruebas de calidad en los agregados pétreos
4. Diseño de la mezcla
5. Elaboración de especímenes
6. Realización de pruebas en los especímenes de concreto
7. Obtención y análisis de resultados.

Así mismo las pruebas que fueron realizadas a los especímenes elaborados con las diferentes mezclas son las siguientes:

Pruebas no destructivas:

- Resistividad eléctrica
- Velocidad de pulso ultrasónico (NMX-C-275-ONNCCE, 2004)

Pruebas destructivas

- Determinación de la resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto (ASTM C 39/C 39M –03)
- Determinación de la resistencia a la tensión indirecta en cilindros de concreto (ASTM C 496/C 496M – 04).
- Determinación de la resistencia a la flexión en prismas de concreto (ASTM C 78 – 02).

Obtención de las puzolanas artificiales

Ceniza de Bagazo de caña. La CBC se logró obtener gracias al apoyo del Ingenio de Azúcar “Lázaro Cárdenas”, que está ubicado en las afueras del poblado de Taretan en el estado de Michoacán y cuya principal actividad es la producción de azúcar estándar y refinada. La forma de las partículas de la CBC es alargada o en forma de fibras, lo anterior se puede deber a que esta ceniza es de origen orgánico y más en especial es producto de la quema de las fibras de la caña de azúcar, en cuanto al tamaño de la partícula, se observa que hay varios tamaños de esta.

Escoria de Alto Horno. La EAH que se utilizó es la ceniza resultante de la producción del acero, la cual fue recolectada de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, dicha escoria tiene una forma granular, por lo tanto, se tiene que someter a un proceso de reducción de tamaño en un molino de disco. Cabe destacar que la forma de la partícula de la EAH es angular, en cuanto al tamaño de esta se observó que hay variedad de tamaños de partículas que conforman la muestra.

Agregados pétreos

En el caso del agregado pétreo fino (arena) a utilizar en la mezcla, esta es arena de río, proveniente del Río Lerma entre los estados de Michoacán y Guanajuato, y el agregado grueso (grava), esta es grava triturada proveniente del banco de joyitas ubicado en la ciudad de Morelia en Michoacán.

- **Pruebas realizadas a los agregados pétreos.** Las pruebas de calidad que se realizaron a los agregados pétreos son las siguientes: Cuarteo (NMX-C-170-ONNCCE, 1997), % Humedad actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006), Humedad superficial y humedad de absorción, Colorimetría, Densidad Aparente y Gravedad específica (NMX-C-164-ONNCCE, 2002) (NMX-C-165-ONNCCE, 2004) , Determinación de la Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S) y seca varillada (M.V.S.V.) (NMX-C-073-ONNCCE, 2004), Análisis granulométrico o distribución granulométrica (NMX-C-077-ONNCCE, 1997).

Las pruebas anteriores sirvieron para determinar los parámetros de calidad que tienen los agregados, mismos que se utilizaron en el diseño de la mezcla.

Diseño de la mezcla

Método ACI. El método del ACI es un método de diseño de mezclas de concreto normal que se basa en las propiedades físicas de los materiales como lo son: la Densidad, el Peso Volumétrico Seco Suelto, el Peso Volumétrico Seco Varillado, % de Absorción, % de Humedad Actual, Módulo de finura, y Tamaño Máximo del agregado, estas propiedades las usa para obtener la cantidad necesaria del concreto por unidad de volumen para un concreto de peso normal.

El cálculo de las cantidades de material se realizó para una mezcla de concreto sin aire incluido. Con un revenimiento de proyecto de 10 cm y un $f'c$ de proyecto de 400 Kg/cm², el ejemplo de la dosificación (cuantificando para un numero conocido de prismas) de la mezcla testigo se muestra en la tabla.

Tabla 1. Dosificación de materiales para elaborar la mezcla testigo.

No. De Prismas	MATERIAL	PESO (kg)
6	GRAVA	98.380656
	ARENA	50.2614279
	CEMENTO	48.4753185
	AGUA	18.2655

Elaboración de los espécimenes

Para el proyecto se elaboraron 2 tipos de probetas de concreto: espécimenes cilíndricos de 10 cm de diámetro x 20cm de altura y espécimenes prismáticos de 15cm x 15cm x 60cm, para la realización de pruebas tanto destructivas como no destructivas.

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó una revolvedora de concreto con capacidad para 1 saco de cemento de 50 kg.

Una vez que se tuvo la mezcla homogénea de concreto hidráulico, se procedió a realizar la prueba de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) en esta, para comprobar que cumpliera con revenimiento de proyecto (10 cm), después se llenaron los diferentes moldes con la mezcla, el procedimiento de llenado para los espécimenes cilíndricos tal y como se especifica en la norma oficial correspondiente (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), en cuanto al llenado de los espécimenes prismáticos se siguió el procedimiento especificado en la norma oficial vigente (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). Cabe destacar que para elaborar las mezclas de concreto fue necesario el empleo de un fluidificante.

En la tabla 2 se presenta un resumen de las diferentes mezclas con sus características.

Tabla 2. Resumen de características obtenidas en cada mezcla.

Mezcla	Relación (A/C)	Fluidificante empleado	Cantidad (gr)	Revenimiento (cm)
Testigo	0.37	SikaCem	180	11.5
EAH	0.38	SikaCem	130	9.5
CBC	0.39	Crisotan R-5	477	0

Pruebas realizadas

Pruebas no destructivas. Las pruebas no destructivas son aquellas que una vez realizadas no se pierde o se daña el espécimen estudiado. Generalmente son técnicas de carácter indirecto que nos permiten estimar la calidad de los especímenes y mediante correlaciones o modelos se puede estimar sus características mecánicas.

Pruebas destructivas. Después de realizar las pruebas no destructivas a los diferentes especímenes, se realizaron las pruebas destructivas, dichas pruebas sirven para determinar las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto.

Se ensayaron 3 especímenes de concreto de cada mezcla por cada edad (28 y 60 días) y prueba (no destructiva y destructiva).

Cabe destacar que cada una de las pruebas elaboradas a los especímenes de concreto, se realizó de acuerdo al procedimiento de prueba descrito en la norma correspondiente para cada prueba.

Cálculos

Resistividad eléctrica. Se calcula con la ecuación 1.

$$\rho = Re \left(\frac{A}{L} \right) \quad (1)$$

Dónde;

ρ es la resistividad eléctrica en $K\Omega\text{-cm}$ (ohm-m)

Re: es la resistencia eléctrica que el equipo proporciona en $K\Omega$

A: es el área transversal del espécimen en cm^2

L: es la longitud del espécimen en cm.

Resistencia a la compresión. Para el cálculo de la resistencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo a compresión, kg/cm^2 .

P = Carga, kg.

$A = \text{Área transversal del cilindro, cm}^2.$

Tensión indirecta. El esfuerzo a la tensión indirecta se calcula de la siguiente manera:

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3)$$

Dónde:

$T = \text{Esfuerzo de tensión, en kg/cm}^2.$

$P = \text{Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensaye, kg.}$

$l = \text{Longitud, cm.}$

$d = \text{Diámetro, cm.}$

4. **Flexión.** La resistencia a la flexión (Módulo de Ruptura) se calcula con la ecuación

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (4)$$

Dónde:

$R = \text{Módulo de ruptura, kg/cm}^2$

$P = \text{Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kg}$

$L = \text{Longitud de la muestra, cm}$

$b = \text{Ancho promedio de la muestra, cm}$

$d = \text{Espesor promedio de la muestra, cm}$

RESULTADOS

A continuación se presentan las gráficas obtenidas a partir de los resultados de las diferentes pruebas efectuadas en los espécimenes elaborados con las diferentes mezclas de concreto descritas anteriormente.

Pruebas no destructivas

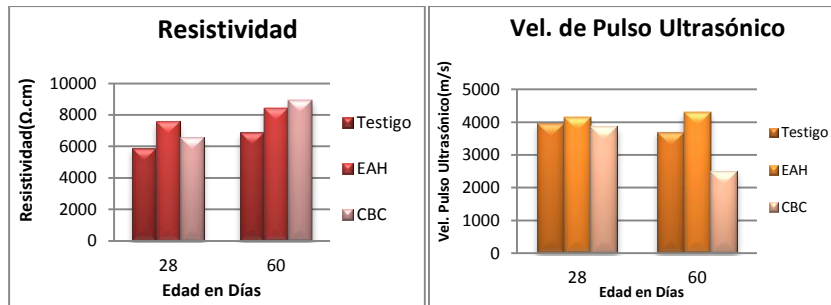


Figura 1. Resultados de Resistividad Eléctrica y Velocidad de pulso Ultrasonico para las diferentes mezclas.

Pruebas destructivas

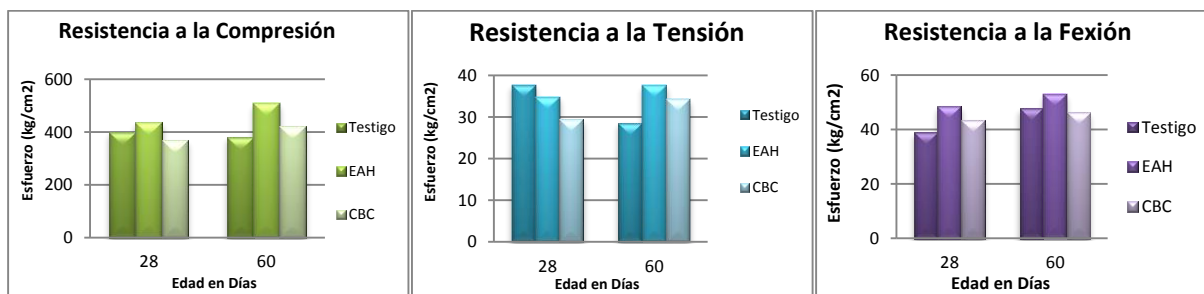


Figura 3. Resultados de la Resistencia a la Compresión, Tensión Indirecta y Flexión en las diferentes mezclas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las pruebas no destructivas, se puede observar que para la mezcla con sustitución de CBC se tiene valores altos de Resistividad eléctrica en comparación con la mezcla testigo y la mezcla con sustitución de EAH, y valores bajos para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, lo anterior se puede deber a la cantidad de poros que tiene la mezcla en cuestión, pues fue sumamente difícil de mezclar y no presentó revenimiento, lo que indica que es muy poco trabajable, por lo tanto si tiene mayor cantidad de poros tiene una velocidad de pulso ultrasónico menor a las otras mezclas.

En cuanto a los resultados de resistencia a la compresión, se tiene que para la edad de 60 días, las mezclas con sustitución, se comportan mejor que la mezcla testigo, pues soportan más esfuerzo, incluso superando la resistencia de proyecto, lo que es muy favorable, en cuanto a los resultados de la prueba de resistencia a la tensión, estos son favorables para las mezclas con las diferentes sustituciones de puzolanas, pues se tiene que en el esfuerzo en la mezcla con sustitución de CBC así como en la mezcla con sustitución de EAH a la edad de 60 días, fue mayor que el obtenido en la mezcla testigo. Los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión también son

muy favorables, puesto que a la edad de 60 días todas las mezclas obtuvieron un esfuerzo de mas del 10% de la resistencia a compresión, lo cual según esta indicado en literatura debe soportar un concreto, por lo tanto es aceptable este valor.

CONCLUSIONES

Observando los resultados de las diferentes pruebas realizadas a los espécimenes de concreto, se puede concluir que las puzolanas artificiales efectivamente mejoran las propiedades físico-mecánicas en el concreto, ya que como se puede observar, por ejemplo la velocidad de pulso ultrasónico, aumenta con respecto al testigo en los espécimenes con la sustituciones de EAH, lo mismo ocurre con los resultados de las pruebas destructivas, ya que la resistencia (compresión, tensión, y flexión), aumentan con respecto al testigo cuando se tiene alguna de las sustituciones.

Los resultados hasta el momento son prometedores, pues los espécimenes que tienen alguna de las sustituciones mejoraron su resistencia mecánica, por lo deberá seguirse monitoreando a edades posteriores para comprobar si efectivamente siguen a aumentando estas resistencias.

Es bueno tomar en cuenta las puzolanas artificiales de las cuales se hace mención en esta investigación para la elaboración del concreto, ya que como se explicó, estas son subproductos agroindustriales a los cuales no se les da ningún uso, así que se puede contribuir al cuidado del medio ambiente, ya que por un lado se da uso a estos desechos, por otro lado se está disminuyendo el consumo de cemento portland en la mezcla de concreto, por lo cual si disminuye su producción disminuiría la cantidad de contaminantes que son arrojados a la atmosfera durante el proceso de fabricación, además de que los costos de fabricación disminuyen, todo esto sin sacrificar la resistencia de nuestro concreto.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H., por brindar las instalaciones y el equipo para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

1. Águila, I., & Soso, M. (2008). Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos.
2. Kosmatka, & S. H. (2004). “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5. Mexico.
3. Neville A. M. (1998.). "Tecnología del Concreto". Primera edición. México.,: Ed. Trillas.

4. Arreola Sánchez, M. (2013). TESIS PROFESIONAL “ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO”, UMSNH, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, MITRVT. Morelia, Michoacán.
5. ASTM C 39/C 39M –03. (s.f.). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.*
6. ASTM C 496/C 496M – 04. (s.f.). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.*
7. ASTM C 78 – 02. (s.f.). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).*
8. NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción- agregados- masa volumétrica- método de prueba.*
9. NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción- agregados para concreto- análisis granulométrico.*
10. NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la construcción- concreto hidráulico- determinación del revenimiento en el concreto fresco.*
11. NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción- concreto hidráulico- elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.*
12. NMX-C-164-ONNCCE. (2002). *Industria de la construcción- agregados- detrmnación de la masa especifica y absorción de agua del agregado grueso.*
13. NMX-C-165-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción- agregados- detrmnación de la masa especifica y absorción de agua del agregado fino- método de prueba.*
14. NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *Industria de la construccción- agregados- contenido de agua por secado- método de prueba.*
15. NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción-agregados-reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.*
16. NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción- concreto- determinación de la velocidad de pulso a través del concreto- método de ultrasonido.*

FIBRA NATURAL DE LECHUGUILLA COMO OPCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CURADO INTERNO EN CONCRETOS DE ALTO COMPORTAMIENTO

R. Dávila-Pompermayer¹, A Durán Herrera^{1,2}, C. Juárez^{1,2}

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil (FIC-UANL), Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México

2. Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT-UANL), Avenida Alianza 101 Sur KM. 10 de la Nueva Carretera Internacional de Monterrey, Apodaca, Nuevo León, C.P. 66600, México.

RESUMEN

En la década de los 80's, surgieron los concretos de alto comportamiento como una tecnología de frontera para satisfacer principalmente exigencias estructurales y requisitos de durabilidad en la mayoría de los casos, mediante el uso de relaciones agua/cementante inferiores a 0.42, la incorporación de cementantes suplementarios y el uso de aditivos súper plastificantes. Sin embargo, como un efecto colateral estos concretos exhibieron contracciones autógenas a edades muy tempranas que incrementaron el potencial de agrietamientos en estos concretos conduciendo a disminuir su durabilidad. Como solución a este problema, se han realizaron evaluaciones sobre el papel del curado interno por medio de agregados ligeros, polímeros súper absorbentes, fibras de madera y agregados de concreto reciclado.

Este proyecto está orientado a evaluar la efectividad de la fibra natural de lechuguilla como agente para incorporar el curado interno en concretos de alto comportamiento y con la incorporación de cementantes suplementarios como ceniza volante y humo de sílice.

Palabras clave: Curado interno, fibra de lechuguilla, contracción autógena, concretos de alto comportamiento, durabilidad.

ABSTRACT

In the early 80's, emerged high performance concrete technology as a frontier technology mainly to meet structural requirements and durability requirements in most cases, using water/cementitious less than 0.42, the addition of supplementary cementitious and use of superplasticizers, However, as a side effect these concretes exhibited particular autogenous contractions at very early ages that increased the potential cracks in such concrete carrying lower durability. To solve this problem, evaluations were conducted on the role of internal curing using lightweight aggregates, superabsorbent polymers, wood fibers and recycled concrete aggregates.

This project aims to evaluate the effectiveness of the natural fiber Lechuguilla as agent to incorporate internal curing in high performance concrete and with the addition of supplementary cementitious as fly ash and silica fume.

Keywords: Internal Curing, Lechuguilla fiber, autogenous shrinkage, high performance concrete shrinkage, durability.

INTRODUCCIÓN

La utilización de agregados ligeros en estructuras de concreto utilizados como agentes de curado interno ha pasado desapercibida para la industria de la construcción, uno de los usos de agregados ligeros más prominentes en la historia de la humanidad es sin duda el edificio del Panteón construido en Roma, Italia (Bremner y Ries, 2009) ^[1].

Fue hasta la primer década del siglo 21 que el uso de agregados ligeros y otros materiales, se utilizaron intencionalmente para implementar curado interno, incorporándose desde la fase de dosificación, los materiales utilizados van desde agregados ligeros pre-humedecidos, concreto reciclado pre-humedecido, polímeros súper absorbentes, y fibras de madera pre-humedecidas ^[1].

En 1957 Paul Klinger publicó el primer documento relacionado con el curado interno de agregado ligero, quien escribió: "Los agregados ligeros absorben una cantidad considerable de agua durante la mezcla que al parecer puede transferir a la pasta durante la hidratación" (Klieger, 1957) ^[2]. Fue apropiado que el artículo de Klieger mencionara la frase "concreto de alto resistencia", ya que fue la búsqueda de generar un curado adecuado para evitar la auto-deseccación en concretos de alta resistencia a que Robert Philleo escribiera en 1991 la siguiente frase "o bien la naturaleza básica de cemento Portland debe ser cambiado de modo que la auto-deseccación se reduzca, o debe ser encontrada alguna forma para conseguir el curado con agua en el interior de los miembros estructurales de alta resistencia. Este último es posible mediante el uso de agregado ligero saturado. Sin embargo, las personas que luchan por altas resistencias no están dispuestos a utilizar agregados ligeros. Un reemplazo parcial del agregado fino con finos ligeros saturados podría ofrecer una solución prometedora. (Philleo, 1991)" ^[3]. A mediados de la década de 1990, investigadores en Alemania (Weber & Reinhardt, 1995) ^[4], los Países Bajos (van Breugel y de Vries, 1998) ^[5], e Israel (Bentur, Igarishi, y Kovler, 1999) ^[6] siguieron el concepto de Philleo investigando activamente del curado interno a través de la utilización de agregados ligeros de pre-humedecidos. En años posteriores después de eso, otros materiales que podrían funcionar como reservorios internos de agua también fueron investigados, tales como polímeros súper-absorbentes (SAP) (Jensen y Hansen , 2001) ^[7] (Jensen y Hansen, 2002) ^[8] y de las fibras de madera pre-humedecidas (Mohr, Premenko, Nanko, y Kurtis, 2005) ^[9]. Por su alto nivel de absorción, la presente investigación de la fibra de lechuguilla pretende proporcionar una alternativa como elemento de curado interno para concretos de alto comportamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Fueron caracterizadas las materias primas para conocer su influencia en las mezclas, estas materias primas son: agregado calizo del Cerro de las Mitas ubicado en la ciudad de Monterrey Nuevo León, con grava de tamaño máximo de 19 mm y arena de 5 mm (No # 4), cemento CPO-40, aditivo súper fluidificante tipo F, ceniza volante tipo F y humo de sílice.

Agregado calizo; las propiedades del agregado grueso fueron de 1.9% de absorción y una densidad de 2.63 g/cm³, una absorción de 1.9 % y densidad de 2.63 g/cm³ para el agregado fino, las granulometrías se muestran en las tablas 1 y 2 para los agregados grueso y fino respectivamente.

Tabla 1.- Granulometría grava 19 mm

Malla	Retenido		Pasa (%)
	Parcial (%)	Acumulado (%)	
1"	0	0	100
3/4"	7.8	7.8	92.2
3/8"	69.4	77.2	22.8
No 4	17.5	94.7	5.3
No 8	0.8	95.5	4.5
P No 8	4.5	100	

Tabla 2.- Granulometría arena No 4

Malla	Retenido		Pasa (%)
	Parcial (%)	Acumulado (%)	
3/8"	0	0	100
No 4	0	0	100
No 8	18.5	18.5	81.5
No 16	29.9	48.4	51.6
No 30	18.5	66.9	33.1
No 50	10.5	77.4	22.6
No 100	5.9	83.3	16.7
No 200	3.2	86.5	13.5
P 200	13.5	100	

El cemento CPO-40 según la norma NMX-ONNCCE-414^[10], con una composición química mostrada en la tabla 3.

Tabla 3.- Composición química del cemento CPO-40

Oxido	Porcentaje
SiO ₂	19.3
Al ₂ O ₃	4.7
Fe ₂ O ₃	3.1
CaO	64.3
Minoritarios y PPI	8.6

Para el aditivo súper fluidificante se determinó su densidad dando un valor de 1.10 g/cm³, y un contenido de sólidos del 42 % (agente activo / dispersante)

La ceniza volante tipo F procedente de la carboeléctrica de Río Escondido, presentó una densidad de 1.20 g/cm³, con la composición química que se muestra en la tabla 4.

El humo de sílice del proveedor de aditivos químicos BASF, presentó una densidad de 2.23 g/cm³, con una composición química como se muestra en la tabla 5.

Tabla 4.- Composición química de la ceniza volante.

Oxido	Porcentaje
SiO ₂	66.1
Al ₂ O ₃	23.4
Fe ₂ O ₃	4.5
CaO	1.7
Minoritarios y PPI	4.3

Tabla 5.- Composición química del humo de sílice.

Oxido	Porcentaje
SiO ₂	88.7
Al ₂ O ₃	1.0
Fe ₂ O ₃	1.8
CaO	1.1
Minoritarios y PPI	7.4

La fibra de lechuguilla presentó una densidad de 1.19 g/cm³. El valor de absorción obtenido fue de 98 %. Un dato importante sobre los materiales utilizados como agentes de curado interno es el valor de desorción, debido a que de nada sirve que el material sea muy absorbente si no tiene la capacidad de liberar el agua y generar el efecto deseado del curado interno, el resultado de esta prueba dio un valor de 67 % a los 6 días.

Las proporciones del concreto de alto comportamiento de uso común con una relación agua / cementante inferior a 0.42 para que se presente una contracción autógena significativa, pero sin llegar a valores demasiado bajos en que se impidan la producción de la mezcla a escala industrial. Para este proyecto las características que se fijaron como constantes fueron; para el concreto de referencia consumo de cemento de 400 kg/m³, relación agua / cementante de 0.40, tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm, tamaño máximo de agregado fino 5 mm (arena No 4). Un concreto con ceniza volante tipo F en sustitución de un 20 % en peso del cemento y un tercer concreto con humo de sílice en sustitución de un 5% en peso del cemento. Aditivo súper fluidificante tipo F para obtener una extensibilidad en el concreto de referencia de 60 ± 5 cm para todos los concretos, tabla 6. Para cada serie de las tres series de concreto se fabricó mortero con el método de mortero equivalente ^[11], y a cada serie se le adicionó fibra de lechuguilla de 1 cm de longitud, dosificada en una cantidad de 1% con respecto al volumen de la mezcla, sustituyendo su volumen por agregado para no alterar las proporciones por m³.

Métodos

Para los agregados se determinó su granulometría de acuerdo a la norma ASTM C 136 ^[12], la absorción y la densidad para ambos agregados, fino y grueso, se utilizó la norma ASTM C 128^[13].

Para determinar la proporción inicial de agregado grueso y fino en el concreto como punto de partida, se utilizó el método de compacidad, moviendo estas proporciones para cumplir con el factor de bloqueo de la mezcla con el anillo J ASTM C 1621 ^[14], además se midió la columna de segregación ASTM C 1610 ^[15], la extensibilidad ASTM C 1611 ^[16] y el revenimiento en caso de ser la mezcla muy rígida ASTM C 143 ^[17].

El procedimiento de mezcla del concreto fue en una revolvedora de 50 L, adicionado en primera instancia la grava, posteriormente la arena y aproximadamente la mitad del agua de mezcla, se mezcló por un minuto, posteriormente se agregó el cementante y el resto del agua, se mezcló por 3 minutos con 3 minutos de reposo posteriores, en los cuales se aplicó el aditivo súper fluidificante, finalmente se mezcló por 2 minutos, al finalizar el tiempo de mezclado se obtuvieron muestras para las pruebas de extensibilidad, anillo J, columna de segregación y contenido de aire,

Se determinó el contenido de aire para los concretos de referencia, ceniza volante y humo de sílice bajo la norma ASTM C 231 ^[18] con su respectiva corrección por el agregado.

Como se mencionó anteriormente, para obtener los especímenes en mortero para las pruebas de resistencia a la compresión (ASTM C 109 ^[19]) y como preámbulo para las pruebas de contracción autógena, se tomó el concreto de referencia y se aplicó el método de mortero equivalente a concreto ^[10], para lo cual, según el método, se parte de una extensibilidad del concreto y mediante una equivalencia da como resultado una fluidez en el mortero, que al llevarla esta a la práctica presentó segregación, por lo tanto, fue necesario reducir la cantidad de aditivo hasta llegar a una fluidez máxima sin que se presentara la segregación, esta nueva fluidez fue tomada como referencia para la dosificación de aditivo para los morteros con ceniza volante y con humo de sílice, adicionalmente fueron determinada la extensibilidad o revenimiento para los concretos con ceniza volante y humo de sílice tomando la dosificación del aditivo del concreto de referencia,

En el caso de la mezcla del mortero equivalente, se llevó a cabo bajo la norma ASTM C 305 ^[20], con las modificaciones de que la fluidez fue hecha en una meza de dimensiones mayores (50 cm) para poder medir los valores objetivo, además de incluir la fibra de lechuguilla en el período de los 30 segundos en los que se mezcla el agua y el cemento, justo antes de introducir el agregado.

La prueba de desorción fue determinada tomado como referencia la norma ASTM C 1761 ^[21], en el cual la muestra de 5 g de fibra fue colocada en un desecador que contenía una solución de nitrato de potasio en agua para crear una ambiente dentro de la cámara de un 94% de humedad relativa a una temperatura de 23 °C. La prueba se llevó hasta llegar el peso de la fibra de no mayor a 0.01 g de un día a otro. Dentro del desecador se colocó un dispositivo para medir y registrar la humedad relativa y la temperatura.

Para determinar la densidad del aditivo súper fluidificante se utilizó un frasco de Chatelier como picnómetro, midiendo el volumen desplazado para un determinado peso, colocado en un baño a 20 °C. Para determinar el contenido de sólidos se dejó una muestra de 100 g de aditivo en el horno a 110 °C hasta peso constante.

La densidad de la fibra de lechuguilla se determinó mediante el frasco Chapman, Para esto la fibra se sumergió en agua en condición saturada superficialmente seca (sss), y

se midió el volumen desplazado. Para determinar la absorción y llegar a la condición sss se cortaron fibras de 15 cm de longitud y se dejaron saturar por 72 horas según la norma de agregados ligeros para curado interno ASTM C 1761 ^[21], posteriormente se secaron las fibras extendiéndolas en un recipiente metálico, secándolas con una tela y posteriormente verificando su estado de seco superficialmente con un papel absorbente sin que este fuera humedecido por las fibras.

La ceniza volante fue beneficiada mediante su cribado en la malla No 100, procedimiento utilizado para retirar el carbón sin calcinar, a la cual se le determinó su densidad por el método de ASTM C 188 ^[22], bajo este mismo método se determinó la densidad del humo de sílice.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

En la prueba de compacidad de los agregados resultó una proporción en masa de 53 % de grueso por 47 % de agregado fino, llegando finalmente a una proporción de 33 % de grueso por 67 % de agregado fino, teniendo la mezcla un factor de bloqueo de 5.0 cm.

En la tabla 6 se describen las características de trabajabilidad y contenido de aire, apreciándose la influencia de la ceniza volante y el humo de sílice sobre los parámetros medidos.

Tabla 6.- Resultados de pruebas de trabajabilidad en los concretos ensayados.

Mezcla	Exten. / Rev. (cm)	T50 (s)	Anillo J (cm)	Estab. Visual	Columna Segreg. (%)	Aire (%)
Referencia	60.5 / --	5.42	54.5	0	0	2.1
Ceniza	71.0/ --	6.15	68.0	1	14.3	0.4
Humo de	-- / 10.0	--	--	--	--	2.1

La prueba de desorción de la fibra de lechuguilla, sometida a la prueba ASTM C 1761 ^[21], indica que la fibra es capaz de liberar agua contenida en ella desde el primer día, dando un valor de 27.5 % en peso, agua necesaria para iniciar el curado interno, cabe destacar que es conveniente correr una prueba de desorción monitoreada a cada hora principalmente en el intervalo previo y posterior inmediato al fraguado final para revisar la velocidad de desorción presentada al momento de empezarse a generar la contracción autógena definida como posterior al fraguado final.

La fibra de lechuguilla presentó una buena distribución dentro de la matriz cementante en el mortero, esto quedó evidenciado en los especímenes ensayados de la prueba a compresión de los morteros, lo que indica que el procedimiento de colocar la fibra al momento del mezclado del agua y el cementante es adecuado, aunado al porcentaje seleccionado del 1 % de fibra en volumen. Se esperaba un posible comportamiento de aglomeración de la fibra y por lo tanto mala distribución en la matriz cementante, lo que conllevaría a una concentración de esfuerzos y una mala distribución del agua de curado interno.

Los resultados a compresión mostrados en la tabla 7, nos indican que la pérdida de resistencia por la adición de fibra es significativa para las mezclas de referencia y con ceniza volante y con poca influencia para el caso del humo de sílice, siendo el 3.0 y 9.2 % de reducción para 3 y 7 días para la mezcla de referencia, 4.3 y 1.2 % de reducción para 3 y 7 días para la mezcla con humo de sílice y de 7.6 % de reducción para 7 días y de 2.3 de incremento para 3 días en la mezcla de ceniza volante, a esta caracterización sugiero evaluar el efecto en la resistencia a compresión a edades avanzadas (28, 56, 180 y 360 días) para que el curado interno exhiba su efecto en la reacción puzolánica. Algunas de estas resistencias se estarán presentado en la ponencia que se presentará durante el congreso.

Tabla 7, relación de resistencias para morteros con y sin fibra.

Mezcla	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	3 días		7 días	
	Sin fibra	Con fibra	Sin fibra	Con fibra
Referencia	59.8	58.0	61.9	56.3
Ceniza Volante	48.7	49.8	55.5	51.3
Humo de Sílice	56.4	53.9	63.3	62.5

El mortero equivalente es una herramienta para poder diagnosticar el comportamiento de elementos de curado interno, tabla 8, como en este caso la fibra de lechuguilla, debido a que la prueba para determinar la contracción autógena requiere de hacerse con mortero y que de otra forma pudiera obtenerse este mortero al cribar el concreto para retirar la parte gruesa del agregado, o en su caso mezclar solo la parte fina de la mezcla, en la cual pudiese sustituirse el volumen de agregado grueso por el fino para no alterar los consumos de cemento por unidad de volumen.

Tabla 8.- Medición de trabajabilidad para concreto y su correspondiente mortero equivalente

	Extensibilidad	Aditivo (L/m ³)	Fluidez	Aditivo (mL/kg)
	/Revenimient o (cm)		en Mortero (cm)	
Referencia	60.5 / --	2,359	25.7	3,660
Ceniza Volante	71.0 / --	2,411	25.9	3,450
Humo de Sílice	-- / 10.0	2,370	25.9	4,900

CONCLUSIONES

La fibra de lechuguilla presentó buenas expectativas de ser un agente de curado interno para mezclas con ceniza volante, basado en que su alto valor de absorción y la velocidad de desorción de 67 % a los 6 días, además de su buena dispersión en la matriz

cementante y la poca disminución de la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla con humo de sílice, siendo de un 4.3 y un 1.2 % a los 3 y 7 días respectivamente. Siendo la referencia la más afectada en cuanto a la disminución de resistencia de un 3.0 % a los 3 días y de un 9.2 % a los 7 días y en menor medida fue la disminución de resistencia para el mortero con ceniza volante con un incremento de 2.3 % a 3 días y un decremento de un 7.6 % a 7 días, es posible que la influencia puzolánica tenga beneficios sobre la pérdida de resistencia esto puede ser verificado con resultados a edades más tardías. La ejecución de las pruebas de contracción autógena complementarán esta información para cuantificar su verdadera efectividad como agente de curado interno.

REFERENCIAS

- [1] Bremner, T., & Ries, J. Stephen J. Hayde: Father of the Lightweight Concrete Industry. *Concrete International*, (2009), pp. 35-38.
- [2] Klieger, P. Early High Strength Concrete for Prestressing. *Proceedings World Conference on Prestressed Concrete*, (1957), pp. A5-1 - A5-14.
- [3] Philleo, R.. *Concrete Science and Reality. Materials Science of Concrete*, 2, (1991), pp. 1-8.
- [4] Weber, S., & Reinhardt, H. A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete. *Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, (1995) pp. 662-671.
- [5] Van Breugel, K., and de Vries, H. Mixture Optimization of Low Water/Cement Ratio, High-Strength Concretes in View of Reduction of Autogenous Shrinkage. *Proceedings International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes*, (1998), pp. 365-382.
- [6] Bentur, A., Igarishi, S., & Kovler, K. Control of Autogenous Stresses and Cracking in High Strength Concretes. *Proceedings of the 5th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete*, (1999), pp. 1017-1026.
- [7] Jensen, O., & Hansen, P. Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background. *Cement and Concrete Research*, (2001), pp. 647-654.
- [8] Jensen, O., & Hansen, P. Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations. *Cement and Concrete Research*, (2002), pp. 973-978.
- [9] Mohr, B., Premenko, L., Nanko, H., & Kurtis, K. Examination of Wood-Derived Powders and Fibers for Internal Curing of Cement-Based Materials. *Proceedings of the 4th International Seminar: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, (2005), pp. 229-244.
- [10] ONNCCE. *Cemento Hidráulico. NMX-C-414-ONNCCE-2004*, (México D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2009) pp. 1–17.
- [11] Tahir Kemal Erdem, Kamal H. Khayat, and Ammar Yahia. Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar. *ACI Materials Journal*, (March - April 2009), pp. 154 – 160.
- [12] ASTM. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates C 136*. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff. 2006), pp. 1 – 5.

- [13] ASTM. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate C 128. Annual book of ASTM standards. (Pennsylvania: Staff. 2009), pp. 1 – 7.
- [14] ASTM. Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring C 1621. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff. 2009), pp. 1 - 5.
- [15] ASTM. Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique C 1610. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff 2006) , pp. 1 - 4.
- [16] ASTM. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete C 1611. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff 2009), pp. 1-6
- [17] ASTM. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete C 143. Annual book of ASTM standards (Pennsylvania: Staff 2010), pp. 1 - 4.
- [18] ASTM. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method C 231. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff 2009), pp. 1 - 10.
- [19] ASTM. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) C 109. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff 2008), pp. 1 - 9.
- [20] ASTM. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency C 305. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff 2006), pp. 1 - 3.
- [21] ASTM. Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete. En Annual book of ASTM standards C 1761, (Pennsylvania: Staff. 2012), pp. 1 – 8.
- [22] ASTM. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement C 188. Annual book of ASTM standards, (Pennsylvania: Staff. 2009), pp. 1 - 3.

DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN DE CONCRETOS SUSTENTABLES EXPUESTOS A UN SUELO TIPO SP EN PRESENCIA DE 1, 2 Y 3% DE SULFATO DE MAGNESIO

G. Santiago-Hurtado¹, L. D. López León⁵, E. González-Viveros³, R. Galván-Martínez⁴,
R. Orozco-Cruz⁴, A. Borunda-Terrazas⁶, V. H. García-Pacheco², **M. A. Baltazar-Zamora**²

¹Doctorado en Ingeniería, Universidad Veracruzana, FIME, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. G. Aguirre Beltrán S/N, Lomas del Estadio, Xalapa, Veracruz, México, CP 91000, miguelbz_75@yahoo.com, mbaltazar@uv.mx

³Facultad de Estadística e Informática - Xalapa, Universidad Veracruzana, Av. Xalapa Esq. M. Avila Camacho, Xalapa, Veracruz, México.

⁴Instituto de Ingeniería - Boca del Rio, Ver; Universidad Veracruzana.

⁵Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

⁶Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C. (CIMAV), Chihuahua, Chih., México

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos al evaluar la corrosión en concretos sustentables reforzados con acero 1018 y galvanizado expuestos a un suelo SP en presencia de diferentes concentraciones de Sulfato de Magnesio, simulando con este arreglo el ambiente al que están expuestos las cimentaciones de la infraestructura de concreto como Puentes, Edificios, Plantas de Tratamiento de Aguas residuales etc., el diseño de las mezclas de concreto fue de acuerdo a ACI 211.1, se utilizaron dos tipos de cemento CPC 30R y CPC 30R-RS, y la evaluación de la corrosión fue mediante las técnicas de Potencial de Media Celda de acuerdo a la norma ASTM C876-09 y la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal, dicha evaluación se realizó durante un periodo de exposición de 260 días al suelo sulfatado, los resultados muestran un mejor desempeño los especímenes con acero galvanizado y elaborados con cemento resistente a sulfatos presentando niveles de corrosión de despreciable a moderada.

Palabras clave: Concreto Sustentables, Corrosión, Sulfato de Magnesio, Acero 1018, Galvanizado

ABSTRACT

This paper shows the results obtained when evaluating corrosion in sustainable concrete reinforced with 1018 steel and galvanized exposed to soil SP in the presence of different concentrations of magnesium sulfate, simulating this arrangement the environment to which they are exposed foundations of infrastructure concrete as Bridges, Buildings, Treatment Plants sewage etc., the design of concrete mixes was according to ACI 211.1, two types of cement CPC 30R and CPC 30R-RS were used, and the evaluation of corrosion was through the techniques of Half Cell Potential according to ASTM C876-09 standard and the resistance linear polarization, this

evaluation was performed during an exposure period of 260 days a sulfated soil, the results show a better performance specimens with galvanized steel made with sulfate-resistant cement corrosion levels presenting negligible to moderate.

Keywords: Sustainable Concrete, Corrosion, Magnesium Sulfate, 1018 Steel, Galvanized.

INTRODUCCIÓN

Los sulfatos de calcio, magnesio, sodio y potasio se encuentran en todo el mundo en las arcillas y otros suelos, con frecuencia en cantidades considerables, de ahí surge el interés de contribuir a la generación del conocimiento sobre esta área tan importante para la infraestructura. La distribución de los sulfatos en los suelos generalmente es muy irregular y las concentraciones pueden variar entre un punto y otro a unos metros de distancia. También puede haber una considerable variación en la concentración de sulfato con la profundidad, dependiendo de las condiciones climáticas. Esto es muy marcado donde hay un alto nivel freático y solución salina, como en las zonas costeras [1-3]. Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio [4].

En la actualidad y desde hace tiempo, el material de construcción más utilizado es el concreto, que junto con las varillas de acero, forman el sistema conocido como concreto reforzado. Las estructuras de este sistema, son definidas como estructuras muy duraderas y que requieren de muy poco mantenimiento. Sin embargo, uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural de obras civiles como: puentes, túneles, carreteras, muelles, etc., de un país, es la corrosión del acero de refuerzo [5].

La corrosión del acero embebido en el concreto, es un proceso electroquímico en el cual se desarrolla un ánodo donde se produce oxidación y un cátodo donde se produce reducción. El proceso de corrosión puede ser ocasionado por diversos factores, uno de esos factores son los sulfatos los cuales forman parte de las sales inorgánicas que normalmente están presentes en el terreno, en las aguas freáticas y superficiales, aunque su grado de concentración puede ser muy variable [6-8].

De lo anterior y de acuerdo a múltiples investigaciones se tiene conocimiento del comportamiento de concretos en contacto con sulfatos presentes en el agua, sin embargo es mínima la información correspondiente al ataque de los sulfatos presentes en el suelo y más aún el efecto que tienen en concretos sustentables[9-12], de ahí la importancia de estudiar este mecanismo y al mismo tiempo utilizar acero galvanizado y cemento resistente a sulfatos, como forma de mitigar el daño que puedan causar a estructuras de concreto reforzado.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño y proporcionamiento de la Mezcla de Concreto

El diseño de las mezclas de concreto, se realizó de acuerdo al método del ACI 211.1 [13]; para el cual se debe hacer la caracterización de las propiedades físicas de los agregados a utilizar, con base a la Normativa ONNCCE, posteriormente con el método del ACI se hace el proporcionamiento para determinar la cantidad de material necesario para elaborar un metro cubico de concreto; en la siguiente tabla se muestra las cantidades empleadas.

Tabla 1. Dosificación de la mezcla de concreto.

Contenido (Kg/m ³)	Concreto con $f'c=350$ kg/m ³
Cemento	456
Agua	205
Agregado grueso	995
Agregado fino	562

Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

Como anteriormente se mencionó se emplearon dos tipos de acero de refuerzo, acero 1018 y acero galvanizado ambos de 3/8", en el centro de los especímenes se colocó una barra de acero inoxidable la cual funciona como electrodo auxiliar. Las dimensiones de los especímenes y el arreglo de las barras embebidas en ellos se observa en la Figura 1.

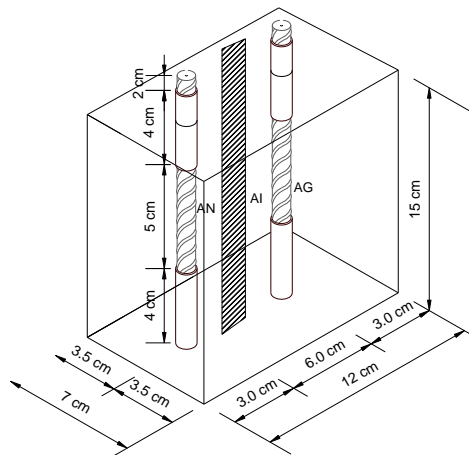


Figura 1. Dimensiones de los especímenes de prueba.

Las varillas de acero normal y galvanizado fueron limpiadas para retirar cualquier impureza que en ellas estuviese presente, posteriormente se delimito el área a evaluar y el resto se cubrió con una pintura anticorrosiva. La fabricación de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 [14]. A cada uno de los especímenes se le asignó una nomenclatura, en función de sus variables, la cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Nomenclatura de especímenes de prueba.

<i>Nomenclatura empleada</i>							
A60RG	A60RN	B61RMG	B61RMN	C62RMG	C62RMN	D63RMG	D63RMN
A60RSG	A60RSN	B61RSMG	B61RSMN	C62RSMG	C62RSMN	D63RSMG	D63RSMN

Significado:

- A, B, C y D se refieren al espécimen.
- El 6 indica la relación agua/cemento =a/c 0.65.
- 0, 1, 2 y 3 indican el porcentaje de MgSO₄ presente en la arena como medio agresivo.
- R y RS, tipo de cemento utilizado en las mezclas: R=CPC 30R y RS=CPC 30R RS.
- La M indica que el porcentaje de contaminante corresponde a MgSO₄
- El último dato indica el acero a evaluar G=acero galvanizado y N=acero normal (1018).

Los especímenes después de haber sido elaborados y descimbrados se sometieron a la etapa de curado durante 28 días como lo indica la norma, NMX-C-403-ONNCCE-1999 [15]. Posteriormente para determinar el tipo de suelo en el cual los especímenes se encuentran, se realizó la caracterización física de este, de esta forma se determinó que se trata de una arena mal graduada SP de acuerdo al SUCS [16], después se eligieron recipientes donde se colocó arena contaminada con 0, 1, 2 y 3% de MgSO₄, como medio agresivo ahí se expusieron los especímenes para evaluar su corrosión, simulando un medio agresivo en las cimentaciones de las estructuras de concreto como puentes, edificios etc.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Potencial de Corrosión

El monitoreo de potencial de corrosión de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C876-09 [17] así como su interpretación, solo agregando un rango más de acuerdo a la literatura [18], ver tabla 3.

Tabla 3. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

<i>Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO₄</i>	<i>Probabilidad de Corrosión</i>
< - 500	Corrosión Severa
< -350	90% de Prob. de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Prob. de Corrosión

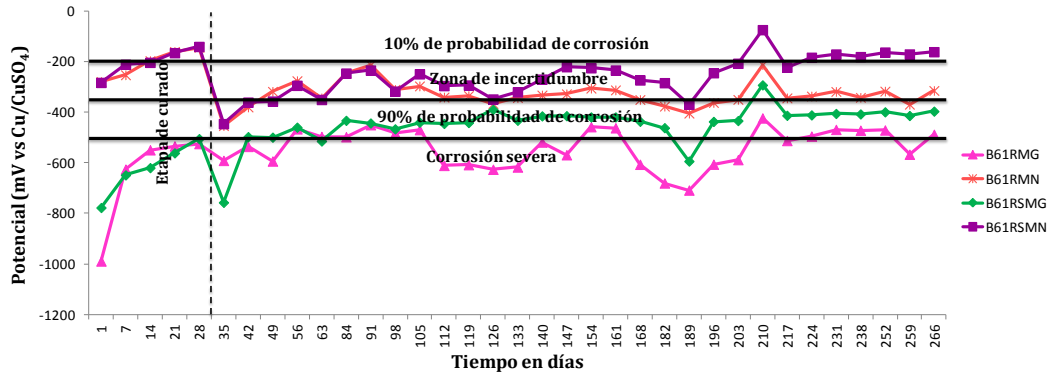


Figura 2. E_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 1% de $MgSO_4$.

La figura 2 nos presenta el comportamiento termodinámico de especímenes reforzados con acero 1018 y acero galvanizado, podemos observar como cuando están expuestos a un suelo con un 1% de $MgSO_4$ los especímenes con acero 1018 en general presentan un comportamiento homogéneo con una probabilidad de 50% de corrosión y al final el espécimen con cemento resistente a sulfatos presenta un mejor comportamiento con un 10% de probabilidad de corrosión.

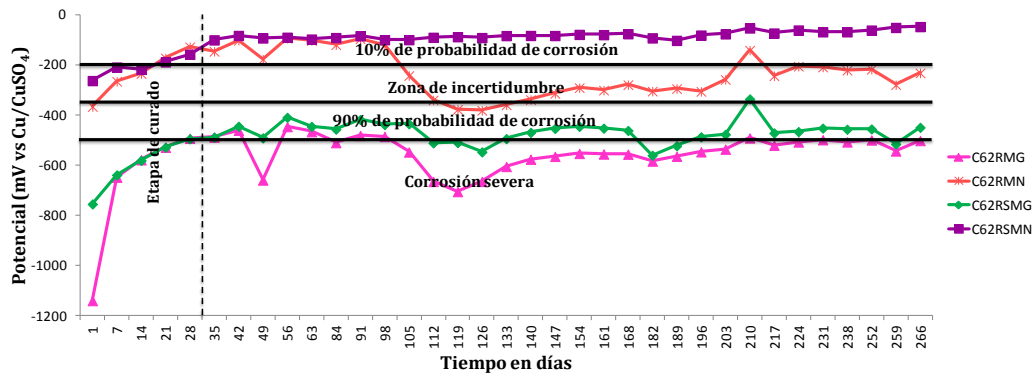


Figura 3. E_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 2% de $MgSO_4$.

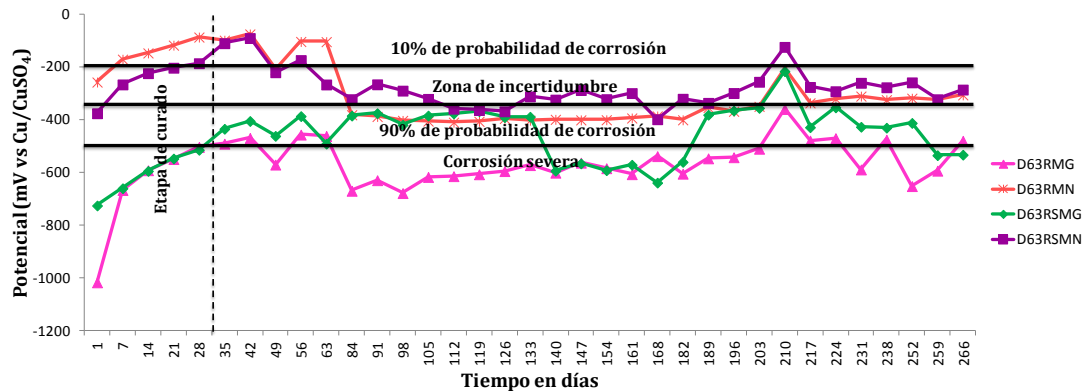


Figura 4. E_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 3% de $MgSO_4$.

En la figura 3 se observa un comportamiento similar a la exposición de especímenes de concreto reforzados con acero 1018 y galvanizado, con valores en todos los

especímenes con una tendencia en general a valores más positivos de E_{corr} , se observa algo interesante en el espécimen C62RSMN, acero 1018 que presentó una pasivación durante todo el tiempo de exposición de la presente investigación.

Para el caso cuando los especímenes de concreto son expuestos a un suelo SP contaminado con un 3% de $MgSO_4$, ver figura 4, se presenta un comportamiento similar a los expuestos a suelos con 1 y 2% de dicho agente agresivo, sin embargo en el espécimen con acero 1018 y cemento resistente a sulfatos no se presente la pasivación observada cuando la concentración del suelo tiene un 2% de dicho agente, lo que indicaría un ataque mayor de este medio de exposición.

Cinética de Corrosión mediante LPR

El criterio que se empleó para evaluar el nivel de corrosión fue mediante la técnica de RPL y la interpretación de los resultados fue de acuerdo al Manual de la Red DURAR, dicho criterio indica cuatro niveles de corrosión, ver tabla 4.

Tabla 4. Nivel de Corrosión de acuerdo a la I_{corr} . [19]

Velocidad de Corrosión (I_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de Corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5-1	Elevada
> 1	Muy Elevada

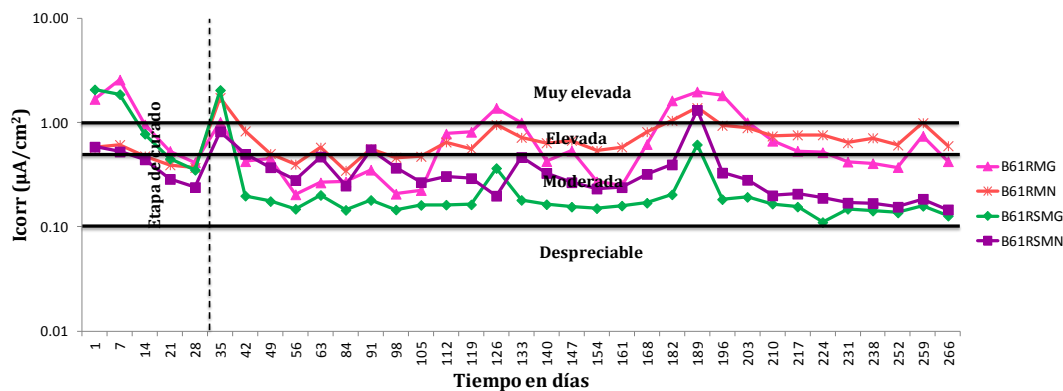


Figura 5. I_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 1% de $MgSO_4$.

En la figura 5 se observa un comportamiento homogéneo de la velocidad de corrosión tanto para los especímenes reforzados con acero 1018 (B61RMN y B61RSMN) y acero galvanizado (B61RMG y B61RSMG), un comportamiento que se mantiene en velocidad moderada para los especímenes elaborados con cemento CPC-30R RS, pero con magnitudes menores en la intensidad de corrosión para el espécimen reforzado con el acero galvanizado B61RSMG.

En la figura 6 se puede observar como al ser expuestos los especímenes de estudio a un suelo con 2% de $MgSO_4$, el espécimen C62RSMN se mantiene durante todo el tiempo de exposición con un nivel de corrosión despreciable confirmando la probabilidad de corrosión del 10% que se había determinado con el monitoreo del I_{corr} , así también los demás especímenes se mantienen los últimos 100 días en un nivel de corrosión moderada, sin identificarse gran diferencia entre el uso de los dos tipos de cementos y aceros para este medio de exposición.

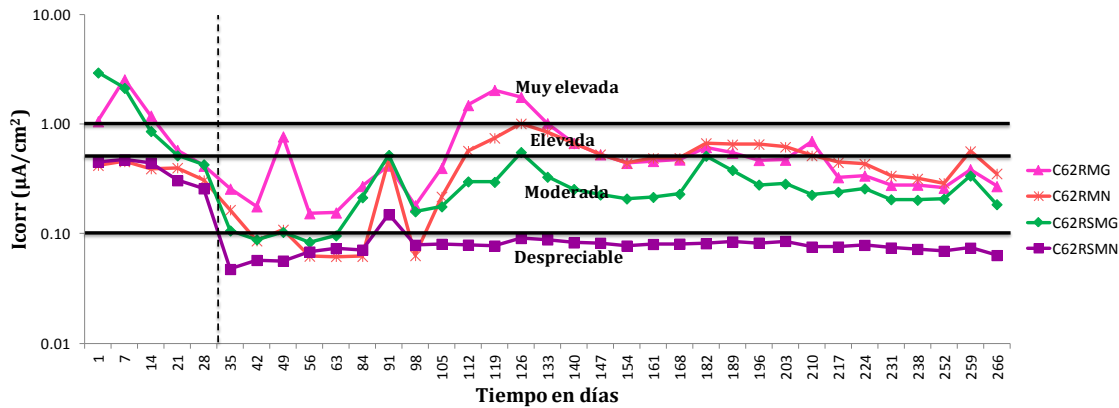


Figura 6. I_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 2% de $MgSO_4$.

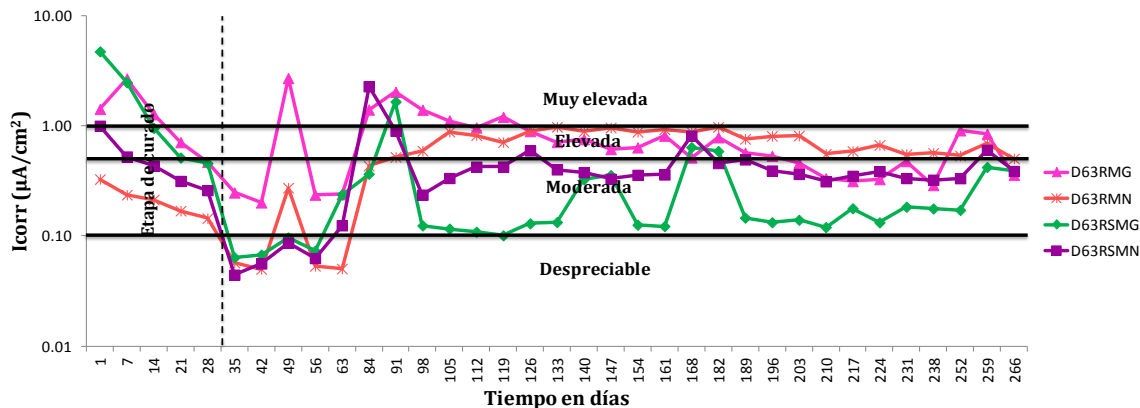


Figura 7. I_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 3% de $MgSO_4$.

La figura 7 nos permite observar la influencia del incremento de concentración del agente agresivo en la corrosión del acero de refuerzo debido a que todos los especímenes incrementan su nivel de corrosión con respecto a lo presentado en suelos con menor concentración, 1 y 2%, así también se constata el beneficio del sistema acero galvanizado-concreto con cemento CPC 30R RS presentando este el mejor desempeño contra la corrosión por sulfato de magnesio presente en el subsuelo.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de la presente investigación podemos concluir que el sistema acero galvanizado-concreto elaborado con cemento resistente a sulfatos presentan el desempeño cuando en el suelo donde se desplantará la estructura de concreto presente concentraciones de 3% o más de $MgSO_4$, así también se puede concluir que concentraciones menores presentes en los suelos podrían considerarse medianamente agresivos cuando se utilice un cemento tipo CPC 30R en estructuras reforzadas con acero normal 1018.

AGRADECIMIENTOS

G. Santiago Hurtado expresa su agradecimiento a CONACYT de México por la Beca Doctoral otorgada, así también a Asphaltpave S.A. de C.V., por la asistencia técnica.

REFERENCIAS

- [1] Gerhardus H. Koch, Michiel P.H. Brongers, and Neil G. Thompson-CC, Dublin, Ohio, Y. Paul Virmani, Turner-Fairbank, J.H. Payer Case, "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States" PUBLICATION NO. FHWA-RD-01-156, 2006.
- [2] I.L. Kondratova, P. Montes, T.W. Bremner, Cem. Concr. Compos., 2003, 25, 483.
- [3] G. Santiago-Hurtado, M.A. Baltazar-Zamora, A. Galindo D, J.A. Cabral M, F.H. Estupíñan, P. Zambrano Robledo, C. Gaona-Tiburcio, Int. J. Electrochem. Sci., 2013, 8, 8490.
- [4] L. A. Francisco Guzmán, G. Santiago-Hurtado, M.A. Baltazar-Zamora, presented at SMEQ 2012-5th Meeting of the Mexican Section of the ECS, Toluca, Estado de México, México, 11 – 15 de Junio del 2012, pp.
- [5] M.A. Baltazar-Zamora, "Comportamiento de la corrosión del acero al carbono e inoxidable embebido en concreto y en presencia de NaCl y $NaSO_4$ ", Tesis Doctoral, CIMAV, (2005): p. 52
- [6] A.I.M. Ismail y et al., 2009. Applied Clay Science: "Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel", Vol. 42, Pag. 356–362.
- [7] T. Bellezze M. Malavolta, A. Quaranta, N. Ruffini, G. Roventi, Cem. Concr. Compos., 2006, 28, 246.
- [8] M.A. Baltazar-Zamora, "Corrosión por Sulfatos en Concreto Reforzado", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua, (2000): p. 19.
- [9] G. Santiago-Hurtado, Balderas H. P, G. Roa-Morales, R. Galván-Martínez, R. Orozco-Cruz,
M. A. Baltazar-Zamora. "Evaluación electroquímica de concretos sustentables en agua de mar", XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, ANCA 2014, 11-13 de Junio del 2014, Acapulco, Guerrero, México.
- [10] G. Santiago-Hurtado, Balderas H. P, G. Roa-Morales, R. Galván-Martínez, R. Orozco-Cruz,
M. A. Baltazar-Zamora. "Evaluación electroquímica de concretos sustentables expuestos a un suelo marino SP", XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, ANCA 2014, 11-13 de Junio del 2014, Acapulco, Guerrero, México.
- [11] G. Santiago-Hurtado, P. Balderas-Hernandez, G. Roa-Morales, M. A. Baltazar-Zamora. "Implementation of sustainable concrete made with industrial wastes",

International Conference Natural Resources and Sustainable Development Goals For Latin American, 2-5 de septiembre del 2014, San Luis Potosí, México.

[12] G. Santiago-Hurtado, P. Balderas-Hernandez, G. Roa-Morales, J.A. Del Ángel-Ramos, M. A. Baltazar-Zamora. "Influence of sea weater in sustainable concrete", International Conference Natural Resources and Sustainable Development Goals For Latin American, 2-5 de septiembre del 2014, San Luis Potosí, México.

[13] ACI, 2004. Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1, p. 29. Ed. IMCYC, México.

[14] NMX-C-159-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio", México.

[15] NMX-C-403-ONNCCE-1999, "industria de la construcción-concreto hidráulico para uso estructural", México.

[16] Braja M. Das, Principio de Ingeniería de Cimentaciones, Ed. Thomson, México, 2006.

[17] ASTM C 876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, ASTM Volume 03.02, 2009.

[18] H. Won-Song and V. Saraswathy, "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review" International Journal of Electrochemical Science, Vol.2, Pág. 1-28, Rep. de Serbia, 2007.

[19] Red DURAR, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado, CYTED Program, Rio de Janeiro, (1997).

EFFECTO DE LOS ALTOS CONTENIDOS DE CENIZA VOLANTE EN LA DURABILIDAD DE LOS CEMENTOS COMPUESTOS.

H. G. Campos¹, J. M. Mendoza-Rangel¹, P. Garcés², P. Castro³

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
2. Universidad de Alicante, Carretera de San Vicente del Raspeig s/n CP.:03690, San Vicente del Raspeig, Alicante España.
3. Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida (CINVESTAV-Mérida) Km. 6, Carretera Antigua a Progreso, CP 97310, AP #73, Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

En los últimos años se ha generalizado el uso de adiciones minerales en sustitución de cemento portland para estructuras de concreto debido a las ventajas técnicas, mecánicas y de sustentabilidad que ofrecen. Sin embargo, debido a la gran cantidad de adiciones minerales factibles a ser utilizadas y a los distintos porcentajes de uso de las mismas es complicado definir desempeños ante los distintos ambientes a los que finalmente estarán expuestas nuestras estructuras. El presente trabajo evaluó el comportamiento de nueve matrices cementantes base cemento portland y ceniza volante procedente de la Central térmica de Andorra (Teruel, Aragón, España) a fin de establecer su comportamiento ante efectos de carbonatación acelerada. Los resultados mostraron un buen desempeño de las mezclas con sustitución que si bien es cierto no mostraron el mismo desempeño que las probetas sin adicción, en algunos casos igualaron a la mezcla patrón.

Palabras clave: Ceniza volante, Corrosión, Durabilidad, Carbonatación.

ABSTRACT

Is widespread use of mineral admixtures in replacement of portland cement for concrete structures in recent years due to technical, mechanical and sustainability advantages. However, due to the large number of feasible to be used and the various percentages of use of these performances is complicated to define different environments to which our structures finally be exposed mineral admixtures. This study evaluated the behavior matrices based cementitious nine portland cement and fly ash from the thermal power of Andorra (Teruel, Aragón, Spain) in order to establish their behavior under impact of accelerated carbonation. The results showed a good performance of mixtures with replacement if it is true not show the same performance as the specimens without addiction, in some cases equaled the standard mixture.

Keywords: fly ash, Corrosion, Durability, Carbonation.

INTRODUCCIÓN

El consumo de cemento se ha convertido en un indicador de crecimiento socioeconómico (1); no obstante, por razones ecológicas existe una tendencia orientada a transformar la industria del cemento, ya que la producción de cada tonelada de clínker de cemento portland libera aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono al ambiente (0.8 ton de CO₂ para las plantas más eficientes) (2) (3).

De acuerdo a la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), entre 900 y 1100 kg de CO₂ son emitidos por cada 1000 kg de cemento portland producido, dependiendo esto del tipo de combustible, los ingredientes crudos usados y la eficiencia energética de la planta de cemento (4). Por su parte la Portland Cement Association (PCA), reporta que en promedio 927 kg de CO₂ son expulsados a la atmósfera por cada 1000 kg de cemento portland (5).

En la producción de concreto se utiliza alrededor de un 7% a 15% de cemento por peso, lo que resulta en una emisión de CO₂ aproximada de 100 a 300 kg por cada metro cúbico de concreto. Cantidad que está directamente relacionada con el monto de cemento Portland usado (6). Cabe hacer mención, que una significativa proporción de CO₂ es reabsorbido dentro del concreto durante su vida útil a través de la carbonatación que afecta la durabilidad de la estructura. Se estima que entre 33% y 57% del CO₂ emitido de la calcinación será reabsorbido a través de la carbonatación de las superficies de concreto en cerca de 100 años (7).

El actual escenario indica un incremento en las necesidades de cemento y ante la gran cantidad de insumos requeridos para la producción de este material, no sólo de combustibles, sino también de materias primas, nos permite predecir que las industrias del cemento portland y del concreto deben evolucionar con el fin de contribuir a mitigar el deterioro de nuestro ambiente.

En este sentido se ha propuesto que el concreto deberá certificarse para satisfacer la calidad y la durabilidad requeridas (8), para ello el reto consiste en implementar un mejor control de calidad bajo una tecnología de concreto avanzada que este soportada en un mayor conocimiento científico (9). Ante esto, los cementos compuestos destacan por su característica de contribuir a la reducción de emisión de CO₂, en ellos los materiales cementantes complementarios tales como las cenizas volantes permiten que la industria sustituya grandes cantidades de cemento portland por unidad de volumen de concreto (10), reduciendo por consiguiente la generación de gases contaminantes y contribuyendo a generar procesos sustentables (11).

Estos subproductos industriales que de otra manera terminarían en grandes depósitos vertidos como basura son llamados de varias maneras pero en esta ocasión los nombraremos adiciones minerales.

El uso de las adiciones minerales en el concreto en combinación con el cemento mejoran las propiedades de resistencia y durabilidad además de reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 70%, pero los valores típicos de sustitución sin desmejorar sus

características tecnológicas rondan de 15 a 40% (12).

Los estudios actuales en este campo están encaminados a desarrollar concretos con la mayor cantidad de adiciones minerales posible (entre ellas la ceniza volante); esto debido a las propiedades benéficas que influyen en el concreto, y a la economía que se logra al ahorrar la mayor cantidad posible de cemento.

La ceniza volante

Es el desecho de la quema de carbón en las plantas generadoras de electricidad, donde generalmente de un 15% a un 20% del carbón quemado toma la forma de ceniza volante. En un principio, la ceniza volante era enviada a depósitos para ser confinada o como ocurre en México es depositada en enormes espacios al aire libre donde contamina el ambiente, sin embargo hoy en día en varios países una significativa porción está incluida en el concreto. En 1989, una encuesta de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), mostró que el promedio de la cantidad de ceniza volante usada por metro cúbico de concreto era aproximadamente de 50 kg. En 2002, este número se incrementó a alrededor de 80 kg, esencialmente reemplazando al cemento Portland.

Los concretos con adiciones minerales han ido cobrando interés debido a que mejoran tanto las propiedades en estado fresco como en estado endurecido de nuestros concretos; es así como está documentado que la adición de ceniza volante en nuestros concretos mejora la trabajabilidad, reduce el agrietamiento y aumenta la resistencia ante agentes agresivos al generar una matriz más tortuosa.

No obstante al ser el proceso de endurecimiento más lento que el del cemento portland y consumir portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) durante su hidratación, difícilmente se logran las mismas resistencias a edades tempranas y queda la duda razonable sobre consumo máximo de adicción sin afectar la durabilidad final ante el ingreso del CO_2 .

También es cierto que es común encontrarnos con adiciones minerales con distinto grado de fase vítrea, lo que provoca que recurrentemente sea necesaria una activación de las mismas antes de poder ser usadas con resultados satisfactorios.

Consientes, de que si logramos fabricar un concreto más durable obtendremos menos costos de mantenimiento y reemplazo cuando lo comparamos con otros productos de construcción; contribuyendo de esta manera, al valor ambiental del material; La presente investigación evaluó el comportamiento de nueve matrices cementantes base cemento portland, considerando tres relaciones agua/material cementante (0.46, 0.59 y 0.70) y tres porcentajes de sustitución (0%, 25% y 50%) de ceniza volante procedente de la Central térmica de Andorra (Teruel, Aragón, España) a fin de evaluar su comportamiento después de un considerable tiempo de curado (56 días) ante efectos de carbonatación acelerada.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño de mezcla

Para la elaboración de los especímenes se tomó como referencia una geometría y diseño de mezcla previamente discutidos en la literatura (13). En la figura 1 se muestra la geometría del espécimen y en la tabla 1 se muestra la cuantificación de materiales.

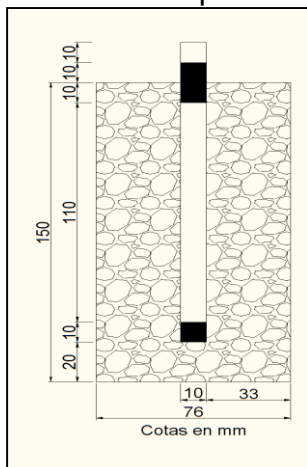


Figura 1. Esquema de fabricación de la probeta de hormigón.

Tabla 1. Cuantificación de materiales por mezcla.

Resistencia a la compresión esperada (kg/cm ²)	Contenido de agua (kg/m ³)	Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación a/cm	Contenido de arena (kg/cm ³)	Contenido de grava (kg/cm ³)
350	245.3	533	0.46	558	754
250	236.9	402	0.59	637	754
200	241.9	346	0.70	645	754

Matriz de mezclas.

En la figura 2 se muestra la matriz de mezclas utilizadas en el experimento.

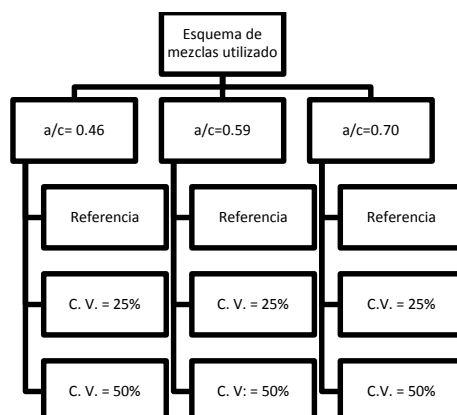


Figura 2. Matriz de mezclas utilizadas en el experimento.

Ensayes

Probetas para ensayos de Corrosión.

Se elaboraron especímenes cilíndricos de concreto de 7.5x15 cm con acero al carbono grado 42 embebido de acuerdo a diseño como se mostró en la figura 1, teniendo como parámetros tres relaciones agua/cemento (0.46, 0.59 y 0.70) y tres contenidos de ceniza volante (0%, 25% y 50%) en sustitución por peso de cemento Portland y se procedió al curado mediante cámara húmeda por 56 días.

Exposición de probetas.

En la figura 3 se muestra como los especímenes se expusieron a carbonatación acelerada mediante su colocación en un desecador conectado a un tanque de CO₂.



Figura 3. Probetas en cámara de carbonatación acelerada.

La cámara de carbonatación consiste en un desecador al que se había conectado una bala de CO₂ (riqueza > 99.9%, seco). El flujo de CO₂ que se empleó fue continuo y con caudal aproximado de 10 ml/min. Para simplificar, en este trabajo se hace referencia a que la atmósfera generada en la cámara es del 100% de CO₂, aunque debido a la humedad de su interior, la concentración de CO₂ es ligeramente inferior. La temperatura de la cámara de carbonatación se mantuvo entre 18° y 20° C durante todo el proceso, y la humedad relativa de la misma se controló de forma que estuviera en un intervalo comprendido entre el 60 y 70%. Para ello se introdujo una mezcla de glicerina con agua destilada en el fondo del desecador; esto en concordancia con la norma DIN 50 008 que eliminó el exceso de humedad producida durante el proceso de carbonatación. La elección de la humedad relativa se hizo para acelerar al máximo la velocidad de carbonatación. Como se describió en la introducción de este trabajo, la máxima velocidad de carbonatación tiene lugar para una humedad relativa del 65% (14) (15).

Medición de probetas mediante la técnica de resistencia a la polarización (Rp).

Los especímenes fueron monitoreados mediante la técnica electroquímica de Resistencia a la polarización (Rp) en un potencióstato / galvanostato EG&G modelo 362 de Princetone Applied Research, con una configuración de 3 electrodos para obtener la velocidad de corrosión instantánea. La figura 5 muestra el equipo, mientras que la figura 6 muestra la configuración de tres electrodos usada en la medición de la velocidad instantánea.



Figuras 5 (izquierda) y 6 (derecha). Imagen del potencióstato y la configuración de medición.

RESULTADOS

En la figura 7 se muestra el monitoreo de las probetas con relación agua/cemento de 0.46, la figura 8 muestra los resultados de las probetas con relación agua/cemento de 0.59; Finalmente la figura 8 muestra las probetas con relación agua/cemento de 0.70.

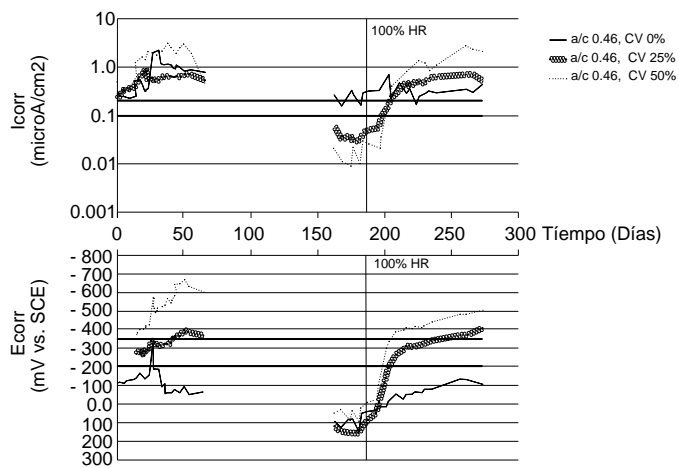


Figura 7. Gráfico del monitoreo de las probetas de relación $a/c = 0.46$.

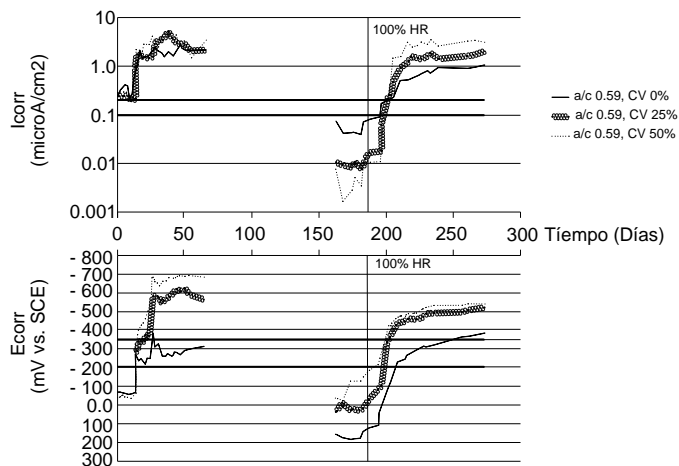


Figura 8. Gráfico del monitoreo de las probetas de relación $a/c = 0.59$.

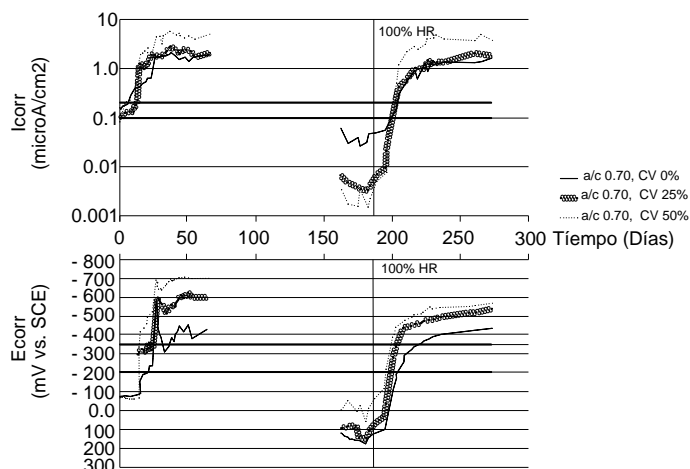


Figura 9. Grafico del monitoreo de las probetas de relación $a/c = 0.70$.

Discusión.

Cuando se analizan las gráficas en que se varía el contenido de Ceniza volante, dejando fija la relación a/c , se observa un mejor comportamiento general de la probeta sin adición mineral, sin embargo la sustitución del un 25% de ceniza volante muestra valores en rangos cercanos a la de 0 % CV, comportándose incluso muy similar para relación $a/c = 0.70$.

Es notable como para el periodo comprendido entre 150 y 180 días las probetas disminuyen su velocidad de corrosión a valores de corrosión despreciables que inclusive son menores a los observados al inicio del estudio; esta disminución es mayor conforme se incrementa el contenido de sustitución de CV.

En la misma línea para el periodo comprendido entre 150 y 180 días es notable el mejor desempeño de las mezclas con adición mineral (a mayor porcentaje de sustitución de C V, menor es la corrosión); comportamiento que no queda muy claro hasta establecer las posibles causas ambientales o del material que favorecieron el cambio en los mecanismos de corrosión de dichas mezclas; Se observa además, como la mezcla con 0% de C V tiende a igualar este comportamiento conforme se incrementa la relación a/c , tendencia a la que no hemos encontrado una explicación y que probablemente se deba a los distintos contenidos de material cementante utilizados para cada mezcla en función de la relación a/c .

Conclusión.

En resumen la mezcla sin adición mineral (0% de C V) se comporto mejor ante la carbonatación acelerada, sin embargo la sustitución de un 25% no se alejó mucho de este comportamiento, llegando incluso a igualarlo en la relación $a/c = 0.7$. Comportamiento esperado considerando que la sustitución de Ceniza volante consume hidróxido de calcio para su hidratación lo cual nos haría pensar que a mayor contenido de sustitución de C V mayor será la caída del PH y aunque la matriz se densifica, esta densificación en ocasiones no es suficiente para compensar la pérdida de alcalinidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo en el departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior en la Universidad de Alicante (UA), España. Bajo el auspicio del Dr. Pedro Garcés Terradillos, Dr. José Manuel Mendoza Rangel, Dr. Pedro Castro Borges, el Dr. Emilio Zornoza, así personal técnico y de apoyo de la UA; Contando con el financiamiento del Conacyt: Beca Nacional Convocatoria: 290604 (No. de apoyo: 309129), Beca mixta: Beca 2012-2013 movilidad en el extranjero (290674), la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad de Alicante

REFERENCIAS

1. **Aitcin, P. C.** *Blinders for Durable and Sustainable Concrete* (Modern Concrete Technology Series). s.l.: Routledge, 1er. edition, August 20, 2007, pág. 49.
2. **Aitcin, Pierre-Claude.** *El futuro del concreto y el concreto del futuro*. Monterrey, N. L., México: Conferencia técnica ofrecida por la sección Noreste de México del American Concrete Institute (ACI) y la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, 2007.
3. **Aitcin, Pierre - Claude.** *Cement and Concrete Development from an Environmental Perspective*. [ed.] Odd Gjorv y Koji Sakai. *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*. 2000, pág. 210.
4. **Environmental Protection Agency.** *AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Washington, D. C.: s.n., 2005. Vol. Volumen I: Stationary point and Area Sources.
5. **Marceau, y otros.** *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture, SN2095b*. Skokie, Il: Portland Cement Association, 2006. pág. 69.
6. **Marceau, Medgar L., Nisbet, Michael A. y VanGeem, Martha G.** *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*. skokie, Il.: Portland Cement Association , 2007. SN3011.
7. **Pade, Claus y al, et.** *The CO₂ Uptake of Concrete in the Perspective of Life Cycle Inventory*. *International Symposium on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*. Lillehammer, Norway : s.n., September, 2007.
8. **Idorn-Gunna, M. I.** Durabilidad del concreto y economía de recursos. *Construcción y Tecnología*. Marzo, pp.46-48, (1ra. parte) y abril, pp.44-46, (2da. y última parte) de 1992.
9. **Mehta, Kumar.** Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*. October 2001.
10. **Scrivener, K. L.** Properties, applications and practicalities of special cements. *11th International Congress on the Chemistry of Cement*. Durban: South Africa, 2007.
11. **Valdez Tamez, Pedro Leobardo.** Tesis Doctoral con especialidad en Ciencias de Materiales. *Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en el cemento*. Monterrey, N. L., México: Facultad de Ingeniería Mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002.
12. **Malhotra, V. M.** Role of Supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. *Proc. Int. Conference on Infrastructure Regeneration and Rehabilitation-*

Improving the Quality of Life through better Construction A Vision for the Next Millennium. s.l.: R. N. Swamy, Sheffield Academics Press, 1999, págs. 27-42.

13. **Castro-Borges, P.** Difusión y Corrosión por iones Cloruro en el Concreto Reoforzado. México: Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 1995. pág. 169.

14. **Lo, Y y Lee, H. M.** 2002, *Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy.* Building and Environment, Vol. 37, págs. 507-514.

15. **Lange, L. C., Hills, A. B. y Poole, A. B.,** *The influence of mix parameters and binder choice on the carbonation of cement solidified wastes.* 1996, Vol. 16, págs. 749-756.

INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO DE VIGAS CONTINUAS DE CONCRETO PARCIALMENTE PRESFORZADO CON TENDONES NO-ADHERIDOS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS DEFLEXIONES

A.A. Elias¹, C.A. Juárez², A. Durán² D. Carreira³

1. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León, C.P. 66451, México.
2. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
3. Profesor Asociado, Civil and Architectural Engineer, Illinois Technology Institute (IIT), Chicago Ill., USA.

RESUMEN

En concreto parcialmente presforzado se permiten tensiones para cargas de servicio presentándose agrietamientos y con ello la pérdida de rigidez de su sección transversal. Utilizando las recomendaciones de diseño y la normativa vigente se puede garantizar la capacidad por última resistencia y los criterios de servicio de los elementos continuos parcialmente presforzados con tendones no adheridos, sin embargo, no hay suficiente investigación para estimar con mayor precisión los parámetros requeridos para su revisión y diseño. La presente investigación en progreso, consiste en la realización de estudios experimentales, con el objetivo de evaluar el comportamiento a la flexión para diferentes etapas de carga determinando los esfuerzos y las deformaciones relacionando el grado de agrietamiento con la pérdida de rigidez y, su influencia sobre las deflexiones. Se consideran variables como la longitud de los claros continuos, la sección transversal y la relación de presforzado parcial.

Palabras clave: presforzado parcial, vigas continuas, tendones no-adheridos, deflexiones, agrietamientos.

ABSTRACT

In partially prestressed concrete beams in service load stage tensions are allowed generating cracks and thereby loss of rigidity of the cross section. Using design recommendations and recent building codes can guarantee the ultimate strength capacity and serviceability criteria of partially prestressed continuous concrete beams with unbonded tendons, however, there is not enough research for estimating accurately the parameters required for review and design. This research in progress, consists in performing of experimental studies in order to evaluate the flexural behavior for different load stages quantifying the stresses and strains relating the degree of cracking with the loss of structural rigidity and its influence on the deflections. The specimens to be examined take into account variables such as the length of the continuous spans, the cross section and the partial prestressed ratio.

Keywords: partial prestressing, continuous beams, unbonded tendons, deflections, cracking.

INTRODUCCIÓN

La idea original del diseño de los elementos de concreto presforzado consistía en crear compresiones al concreto sin permitir esfuerzos de tensión para cargas de servicio (Presforzado total), posteriormente algunas investigaciones mostraron que estos elementos tenían una mayor capacidad a la flexión al considerar cierta cantidad de acero de refuerzo adicional (Presforzado Parcial). Para el comportamiento bajo cargas factorizadas no hay diferencia entre ambos criterios, la diferencia estaría en el comportamiento bajo cargas de servicio en la que en el presforzado parcial existirían tensiones que producirían algún agrietamiento, dependiendo del porcentaje de las cargas vivas sobre el elemento, las cuales deben ser tomadas con la utilización de este acero de refuerzo adicional¹.

Para un elemento de concreto parcialmente presforzado, se debe tomar en cuenta los estados límite de falla a flexión, cortante y torsión incluyendo anclaje y adherencia y, también de manera muy importante, los estados límite de servicio en los que se deben considerar la revisión de los esfuerzos de tensión y compresión, de los cambios de esfuerzos en el acero de presfuerzo, en el acero de refuerzo y en el concreto, del ancho de grieta máximo, de la contraflecha y deflexiones, y además, del efecto del medio ambiente que pudiera producir corrosión en el acero.

Particularmente, para la etapa de servicio, los esfuerzos actuantes se deben revisar con respecto a los valores admisibles de tensión y compresión conforme a las recomendaciones y códigos vigentes^{2, 3}, sin embargo, los esfuerzos de tensión pueden sobrepasar dichos límites en el caso de elementos de concreto parcialmente presforzado siempre que el ancho de grieta que se presente esté por debajo de su valor máximo permisible. Este incremento de los valores de tensión en elementos de concreto parcialmente presforzado, genera un aumento del grado de agrietamiento y con ello el aumento de las deflexiones, por lo que es muy importante evaluar y controlar los anchos de grieta y su espaciamiento^{4, 5, 6}.

En la mayor parte de los casos prácticos que se relacionan con este tipo de elementos parcialmente presforzados, se utilizan cables no-adheridos, sobre todo en elementos de poco peralte como lo son las losas continuas en una y en dos direcciones. Tomando en consideración esta situación, otros factores que influyen en el comportamiento de este tipo de elementos son los esfuerzos de los propios cables no-adheridos, la resistencia a la compresión del concreto, la resistencia en el límite de fluencia del acero de refuerzo y de presfuerzo, la relación de presforzado parcial, la relación claro-peralte, la trayectoria de los cables, el tipo de cargas (concentradas, uniformemente distribuida, etc.), el patrón de carga en elementos continuos (uniforme, en claros alternos, claros adyacentes, etc.) y los esfuerzos en los tendones después de las pérdidas de presfuerzo. Para tomar en cuenta estos factores, desde hace varios años, se han realizado diferentes investigaciones ^{7, 8} de las que algunos de sus resultados se han plasmado en los códigos vigentes y se ha llegado a la conclusión de que el comportamiento de este tipo de elementos resulta similar al comportamiento de elementos de concreto reforzado.

Por otro lado, algunos autores ^{9,10} han realizados estudios para determinar la deformación con relación al agrietamiento de vigas de concreto parcialmente

presforzadas en donde se toma en cuenta la plasticidad del acero, el comportamiento no lineal del concreto a compresión y la deformación del concreto en la zona de tensión.

Otros estudios¹¹⁻¹⁵ se han enfocado principalmente a la capacidad a la flexión de vigas y losas en una dirección para estimar los esfuerzos y cambios de esfuerzo en el acero de presfuerzo en la etapa de cargas últimas tomando en cuenta factores como la resistencia a la compresión del concreto, el tipo de carga, la distribución de la carga, la relación claro-peralte, la relación de presforzado parcial, etc. En base a los resultados de diferentes estudios se han propuesto fórmulas para determinar el esfuerzo en los cables de presfuerzo adheridos y no-adheridos.

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

A pesar de las investigaciones que se han realizado se considera que todavía es necesario realizar estudios experimentales para generar una normatividad más precisa sobre los elementos continuos de concreto parcialmente presforzado con tendones no-adheridos por lo que la presente investigación se llevó a cabo con el objetivo de determinar la relación entre el grado de agrietamiento en las zonas de momento negativo y positivo y las deflexiones tomando en cuenta la relación entre los claros adyacentes, la magnitud de las cargas y la relación de presforzado parcial, lo cual influye en la pérdida de rigidez de la sección transversal y consecuentemente sobre las deflexiones.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los especímenes que serán examinados consideran diferentes variables como la relación entre la longitud de los claros continuos, la sección transversal y la relación de presforzado parcial (PPR). Se analiza la influencia de estas variables en el comportamiento de estos elementos principalmente en cuanto al agrietamiento y las deflexiones. Todas las vigas serán ensayadas a flexión con cargas concentradas para producir altos niveles de esfuerzos que generen agrietamientos y deflexiones en las zonas de momentos positivos y negativos.

Identificación de especímenes para los ensayos

Para llevar a cabo la experimentación se fabricaron dos series de 12 vigas cada una. La primera serie tiene una sección transversal rectangular sólida ($h \times b$) de 150 x 300 mm y dos longitudes, 7.5 y 8.7 m. La segunda serie tiene una sección transversal ($h \times b$) de 150 x 500 mm formada por dos nervaduras longitudinales ("U" invertida), también con longitudes de 7.5 y 8.7 m. Ambos tipos de vigas se apoyaron de manera continua con claros de 2.4-2.4-2.4 y 2.4-3.6-2.4 m, considerando diferentes relaciones de presforzado parcial (PPR) como se identifica en la tabla 1.

Materiales para la fabricación de las vigas

Todas las vigas se reforzaron con dos cables de acero de presfuerzo de 7 alambres de baja relajación de 10 mm de diámetro Grado 270K, con varillas corrugadas de 8 mm (5/16") de diámetro Grado 42 ($f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$), como refuerzo longitudinal en diferentes cantidades según la relación de presforzado parcial y estribos de alambón

de 6 mm (1/4") de diámetro Grado 28 ($f_y = 2800 \text{ Kg/cm}^2$) como refuerzo por cortante. Se utilizó un concreto de peso normal con una resistencia mínima a la compresión f'_c a los 28 días de 35 MPa. El tensado de los cables se realizó con dos gatos de manera simultánea con anclaje exterior del tipo placa, barril y cuña. Los anclajes muertos se consideraron en forma de "U" los cuales fueron fabricados con placa de acero estructural A-36 ($f_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$) a base de tubo circular de 200 mm de diámetro en secciones de 25 mm.

Descripción de los especímenes

En la figura 1 se muestran las dimensiones generales, las secciones transversales y la cantidad de cables de acero de presfuerzo y de acero de refuerzo longitudinal el cual varía de acuerdo a la relación de presfuerzo parcial (PPR). Los estribos utilizados para cortante de 6 mm de diámetro variaron con separaciones de 60, 80 y 100 mm según el tipo de viga con relación a su capacidad de carga estimada para garantizar la falla a la flexión.

Tabla 1 —Identificación de vigas continuas para los ensayos

Claros continuos de 2.4-2.4-2.4 m			
Sección de 150 x 300 mm		Sección de 150 x 500 mm (sección U invertida)	
PPR = 0.79	2 vigas (V-1)	PPR = 0.79	2 vigas (V-4)
PPR = 0.66	2 vigas (V-2)	PPR = 0.66	2 vigas (V-5)
PPR = 0.50	2 vigas (V-3)	PPR = 0.50	2 vigas (V-6)
Claros continuos de 2.4-3.6-2.4 m			
Sección de 150 x 300 mm		Sección de 150 x 500 mm (sección U invertida)	
PPR = 0.79	2 vigas (V-7)	PPR = 0.79	2 vigas (V-10)
PPR = 0.66	2 vigas (V-8)	PPR = 0.66	2 vigas (V-11)
PPR = 0.50	2 vigas (V-9)	PPR = 0.50	2 vigas (V-12)

La trayectoria de los cables de presfuerzo para la fabricación de las vigas continuas, indicada en la figura 2, sigue una configuración parabólica cóncava o convexa a lo largo de su longitud de acuerdo con las zonas de momento positivo y negativo, excepto que se consideran tramos rectos de 600 mm al centro de los claros de 2.4 m y un tramo recto en el tercio medio del claro central para las vigas con el claro intermedio de 3.6 m en donde se estarán aplicando las cargas concentradas de acuerdo al esquema propuesto para observar el comportamiento en cuanto agrietamientos y deflexiones bajo las diferentes etapas de carga consideradas para este estudio.

Instrumentación de las vigas

La instrumentación de las vigas se realizó colocando deformímetros eléctricos en el acero de refuerzo, en los cables de presfuerzo y en el concreto en las zonas de momento positivo y negativo (ver figuras 2, 3 y 4). Con esta instrumentación, se monitorea las deformaciones y los esfuerzos en estos materiales desde la fabricación de las vigas hasta la aplicación de las cargas de ensaye, pasando por la etapa de transferencia del presfuerzo.

Fabricación de vigas de concreto

La fabricación del concreto para las 24 vigas se realizó conforme a la norma ASTM C-31¹⁶ considerando la misma relación agua-cementante en todos los casos ($A/C = 0.5$). El colado se llevó a cabo en una sola operación para cada serie de dos vigas gemelas en un solo día, es decir, exactamente con las mismas características dimensionales y de contenido de acero de refuerzo y de presfuerzo. Se consideró un proporcionamiento para lograr por lo menos una resistencia f'_c de 35 MPa (350 Kg/cm²) en el que se incluyó un aditivo superplastificante para mejorar la trabajabilidad para obtener un revenimiento de 20 +/- 1 cm. Se tomaron muestras de concreto en cilindros de 10 x 20 cm, para monitorear la resistencia del concreto a diferentes edades conforme a la norma ASTM C-39¹⁷. Al mismo tiempo, se tomaron muestras de concreto en barras de 76x76x280 mm para verificar la contracción del concreto con el transcurso del tiempo basándose en la norma ASTM C-157¹⁸.

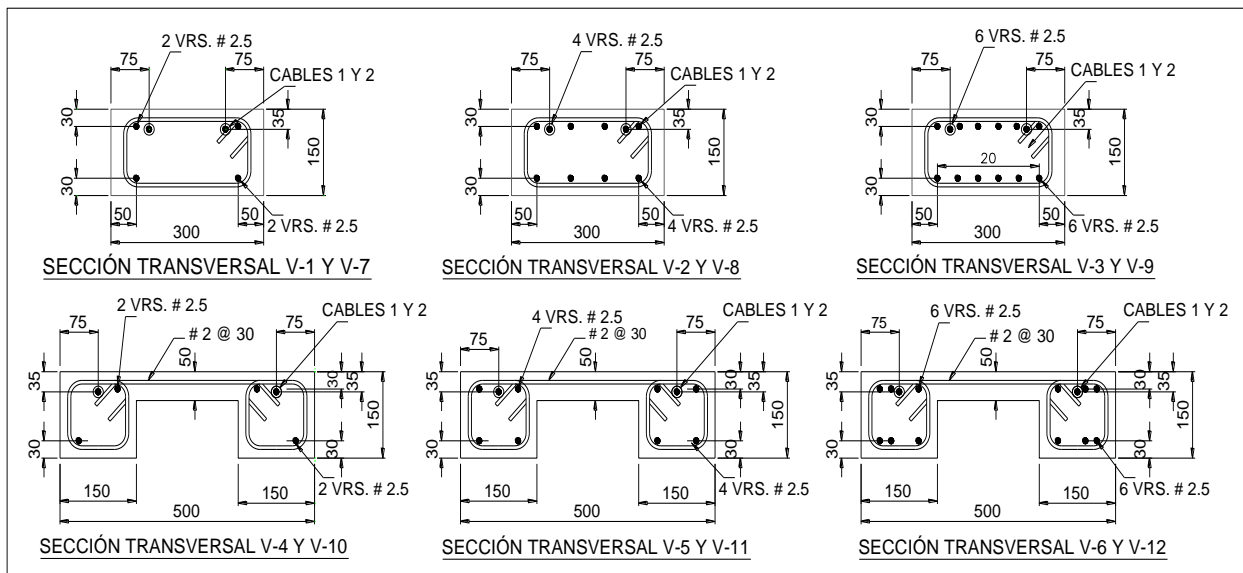


Figura 1 Secciones transversales de vigas de investigación.

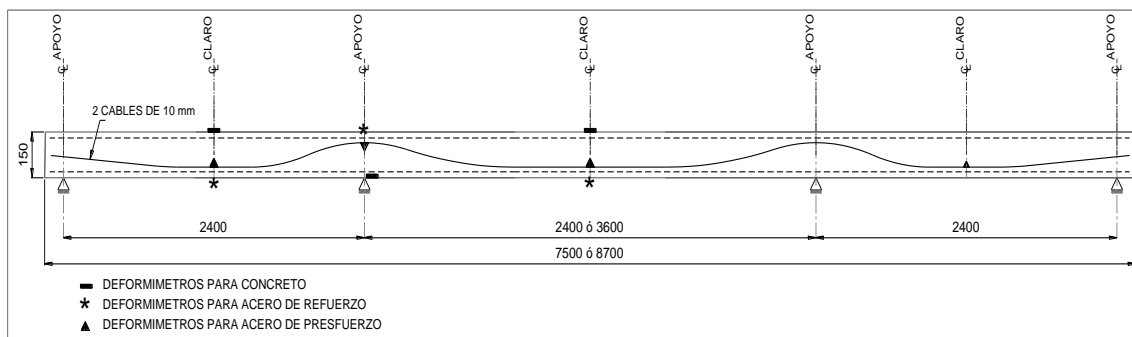


Figura 2 Trayectoria de cables y localización de deformímetros eléctricos.

Tensado de cables de presfuerzo

Durante la aplicación de la fuerza de presfuerzo se colocaron sensores de

desplazamiento en ambos extremos para medir los acortamientos longitudinales de las vigas y se midieron las deformaciones que se generaron en el acero de presfuerzo, en el acero de refuerzo y en el concreto a través de los deformímetros eléctricos colocados como se mencionó anteriormente.

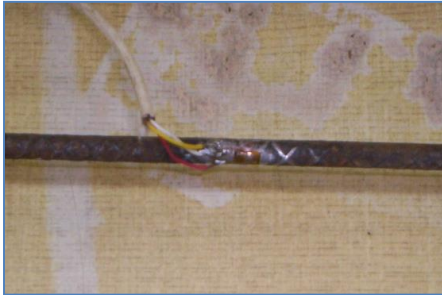


Figura 3 Colocación de deformímetros eléctricos tipo EA-06-250BG-120 en el acero de refuerzo.

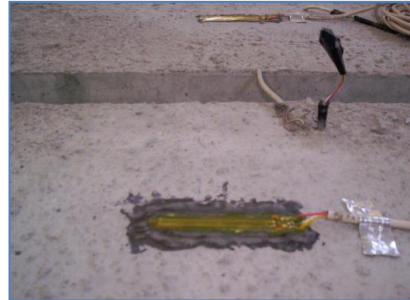


Figura 4 Colocación de deformímetros eléctricos tipo EA-06-20CBW-120 en el concreto.



a) Colocación.



b) Protección

Figura 5 Colocación de deformímetros tipo EA-06-125BT-120 opción LE en cables de acero de presfuerzo.

Aplicación de las cargas

Se aplicará un par de cargas concentradas en cada claro espaciadas 60 cm entre sí en el centro de los claros de 2.4 m de longitud y a los tercios de los claros de 3.6 m (ver figura 6). La magnitud de las cargas se estimó previamente conforme a la capacidad de las vigas tomando en cuenta las secciones transversales de concreto y la cantidad de acero de presfuerzo y de refuerzo según el tipo de viga descrito anteriormente.

La carga aplicada será la correspondiente al 50, 70, 100 y 125 % de la carga estipulada de servicio determinada en base a la capacidad a la flexión teórica considerando un esfuerzo último de los cables de acero de presfuerzo (fps) según la ecuación 18.4 del código ACI-318². La carga total aplicada varía desde 27.6 KN para la viga V-1 hasta 49 KN para la viga V-12.

Mediciones de prueba

Previo a la realización de los ensayos se colocarán sensores de desplazamiento en los tres centros del claro de cada una de las vigas para medir las deflexiones en las

diferentes etapas de carga mencionadas. Al mismo tiempo, también se utilizarán sensores en el extremo de las vigas para medir los acortamientos o alargamientos durante los ensayos.

Por otro lado, se observará la cantidad y distribución de los agrietamientos y se medirán los anchos de grietas con un microscopio óptico portátil para cada una de las etapas de carga mencionadas.

Durante los ensayos, se utilizará un equipo de adquisición de datos con el que se registrarán las lecturas de deformaciones y desplazamientos correspondientes a los deformímetros eléctricos incluidos en el acero de presfuerzo, en el acero de refuerzo y en el concreto; los transductores y las celdas de carga y, los sensores de desplazamiento que se colocaron al centro de cada claro y en los extremos. Estos valores se obtendrán para cada una de las etapas de aplicación de cargas.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESPERADOS

Se obtendrán las deformaciones en el acero de refuerzo, en el acero de presfuerzo y en el concreto mediante los deformímetros colocados en las zonas marcadas para las diferentes etapas de carga mencionadas, incluyendo la etapa de carga máxima de falla. Además se determinaran las deflexiones al centro de los tres claros, los acortamientos elásticos longitudinales y al mismo tiempo, se observará el grado de agrietamiento, incluyendo la obtención de los anchos de grieta, para cada nivel de carga y se relacionaran de manera analítica con las deflexiones que se generaran durante la aplicación de las cargas.

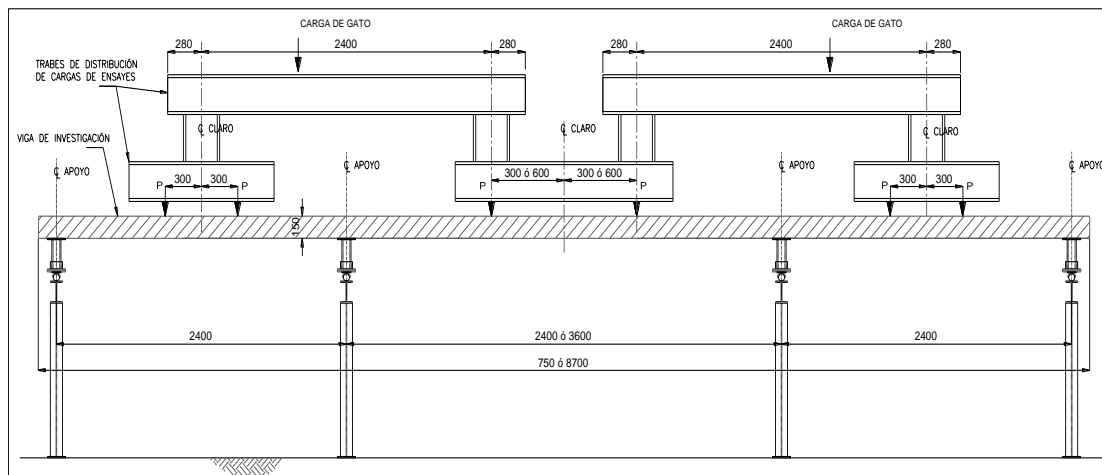


Figura 6. Aplicación de cargas en vigas continuas

Las ecuaciones que se utilizan actualmente para el cálculo de deflexiones y agrietamientos son empíricas y se desarrollaron hace algunos años aunque todavía se sigue investigando al respecto. Se pretende proponer ecuaciones que relacionen los esfuerzos de los materiales, las deflexiones y los agrietamientos para lograr una mayor exactitud en la determinación de estos parámetros tan importantes para la etapa de servicio. Se compararan los resultados de estos ensayos, con los cálculos determinados a partir de un procedimiento de análisis momento-curvatura para

elementos con cables adheridos.

Por otro lado, para estimar el ancho de grieta y las deflexiones se hará una comparación con las ecuaciones propuestas por diferentes autores y se propondrán ecuaciones que contemplen el cambio de esfuerzos en el acero de presfuerzo, las características de la sección transversal de concreto y la cantidad de acero de refuerzo y de presfuerzo.

CONCLUSIONES

Con base en esta investigación se propondrán ecuaciones con la idea de predecir con mayor exactitud el comportamiento de las vigas de concreto parcialmente presforzadas con tendones no adheridos para la etapa de cargas de servicio.

Se puede correlacionar el comportamiento de los elementos presforzados con tendones no adheridos con un análisis momento-curvatura siguiendo algunas consideraciones que modifican el comportamiento para cables adheridos como los esfuerzos y deformaciones que se presentan en los cables conforme a las deformaciones generales de las vigas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) de la UANL, por su apoyo financiero a esta investigación. También, se agradece al Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, por su participación con la infraestructura necesaria para llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

1. Lin T. Y., Burns Ned H., Design of Prestressed Concrete Structures (New York (USA): John Wiley and Sons, 1982)
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318-2008) and Commentary (Farmington Hills, MI (USA): ACI, 2008).
3. ACI-ASCE Committee 423, "Recommendations for Concrete Members with Unbonded Tendons", ACI-ASCE Committee Report 423.3R-05, (Farmington Hills, MI (USA): ACI, 2005).
4. ACI Committee 224, "Control of Cracking in Concrete Structures", ACI Committee Report 224R-1999, (Farmington Hills, MI (USA): ACI, 2001).
5. ACI Committee 435 (2000), "Control of Deflection in Concrete Structures", ACI Committee Report 435R-1995, (Farmington Hills, MI (USA): ACI, 2000).
6. Nawy Edward G., Prestressed Concrete, A Fundamental Approach (New Jersey (USA): Pearson Prentice Hall, 2006).
7. Naaman A. E., Harajli M. Wight J., "Analysis of Ductility in Partially Prestressed Concrete Flexural Members" PCI Journal 15, 3(1986): pp. 64-87.
8. Naaman A. E., "Analysis and Design of Partially Prestressed Concrete Beams", Chicago Illinois (USA): University of Illinois (1982).

9. Chern J., You C., Bazant Z., "Deformation of Progressively Cracking Partially Prestressed Concrete Beams", PCI Journal, 37, 1 (1992): pp. 74-84.
10. Chowdhury S., "Damping Characteristics of Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams", Ph D Thesis, School of Engineering, Faculty of Engineering, Griffith University, Queensland, Australia, (April 1999).
11. Harajli M., and Hijazi S., "Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Partially Prestressed Concrete Members" PCI Journal 36, 1 (1991): pp. 62-82.
12. Allouche E., Campbell I., Green M., Soudki K., "Tendon Stress in Continuous Unbonded Prestressed Concrete Members-Part 1: Review of Literature", PCI Journal 12, 6 (1998): pp. 86-93.
13. Allouche E., Campbell I., Green M., Soudki K., "Tendon Stress in Continuous Unbonded Prestressed Concrete Members-Part 2: Parametric Study", PCI Journal 44, 1 (1999): pp. 60-78.
14. Diep B., NIWA J., "Prediction of Loading-Induced Stress in Unbonded Tendons at Ultimate", Tokio, Japan, Dept. of Civil Engineer, Tokio Institute of Technology (2006).
15. Harajli M., "Tendon Stress at Ultimate in Continuous Unbonded Post-Tensioned Members: Proposed Modification of ACI 318, Eq. (18-4) and (18-5)", ACI Structural Journal 109, 2 (2012): pp. 183-192.
16. ASTM C 31 - 00, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, (West Conshohocken: PA, (USA): ASTM, 2000).
17. ASTM C 39 - 04, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (West Conshohocken: PA, (USA): ASTM, 2004).
18. ASTM C 157 - 99, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement, Mortar and Concrete, (West Conshohocken: PA, (USA): ASTM, 1999).



CONVOCATORIA 2015

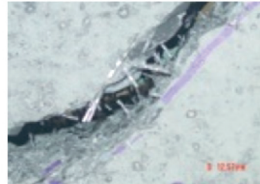
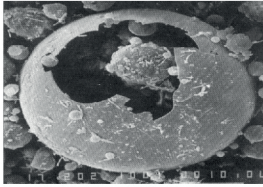
La Facultad de Ingeniería Civil a través de la Subdirección de Estudios de Posgrado



Convocan a egresados de Ingeniería Civil y áreas afines a ingresar a sus programas de posgrado:

DOCTORADO EN INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL



Requisitos de Ingreso

- ✓ Título o pasantía de maestría, afín a las áreas de interés.
- ✓ Tener promedio mayor ó igual a 80 sobre 100.
- ✓ Presentar y aprobar el Examen General de Conocimientos (EXANI III) del CENEVAL y el Examen de Competencia en inglés (EXCI).
- ✓ Cumplir con lo establecido sobre los procedimientos de admisión y permanencia de los estudiantes señalados en el Departamento de Escolar y Archivo de la UANL, la Dirección de Estudios de Posgrado de la UANL y la Subdirección de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil.
- ✓ Entrevistarse con al menos tres profesores del programa, miembros del comité de ingreso.
- ✓ Asistir a los cursos propedéuticos referentes a la metodología científica y en diversos temas en las áreas afines.
- ✓ Aprobar exámenes teóricos conceptuales de metodología científica y en diversos temas en las áreas de interés.
- ✓ Entregar oficio en donde se expongan los motivos para solicitar el ingreso al programa.
- ✓ Tres cartas de recomendación de personalidades de reconocido prestigio o desempeño profesional de preferencia en áreas de investigación y/o desarrollo tecnológico.
- ✓ Ser estudiante de dedicación exclusiva.
- ✓ Ser aceptado por la Subdirección de Estudios de Posgrado de la FIC.

Documentos requeridos

- ✓ Acta de nacimiento
- ✓ Curriculum vitae
- ✓ Seis fotografías tamaño infantil (color) fondo blanco
- ✓ Título y cédula profesional
- ✓ Copia de kárdex
- ✓ Escrito donde expresen los motivos para ingresar al Programa del Posgrado
- ✓ Certificados originales de secundaria, preparatoria y licenciatura (Egresados ajenos a la UANL)

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado

Registro 2015 en la página oficial de la U.A.N.L.

www.uanl.mx

PERÍODO OFICIAL DE REGISTROS	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXCI	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXANI-III
1 al 20 de noviembre de 2014	28 de noviembre de 2014	29 de noviembre de 2014
1 al 18 de diciembre de 2014	9 de enero de 2015	10 de enero de 2015

Para ampliar la información

<http://www.fic.uanl.mx/posgrado/oferta/>

Dr. César A. Juárez Alvarado

Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Av. Universidad s/n
Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza
Nuevo León, México 66450

Tels: (81) 1442 4400 ext. 4447, 4448, 5206
(81) 8329 4000 ext. 7216, 7234

Correo electrónico:

cesar.juarezal@uanl.edu.mx

cesar.juarez@uanl.mx



"Educación de clase mundial, un compromiso social"



VI
CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

T3.- PRESERVACIÓN, DE PATRIMONIO EDIFICADO



EVALUACIÓN DEL DETERIORO DE MATERIALES DE EDIFICIO HISTÓRICO: CASO DEL INTERIOR DEL FUERTE DE SAN JUAN DE ULUA

R. Orozco-Cruz¹, C. M. Abreu-Fernández², R. Galván-Martínez¹

¹ Universidad Veracruzana. Instituto de Ingeniería. C.A. Ingeniería de Corrosión y Protección. S. S. Juan Pablo II, s/n, c. P. 94294, Boca del Río, Veracruz, México.

² Universidad de Vigo. ETSEI. Departamento de Materiales. Grupo de Materiales. Vigo, España.

RESUMEN

La fortaleza de San Juan de Ulúa, localizada en el Puerto de Veracruz, México; está expuesta a condiciones ambientales muy adversas como lo son: alta temperatura y elevada concentración de cloruros y humedad relativa, esto afecta en gran medida el aspecto e integridad de este conjunto histórico construido con piedra coralina del lugar y concreto reforzado. En este trabajo se evalúa el grado de deterioro de los materiales de construcción empleados en la fortaleza. Tras las pruebas iniciales in situ, que incluyen la inspección visual, toma de muestras y mediciones químicas, en el segundo paso, se procedió a la caracterización química, morfológica y estructural de los materiales seleccionados, para ello se emplearon diferentes técnicas como son: XRF, DRX, IR así como MIP, MO y SEM con EDX.

Los resultados muestran un importante grado de deterioro de los materiales estudiados, gran cantidad de productos de corrosión y una elevada concentración de cloruros.

Palabras claves: Patrimonio histórico, deterioro, técnicas de caracterización, microscopía, ambiente marino.

ABSTRACT

The fortress of San Juan de Ulúa, located in the Port of Veracruz, México is submitted at extremely adverse environment conditions with high temperature, chloride concentration and relative humidity. All these parameters affect to the aspect and integrity of these historical buildings, constructed using stone, limestone and reinforcement concrete. This work assesses the deterioration degree of the materials used in the construction of the fortress of San Juan de Ulúa. We carried out initial in-situ tests, which included visual inspection, sampling and chemical measurements. In a second step, chemical, morphological and structural characterization was performed using different techniques: XRF, XRD, IR, MIP, OM and SEM with EDX. The results show an important deterioration degree of the materials studied, large amount of corrosion products and high chloride concentration.

Keywords: Cultural heritage, deterioration, characterization techniques, microscopy, marine environment

INTRODUCCIÓN

La adecuada protección de los materiales de construcción constituye una tarea esencial para la sociedad actual. Una mención especial debe recibir el concreto armado, cuyo uso se ha venido incrementando en las últimas décadas hasta llegar a convertirse en el material más empleado en la industria de la construcción debido al óptimo acoplamiento de propiedades de dos materiales relativamente baratos: acero y concreto, que reunidos en un material mixto, le dotan de la destacada resistencia a la tracción del primero y de la buena resistencia a la compresión del segundo.

El puerto de Veracruz, en la zona del Golfo de México, por su ubicación geográfica, además de la alta temperatura ambiental sufre frecuentes ciclones y frentes fríos en invierno y en primavera, y su atmósfera es extremadamente adversa con elevada concentración en cloruros y alta humedad relativa. Todos estos condicionantes hacen que la protección adecuada de los materiales de construcción.

El presente trabajo se centra en el estudio y evaluación del deterioro de los materiales que se encuentran en el fuerte de San Juan de Ulúa, uno de los siete fuertes erigidos entre los Siglos XVI y XVII para proteger a las ciudades más prosperas de la Nueva España. Esta fortaleza, es testigo mudo del paso de la historia de México y se encuentra edificado en un islote frente al actual puerto de Veracruz. Su origen está ligado a la fundación de la Villa Rica de la Vera Cruz, el 22 de abril de 1519. Hacia 1535 se inició la construcción de la fortificación con el fin de proteger el fondeo de las embarcaciones por el mal tiempo, así como también la defensa del puerto de Veracruz de los ataques de piratas y filibusteros. (Sahagún, 1938)

Todos los materiales utilizados en la construcción de esta fortificación, tanto los metálicos como los materiales cerámicos (fundamentalmente piedra y coral propio de la zona), por su composición química y grado de porosidad (cerámicos) o estado superficial (metales) pueden sufrir alteraciones al entrar en contacto con el medio que lo rodea, produciéndose distintos tipos de corrosión o deterioro, por lo que resulta de vital importancia la protección de los mismos. Ante esto es importante conocer los mecanismos de degradación así como las posibles alternativas de protección y/o conservación.

El objetivo central es dar a conocer los avances de resultados que se han obtenido en la experimentación con los distintos materiales existentes en la fortaleza. Estos trabajos consistieron en la inspección y evaluación del grado de deterioro de los materiales que conforman las principales edificaciones de la Fortaleza de San Juan de Ulúa en el Puerto de Veracruz, México.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Etapas 1: Valoración macroscópica del inmueble.

Inspección in situ. Este apartado incluyó la inspección visual, con lupa, toma de imágenes, recolección de muestras y medidas experimentales in situ. El estudio se realizó en los alrededores de la Plaza de Armas, según se muestra en la fotografía

presentada. (ver figura 1) Se estableció una metodología o protocolo de actuación para la realización del estudio, en la selección de muestras se tuvieron en cuenta principalmente dos aspectos: que fuesen representativas de los diferentes materiales de construcción empleados en la Fortaleza, y las condiciones medio ambientales a las que estaban expuestas para poder evaluar su influencia en las posibles modificaciones químicas y estructurales.

Fueron seleccionadas en total 12 muestras cuya descripción física y lugar de origen aparecen reflejados en la Tabla 1 y en las fotografías. (ver figuras 2 y 3) Para la evaluación del deterioro del concreto reforzado se realizaron varias pruebas. Las medidas se centraron en el puente Jesús Carranza.⁽¹⁾



Figura 1. Vista aérea de San Juan de Ulúa

Tabla 1. Relación de muestras seleccionadas

Muestra	Descripción	Lugar de procedencia
M 1, M 3	sólido marrón	Casa del Gobernador
M 2	metálico	M1, M2 y M3 seleccionadas del suelo
M 4	sólido marrón	Muestra del techo (~2 kg)
M 5	sólido marrón	Repello superficial, escalera
M 6	sólido marrón	Repello más profundo, pegado al ladrillo, escalera
M 7	sólido marrón	Cortina Sur: Muro de las argollas, cobertura nueva
M 8	sólido marrón	Muro de las argollas
M 9	metálico	Reja destrozada, lado izquierdo del muro
M 10	pedra Coral	Detrás del muro de las argollas: mar + viento
M 11 y M 12	metálico	Puente Carranza: Extremos opuestos

Etapas 2: Evaluación microscópica.

Aplicación de técnicas de caracterización química, estructural y morfológica a los diferentes materiales seleccionados en la fortaleza.

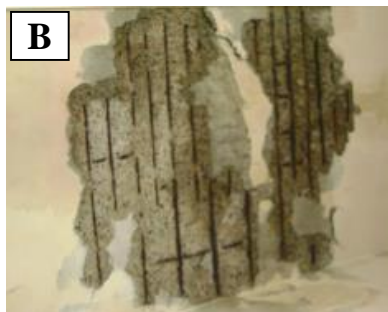
Descripción de metodologías empleadas

Para la evaluación del deterioro del concreto reforzado se realizaron varias pruebas. Las medidas se centraron en el Puente Jesús Carranza y la metodología experimental,⁽²⁾ consistió en la realización de ensayos químicos como el ensayo de carbonatación tradicional in situ y en el laboratorio. Consiste en pulverizar una

disolución de 1% de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto, las áreas carbonatadas no cambiarán de color y aquellas que superen un $\text{pH}=9$ adquirirán un color rosado; Caracterización química y estructural donde se emplearon diferentes técnicas como la Fluorescencia de Rayos X donde se utilizó un equipo Siemens SRS 3000, Análisis Elemental CHN realizado con un equipo Analizador Fisons EA-1108, Difracción de Rayos X (XRD), realizado con un equipo SIEMENS D-5000 y por último la técnica de Espectroscopia Infrarroja (IR) en un equipo Nicolet 6700. Para la observación de la estructura de los materiales estudiados se hizo uso de la Microscopia Óptica (MO), a través de un equipo Olympus y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDX), con ayuda de un equipo JEOL, que dispone de una microsonda que permite realizar análisis químico puntual. También se realizó la técnica de Porosimetría de Intrusión de Mercurio (PIM) para estudiar y profundizar en la estructura porosa de la piedra de coral y compararla con la de los materiales cerámicos tradicionales empleados en la construcción (básicamente concreto), el equipo utilizado fue el Autopore IV 9500 de Micrometrics.



A: Casa del Gobernador (Restaurada en el Siglo XX)



B: Techo



C: Muestra, M4



D: Reja metálica, M 9
expuesta a vientos marinos



E: Piedra coral (M 10)
empleada en la construcción
del fuerte



F: Cortina Sur, M 8
Muro de las argollas

Figura 2. Resumen de algunos de los sitios y materiales estudiados en este trabajo.



Figura 3. Puente Jesús Carranza. Lugar en donde se realizaron las medidas químicas y electroquímicas. Obtención de muestras M11 y M12.

RESULTADOS

Etapa 1. Valoración macrocópica del inmueble

Desafortunadamente la valoración macroscópica del inmueble fue poco alentadora y como puede observarse en algunas de las fotos presentadas, (ver figuras 2 y 3) el deterioro de las estructuras y materiales de construcción es muy elevado y de difícil solución. Los resultados de los experimentos químicos y electroquímicos realizados in situ fueron negativos, ya que aparecen los resultados del ensayo de carbonatación que evidencian la pérdida de alcalinidad del concreto. (ver figura 4) En cuanto a las medidas electroquímicas se presentaron grandes dificultades en la obtención de los datos experimentales, la armadura de acero estaba tan oxidada que se tuvieron problemas de contacto eléctrico imposibles de solventar, solo se lograron obtener valores puntuales del potencial de corrosión (E_{corr}), cuyo valor medio estuvo cercano a -520 mV vs. Cu/CuSO₄, que según la norma ASTM C-876 para la evaluación del riesgo de corrosión estaría con una probabilidad de corrosión superior al 90 % y se concluye que no es factible recurrir a técnicas de protección electroquímicas. ⁽²⁾



Ensayo in-situ
Puente Jesús Carranza



Ensayo en Laboratorio
(Corte de la Muestra M 4)



Evidente carbonatación.
Zonas interiores. Cortina Sur

Figura 4. Ensayo de carbonatación. Escasas zonas coloreadas, que son las que conservan la alcalinidad.

Etapa 2. Evaluación microscópica

Fluorescencia de rayos X. En la tabla 2 aparecen los resultados del análisis químico inorgánico semicuantitativo obtenidos en las muestras no metálicas. Sólo aparecen los compuestos mayoritarios, cuya cantidad es superior al 0.3% en peso.

Tabla 2. Resultados del análisis químico de las muestras no metálicas (% peso)

Muestras	CNH	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂
M 1	2	0,93	2	1,8	3,14	7,07	14	18,9	49,4
M 3	1,79	0,81	1,9	1,7	3,6	7,	14,1	17,9	49,5
M 4	1,79	0,8	1,8	1,99	3,05	9,5	13,7	18,2	48,1
M 5	3,41	0,76	1.59	1,98	3,88	5,94	9,8	34,9	33,7
Muestra	CNH	Na ₂ O	SrO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
M 8	9,16	1,5	*Cl= 3	0,37	2,4	3,2	4,1	12,9	62,1
M 10	11,04	0,6	1,4	0,39	1,42	2,7	3,0	9,8	68,7

Los resultados de la muestra 6 y 7 no se presentan en el trabajo, por posible contaminación de las mismas. Se puede deducir, de acuerdo a los resultados, que las muestras de concreto (M1, M3, M4 y M5) son mayoritariamente sílice, SiO₂ (cerca del 50% en todos los casos), componente más común de la arena, y que constituye el 60% en peso del concreto fraguado y endurecido, la detección de Al₂O₃ y CaO se debe probablemente a los aluminatos de calcio provenientes del cemento, la existencia de cantidades apreciables de Fe₂O₃, apunta la utilización de un cemento férrico utilizado comúnmente en climas cálidos.

Las muestras de piedra, M8 y M10, están formadas principalmente por minerales como los feldspatos (silicatos de aluminio y calcio, sodio o potasio), la elevada cantidad de CaO (más acusado en M10) y de carbono apuntan a la presencia de CaCO₃, aunque con esta técnica no es posible su confirmación.

Difracción de rayos X. El análisis por difracción de rayos X ha permitido la identificación de las distintas especies cristalinas. Se puede observar que aparecen los espectros de difracción correspondientes a las muestras M4 y M10 respectivamente. (ver figuras 5A y 5B) Es posible concluir que son especies altamente cristalinas, porque los picos de difracción son estrechos y con alta intensidad. Es posible observar que aparecen los elementos mayoritarios de la muestra M4, la hematita (Fe₂O₃) no se aprecia por ser minoritario y su grado de cristalinidad es bajo con respecto a las demás especies. (ver figura 5A)

Se logra revelar que la muestra M10 esta formada por CaCO₃ con estructuras cristalinas diferentes: calcita y aragonita. (ver figura 5B) La aragonita es más soluble en agua que la calcita e inestable a temperatura ambiente, con el tiempo (períodos geológicos de 10 a 100 millones de años) tiende a transformarse en calcita, esto permite determinar las edades de las rocas coralinas.

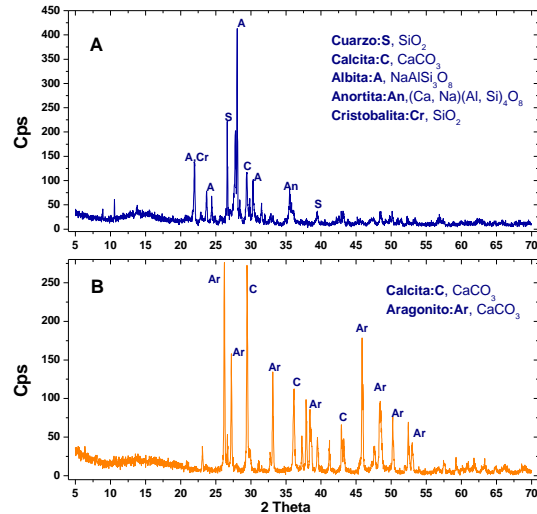


Figura 5. Espectros de difracción de las muestras M4 (A) y M10 (B)

Espectroscopia infrarroja. Los espectros de IR (figura 6) corroboran los resultados vistos en difracción y fluorescencia de rayos X. Las bandas que aparecen a menores números de onda, son picos de poca intensidad y de interpretación compleja, si bien la mayor parte de los autores los relacionan con enlaces Fe-O, en torno a los 3400 cm^{-1} se detecta una banda ancha característica del modo de vibración de tensión del agua (O-H) y los correspondientes modos de flexión aparecen en torno a 1600 cm^{-1} . Se corrobora la presencia de (CO_3^{2-}) , tipo calcita y aragonita, así como la existencia de enlaces Si-O, sus bandas características se especifican en los espectros. (ver figura 6) Los resultados del análisis elemental de la muestras, M11 y M12 demuestran que el refuerzo es un acero al carbono hipoeutectoide con un porcentaje de carbono de 0.35%, cuya estructura ferrito-perlítico pudo comprobarse por microscopia óptica. También se constató que estaba altamente oxidado, empleando el microscopio electrónico de barrido con sonda de microanálisis (SEM-EDX) pudo identificarse la presencia de hierro y oxígeno del material oxidado, de cloruro proveniente de la atmósfera marina y trazas de Si del concreto. ⁽³⁾

En el caso de la muestra M12 se detectó una mayor cantidad de cloruro debido a que esta muestra fue tomada del extremo del puente que da a la cortina oeste, zona más expuesta a la atmósfera marina.

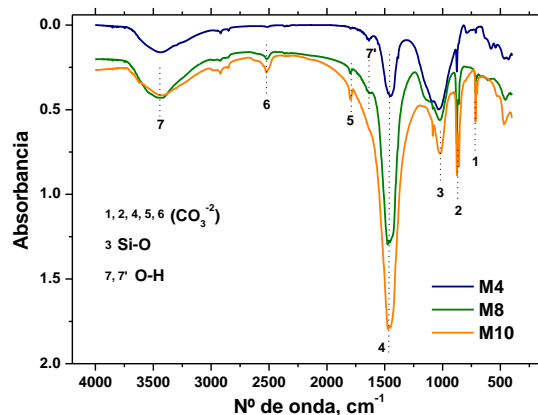


Figura 6. Espectros de infrarrojos de las muestras M4, M8 y M10.

Porosimetría de intrusión de mercurio: Para las muestras ensayadas aparece representado el logaritmo del volumen diferencial de intrusión de Hg frente al tamaño de poro. (ver figura 7) Se distingue una zona inicial que se corresponde a un empaquetamiento del mercurio tras el rellenado del penetrómetro alrededor de la muestra, pudiendo incluir poros de gran tamaño (décimas de milímetro) visibles a simple vista. Las demás zonas se corresponden con familias de poros. ⁽⁵⁾

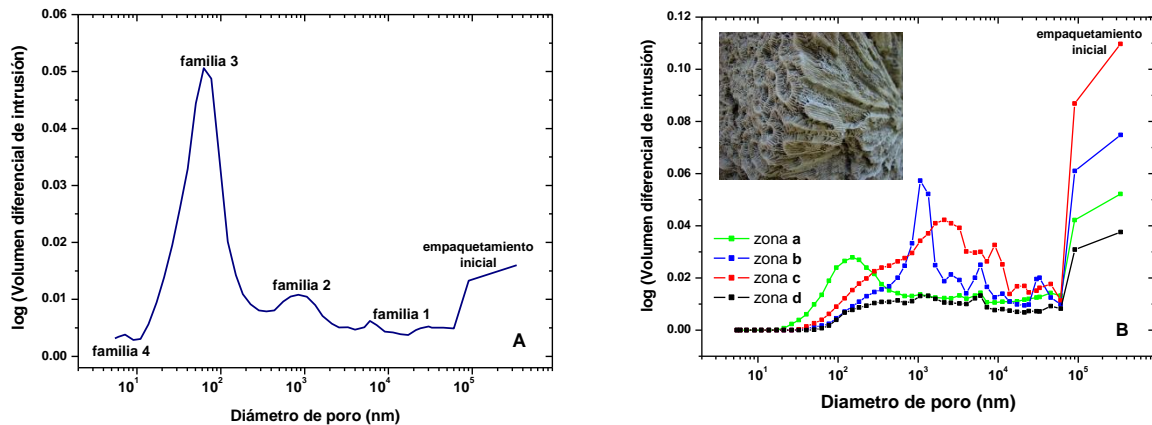


Figura 7. Resultados de Porosimetría de intrusión de mercurio. A: Muestra de concreto M4 y B: Muestra de coral

En el caso de la muestra M4, (ver figura 7A), los resultados son repetitivos y esperados, existen cuatro familias de poros indicadas en la correspondiente figura. Si se comparan los resultados obtenidos en la muestra de coral M10 con los de la muestra de concreto proveniente de la casa del Gobernador M4, es posible distinguir dos aspectos evidentes, los poros de M10 son más grandes, superan los 100 nm de diámetros, y por otro lado se observan resultados muy variados que corresponden con la heterogeneidad del material estudiado, en general todas las muestras ensayadas de M10 tienen una familia de poros entre 100 y 300 nm (familia 3), y luego en algunas muestras (zonas b y c) se detentan 2 familias más (familia 2: 1000-3000 nm y familia 1: alrededor de 10000 nm).

CONCLUSIONES

En la evaluación visual se pudo apreciar que el grado de deterioro del inmueble San Juan de Ulúa en los alrededores de la Plaza de Armas es muy avanzado. La Cortina Sur, Casa del Gobernador así como el Puente Jesús Carranza tienen muchas pérdidas de sección de acero, fisuras e incluso desprendimiento de concreto debido a la pérdida de las propiedades mecánicas del material compuesto (acero/concreto) causado por la corrosión de la armadura de acero de refuerzo de las estructuras.

La fortaleza San Juan de Ulúa se encuentra expuesto a un medio ambiente salino muy agresivo y con alta humedad esto ha facilitado y acelerado el proceso de corrosión de las estructuras. Es evidente que el deterioro causado al acero de refuerzo es irreparable

ya que la capa de óxidos formada por la corrosión del mismo tiene un volumen de dos o tres veces el volumen original del acero lo que ha desencadenado la fisuración y el desprendimiento del concreto.

En la evaluación del indicador fenolftaleína se demostró el alcance de la corrosión del Puente Jesús Carranza, ya que éste conserva muy pocas zonas con pH alcalino; es decir se presentan zonas con valores de pH superior a 14 (zonas alcalinas) y otras zonas con pH inferior a 8 este valor de pH es típico de un concreto carbonatado. El grado de carbonatación es muy avanzado.

Por la importancia de la fortaleza a lo largo de 400 años de historia, su restauración y reconstrucción es evidente y reviste gran importancia para el pueblo mexicano. Con la realización de este trabajo existe una apertura hacia proyectos futuros encaminados a la recuperación de este sitio tan emblemático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SEP-PROMEP por el apoyo a la Red Temática PROMEP para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico, a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), a la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del INAH y al INAH-Veracruz, por facilitarnos el acceso al fuerte y a los materiales solicitados para este estudio.

REFERENCIAS

1. S. Feliú, J. A. González and C. Andrade, "Electrochemical Methods for On-Site Determinations of Corrosion Rates of Rebars". Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures. ASTM STP 1276. Neal S. Berque, Eduard Escalante, Charles K. Nmai and David Whiting, Eds., American Society for Testing and Materials, (1996).
2. ASTM C-876-91: "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA (1991).
3. A. Collazo, X. R. Nóvoa, C. Pérez, B. Puga, "The corrosion protection mechanism of rust converters: An electrochemical impedance spectroscopy study". *Electrochimica Acta* (2009) doi:10.1016/j.electacta.2009.09.084.
4. B. Díaz, "Control de la corrosión del acero en hormigón: Agentes químicos y factores mecánicos", Tesis Doctoral, Universidad de Vigo, (2007)
5. R. Orozco-Cruz, C. M. Abreu-Fernandez, C. Pérez-Pérez, R. Galván-Martínez, "Degradación de Materiales en Construcción Histórica en Clima Costero Tropical: Caso de San Juan de Ulúa". *Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico*. Edit. C. Rodríguez y E. M. Alonso pp. 131-149. (2013)

EFFECTO DE LA DISMINUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN FIBRAS DESHIDRATADAS DE CACTUS OPUNTIA BLANCO, EN MORTEROS BASE CEMENTO PÓRTLAND

M. Arreola-Sánchez¹, W. Martínez-Molina², E. M. Alonso-Guzmán², J. I. Escalante-García³, A. A. Torres-Acosta⁴, C. Bernabé¹, H. L. Chávez García², C. Lara-Gómez², S. C. Arguello-Hernández¹.

¹Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040. ²Cuerpo Académico Consolidado CAC-147-UMSNH, Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas", Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040. ³Cinvestav, I.P. N., Unidad Saltillo, Carretera Saltillo-Monterrey, Km 13, Ramos Arizpe, Coahuila, México, 25900. ⁴Instituto Mexicano del Transporte, Km. 12, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, 76703 Pedro Escobedo, Querétaro.

RESUMEN

Para la presente investigación se realizaron morteros de cemento-arena según la norma ASTM C 109M I, con fines de restauración de obras artísticas de concreto hidráulico del siglo XX, dañadas por patologías derivadas del diseño por resistencia. Se utilizaron cinco diferentes proporciones de fibras deshidratadas y pulverizadas de cactus opuntia blanco para elaborar los morteros; las fibras se estudiaron como sustituciones parciales del cemento, en los porcentajes 0.5, 1, 1.5, 2 y 4%. Se evaluó trabajabilidad de la mezcla. Las sustituciones de cactus son altamente hidróscópicas y su demanda de agua fue también registrada. Se realizaron las pruebas de compresión simple, flexión, tensión y adherencia; y pruebas no destructivas de Velocidad de Pulso Ultrasonico, resistividad eléctrica y densidad a las edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. También se caracterizó la forma de partícula del cementante y de las fibras. Teniendo resultados favorables en sustituciones menores al 2%.

Palabras clave: Mortero, Cactus Opuntia, Durabilidad, Restauración, Sustituciones.

ABSTRACT

For the present investigation were performed cement-sand mortars of according to ASTM C109M I, for the purpose of restoring hydraulic concrete artistic works of the twentieth century, damaged by pathologies arising from the strength design. Were used five differents proportions of dried and sprayed fibers, of Cactus Opuntia white, to produce the mortars; the fibers were studied as partial substitutions of cement in the proportions 0.5, 1, 1.5, 2 and 4%. Mix workability was evaluated. The Cactus substitutions are highly hygroscopic and water demand was also recorded. Were performed compression tests, bending, tension and adhesion; and non-destructive testing as Ultrasonic Pulse Velocity, electrical resistivity and density at ages 14, 28, 45, 90, 180 and 360 days. Also saw the cementitious and fibers particle shape. Observed favorable results in substitutions lower than 2%.

Keywords: Mortar, Cactus Opuntia, Durability, Restoration, Substitutions.

INTRODUCCIÓN

El concreto pudiera ser considerado un material prácticamente eterno - siempre que reciba un mantenimiento sistemático y programado - hay construcciones que presentan manifestaciones patológicas de significativa intensidad e incidencia, acompañadas de elevados costos para su rehabilitación. Siempre hay comprometimiento de los aspectos estéticos y en la mayoría de los casos, reducción de la capacidad resistente, pudiéndose llegar en ciertas situaciones, al colapso parcial o total de la estructura ^[1].

Las características requeridas del concreto se pueden especificar mediante el diseño de mezcla. Las características pueden incluir: Propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto. El proporcionamiento (dosificación) de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar (dosificar) la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante (ligante) apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias.

La relación agua-material cementante (ligante) es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua-material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión.

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de la calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como de igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera la vida útil de la estructura.

Con lo anterior se pueden distinguir dos criterios de diseño, por resistencia y por durabilidad. Siendo el factor común la relación agua/material cementante ^[2].

El Nopal

El nopal pertenece al género *Opuntia*, del grupo cacti, que contiene cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas) un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio ^[3]. Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el

almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado [4, 5]. En pastas de cemento disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión [3].

De acuerdo a la publicación técnica #328 de la SCT y del IMT, resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño de mezclas y pruebas realizadas

Con base en estudios previos, se determinó el diseño de mezclas a realizar para la experimentación, dicho diseño se muestra en la Tabla 1. La relación agua/cementante se fijó en 1.01 (que fue la necesaria para que la mezcla testigo cumpliera con la fluidez) en cada una de las mezclas se cuidó que se cumpliera con la fluidez del testigo, las cantidades de las mezclas se muestran en la Tabla 2. La fluidez de todas las mezclas se determinó según el procedimiento de la norma ASTM C 1437 – 01.

Tabla 1. Diseño de mezclas a analizar.

Parámetro	Sustituciones para FN					
	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	4.0%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
R. agua/cementante	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
R. arena/cementante	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

Tabla 2. Cantidades y elementos que conforman las mezclas.

Elemento	cantidad
Cementante	1481 gr
Arena	4072 gr
Agua	1495 ml
Relación A/C	1.01
fluidez	110 \pm 5

Para el análisis de la resistencia a carga axial se siguió la norma ASTM C 109M. Para la resistencia a la flexión de los morteros se siguió la norma ASTM C 348 – 02; ambas pruebas se ejecutaron utilizando la máquina universal Tinius Olsen. Para la prueba de tensión, se siguió el procedimiento descrito en el Manual de Análisis de Materiales de la facultad de ing. Civil de la U.M.S.N.H., tercera edición, usándose la máquina Michaelis.

Para la realización de la prueba de adherencia se siguió la norma ASTM C 1583, 2004. Para la prueba no destructiva de Velocidad de Pulso se siguió la norma ASTM C 597 – 02; mientras que para la prueba de densidad se siguió el procedimiento que se indica en el Manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, Tercera edición. Después de la elaboración del número correspondiente de especímenes para cada solicitud, las edades de prueba especificadas fueron de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días.

Caracterización de fibras y cemento empleados

Cemento empleado. El cemento para esta investigación fue CPC 30R RS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004). La forma de las partículas del cemento CPC (Figura 1) es muy similar al de los materiales y cenizas de origen mineral, solo que en el caso del CPC se observa una mayor variedad de tamaños.

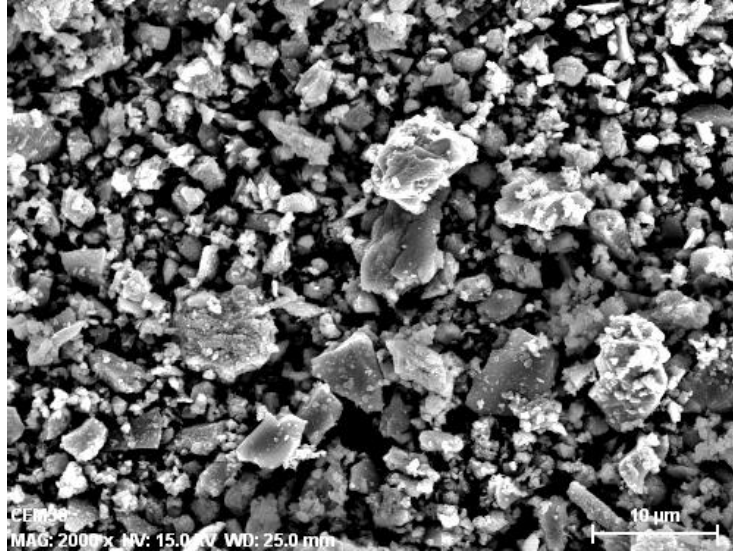


Figura 1. Forma de partículas del cemento CPC.

Fibras de Captus Opuntia Blanco. A este material no se le realizó ninguna prueba para determinar su tamaño o distribución de partículas, se empleó tal cual es proporcionado por el fabricante. La forma de las partículas de la FN es muy parecida a las puzolanas que son de origen vegetal, es por esto que presentan fibras de formas alargadas (Figura 2).

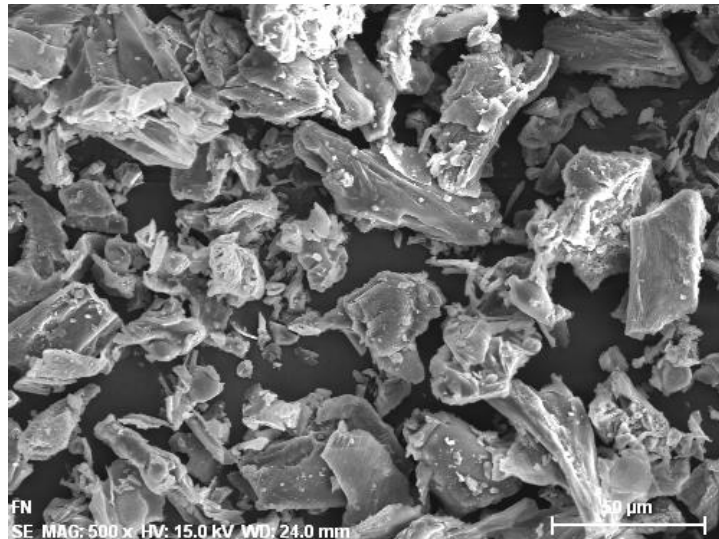


Figura 2. Forma de partícula de la FN.

RESULTADOS

Pruebas mecánicas

Carga axial. El comportamiento a compresión, es superior al testigo para las sustituciones de 0.5 al 1.5% en edades de 90 y 180 días, pero mostrándose con la misma resistencia a la edad de 360 días en todos los porcentajes excepto para la sustitución del 2%, el cual se mantiene por debajo del testigo en el total de las edades presentadas. En las 5 sustituciones se observa una tendencia a la alza a partir de la edad de 90 días, siendo las sustituciones de 0.5 y 1.5% las que muestran una tendencia constante a la alza (Figura 3).

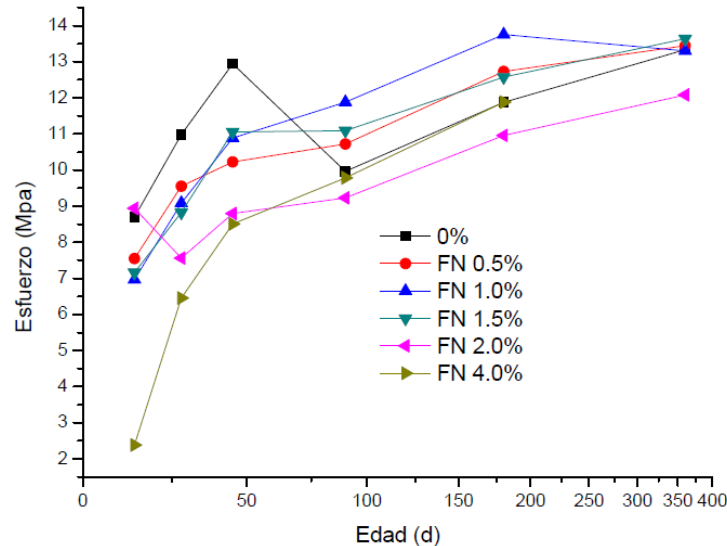


Figura 3. Comportamiento a compresión de la FN.

Resistencia a Flexión. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la FN a flexión, mostrando una mayor variabilidad que la gráfica de resistencia a compresión; y en general un comportamiento inferior al testigo a edades tempranas, mismo que se incrementa en las edades de 180 y 360 días para los porcentajes de 1 y 1.5 de sustitución, mismos que muestran una pendiente positiva y constante a partir de los 90 días de edad.

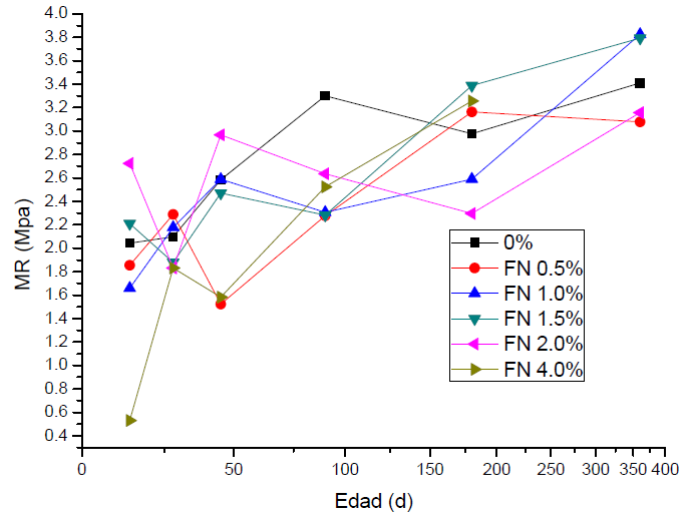


Figura 4. Comportamiento a flexión de la FN.

Resistencia a la tensión. En general se tuvo un comportamiento, en tres de sus porcentajes, ligeramente por encima del testigo (Figura 5). En esta gráfica de pueden distinguir dos grupos de comportamientos, uno que supera ligeramente al testigo (FN 1, 1.5 y 2%); y el según está por debajo del mismo prácticamente en todas las edades, destacando que en este segundo grupo están las dos sustituciones extremas de la investigación (FN 0.5 y 4%), lo cual nos delimita el rango de efectividad del aditivo para la sollicitación de tensión. De nueva cuenta los porcentajes de FN 1 y 1.5% muestran el mejor comportamiento.

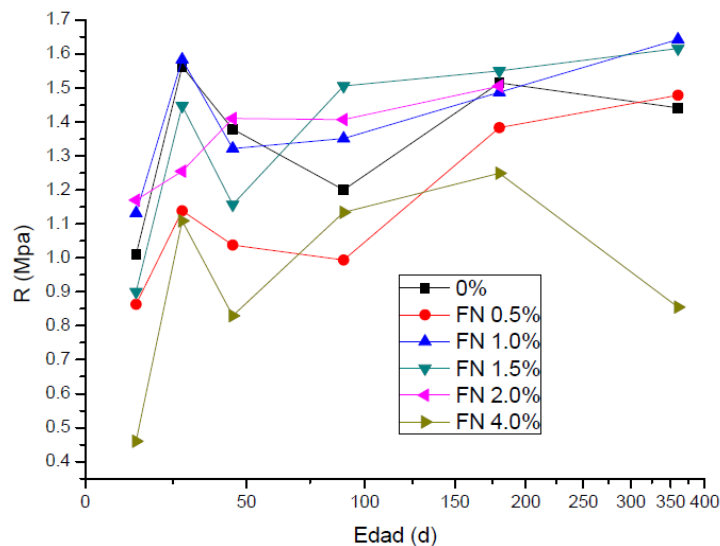


Figura 5. Comportamiento de la FN a tensión.

Adherencia. En esta prueba solo se presenta resultados hasta los 90 días de edad. La FN muestra una tendencia a la alza en casi todas las sustituciones (Figura 6), cuatro de las cinco sustituciones superan al testigo en la edad de 90 días de las cuales

mostraron un mejor comportamiento de las sustituciones del 0.5 y 1%, mientras que el FN 1.5% se comporta de forma paralela al testigo y ligeramente por encima del mismo.

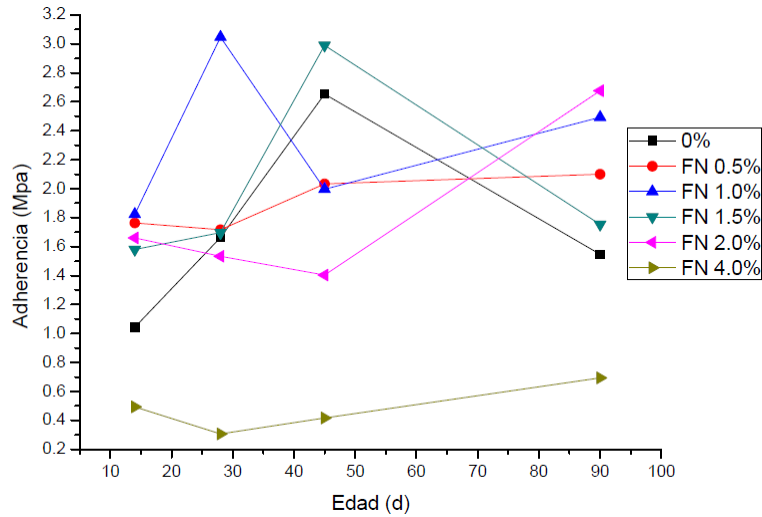


Figura 6. Esfuerzo de adherencia de la FN.

Pruebas no destructivas

Velocidad de pulso ultrasónico. Muestra una tendencia ligeramente inferior al testigo en las primeras edades de prueba logrando incrementarse las lecturas a los 360 días, dado que la relación agua/cemento de las mezclas fue de 1.01, la porosidad de la matriz cementicia es muy alta; es por esto que se presentaron velocidades bajas tanto en el testigo como en las sustituciones (Figura 7).

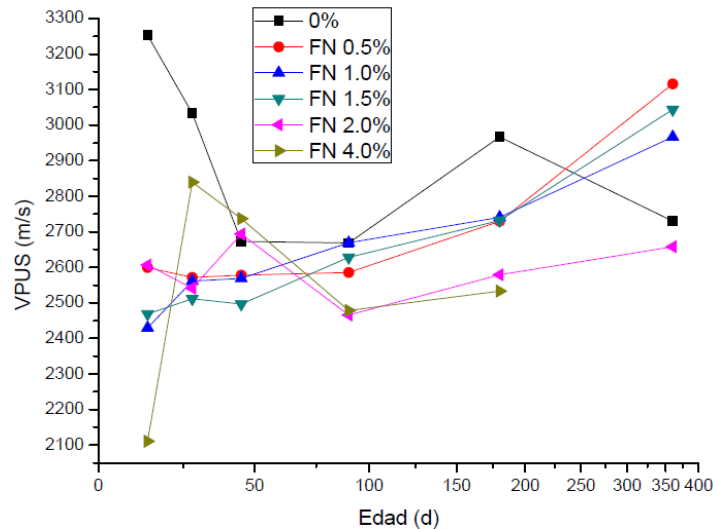


Figura 7. VPUS en la FN.

Resistividad eléctrica. Al que para la VPS, en la resistividad eléctrica se presentan valores bajos debidos a la alta porosidad existente en las mezclas; pero en ambas se aprecia un claro incremento de los valores a edades mayores. En la Figura 8, la FN

presenta una tendencia al alza más pronunciada que el testigo, logrando superar al mismo a la edad de 360 días, siendo el FN 1.5% la mezcla con mayor resistividad.

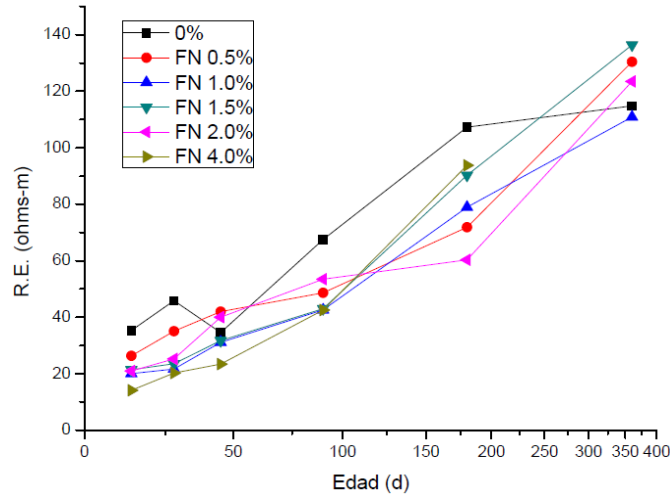


Figura 8. R.E. de la FN.

Densidad. Como se aprecia en la Figura 9, todos los porcentajes de FN tienen densidades semejantes al testigo en casi todas sus edades, mostrando una tendencia a unirse en todas las sustituciones a la edad de 360 días.

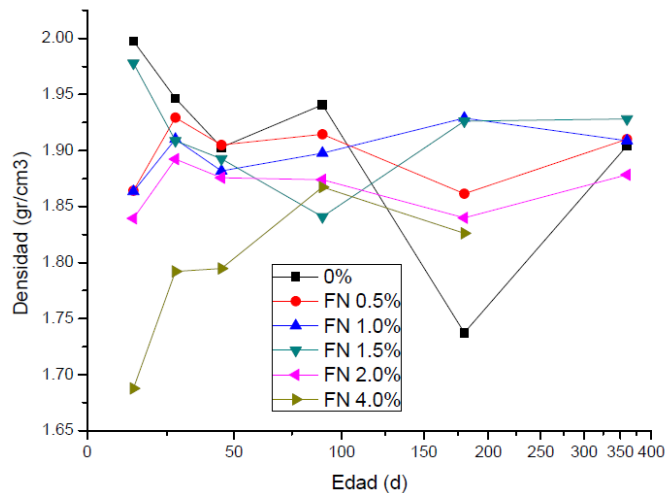


Figura 9. Densidad de la FN.

CONCLUSIONES

Como ya se mostró en el capítulo anterior, la mayoría de los materiales sustitutos estudiados en la presente investigación, muestran un buen desempeño en las sollicitaciones mecánicas, sobre todo en edades superiores a los 180 días, más sin embargo son pocos los materiales que presentan buenos resultados en el 100% de las pruebas, lo que nos permite acotar los materiales con un desempeño óptimo en todo el estudio aquí presentado.

- Mezclas con desempeño óptimo, que son los que mostraron mejoras mecánicas y su comportamiento fue constante y consecuente en las diferentes pruebas hechas. Esta sería la sustitución de FN 1.5%.
- Mezclas con un desempeño mecánico aceptable y comportamientos no consecuentes, aun que al igual que la mezcla de FN 1.5% muestran tendencias a la alza que hacen suponer que a edades mayores podrían mostrar un mejor desempeño en todas las sollicitaciones estudiadas, los cuales son: FN 0.5% y FN 1.0%.

REFERENCIAS

[1] Paulo Helene y Fernanda Pereira., "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección". Versión electrónica en CD, Sao Paulo, Brasil, 2003. ISBN 85-903707-1-2.

[2] Kosmatka, Steven H., et al., "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797., México, 2004., ISBN 0-89312-233-5.

[3] Torres, A. "Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto", Publicación Técnica #328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Mexico, 2010.

[4] Moralez Garibay, M. "Desempeño mecánico de morteros de cal adicionados con fibras deshidratadas en polvo de cactus opuntia" Tesis de licenciatura. Morelia, Michoacan, Mexico. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2009.

[5] Diaz Gonzales, N. "efecto del agregado grueso pétreo triturado en sollicitaciones mecánicas dinámicas y estáticas. Caso de concreto hidráulico simple adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco". Tesis de licenciatura. . Morelia, Michoacan, Mexico: facultad de ingeniería civil, UMSNH. 2011.

INFLUENCIA DE FIBRAS DE ORIGEN ANIMAL EN MORTEROS BASE CAL PARA RESTAURACIÓN.

J.A. Velázquez Pérez ¹, W. Martínez Molina ², E.M.Alonso Guzmán ², H. Chávez García ², C. Lara Gómez ², J. A. Bedolla Arroyo³, A.A. Torres Acosta.⁴

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040. ² Cuerpo Académico UMSNH-147, Departamento y Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040. ³Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040 ⁴.Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, México 76000

RESUMEN

El presente trabajo es una investigación sobre el empleo de aditivos en fibras de origen animal como son lana de cordero y plumas de ave de corral: las barbas palmáceas y las barbas plumosas, ambas son derivados de la queratina, por tanto poco estables ante ataques de sulfato de sodio al 5% a temperatura ambiente; estas fibras se adicionaron en diferentes porcentajes a morteros de cal-arena. Los morteros fueron elaborados en condiciones de laboratorio, en proporción 1:2.5 en peso, se determinaron sus características bajo compresión, flexión, tensión, a edades de 60 días mostrando el mejor comportamiento las fibras de lana. Se estudió como influyen las fibras, en sus propiedades en estado fresco y en el comportamiento mecánico de las mezclas endurecidas. Se realizaron morteros con 0.3% de adición, respecto al peso de la cal, de plumas y lana para determinar su posible utilidad en restauración de sitios y monumentos históricos.

Palabras clave: Mortero, fibras naturales, adiciones, restauración, monumentos históricos.

ABSTRACT

The present work is an investigation into the use of additives in animal fibers such as lambs wool and poultry feathers: the plumáceas feathery beards and whiskers, both are derived from keratin therefore unstable against attacks sodium sulfate 5% at room temperature; these fibers were added at different percentages of lime-sand mortar. The mortars were prepared under laboratory conditions, in a 1: 2.5 by weight, their characteristics under compression, bending, stress, age 60 days showing the best performance wool fibers were determined. It was studied as influencing the fibers in their fresh properties and the mechanical behavior of the cured blends.

Mortars were made with 0.3% addition by weight of lime, feathers and wool for their potential use in restoration of historic sites and monuments.

Keywords: mortar, natural fibers, additions, restoration, historic monuments.

INTRODUCCIÓN

Las adiciones tienen como objetivo mejorar algunas propiedades de los morteros (porosidad, resistencia, adhesión, permeabilidad, color, textura, elasticidad, estabilidad volumétrica, densidad, plasticidad, trabajabilidad, fraguado, durabilidad, autenticidad histórica, etc.).

Los antiguos constructores tenían que confiar en la experiencia o información heredada de manera oral por sus antepasados y con ello re-aprender de las distintas propiedades que le conferían los aditivos orgánicos y naturales a los morteros, así como los efectos que producían en ellos ^[1], los morteros de cal se remontan a las descripciones escritas de Vitrubio.

Los grupos étnicos locales usaban como aditivos en la construcción, materiales locales, entre ellos pelo de animal, además de otros aditivos orgánicos, con el fin de mejorar algunas propiedades de los materiales de construcción; como en el caso de los morteros de arcilla inicialmente, después en los morteros de cal.

El efecto de estos morteros se cuantificó de manera parcial bajo sollicitaciones mecánicas de compresión flexión y tensión, Los aditivos estudiados podrían producir, por consiguiente:

Incremento en la resistencia mecánica de las matrices cerámicas de base cal a diferentes sollicitaciones estáticas y dinámicas como tensión, flexión, compresión, módulo de elasticidad, módulo de poisson.

Queda por probar documentalmente cual era el uso y la función de estos materiales en la elaboración de morteros de cal, los estudios han permitido conocer la posible función que desempeñan estos materiales dentro de los morteros.^[1]

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Metodología

El objetivo de esta investigación es caracterizar materiales de construcción como morteros de base cal, adicionados con diferentes fibras para evaluar sus propiedades mecánicas; bajo diferentes sollicitaciones estáticas. También se pretende volver a utilizar estos aditivos (utilizados por nuestros ancestros) para mejorar las características de los morteros y poderlos emplear en la restauración de monumentos históricos; el INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia), instituto reguladora nacional, se inclina por restaurar los monumentos históricos con elementos de las mismas características a los utilizados en su construcción original, por este motivo se

realiza una acuciosa revisión bibliográfica de la mano de la experimentación en condiciones de laboratorio para esta primera fase de la investigación.

Materiales empleados y diseño de mezclas. Cuando se diseña un material para determinada aplicación, deben tenerse en cuenta varios factores. El material debe adquirir las propiedades físicas y mecánicas mínimas necesarias, indicadas en los reglamentos de construcción vigentes, debe ser capaz de procesarse o fabricarse en la forma deseada y debe proporcionar una solución económica para el problema de diseño [2].

Los materiales empleados en el presente estudio son los que se describen en seguida:

1.- Arena de río. Para poder iniciar las mezclas se cribó arena del Río Lerma (pasa malla 8, retiene mala 200, ASTM) el banco está ubicado en la ribera cercana a la zona de Puruándiro, México, para garantizar su alto contenido de sílice y se caracterizó según la normativa vigente para su uso en construcción.

2.- Conglomerante. Los conglomerantes son los materiales encargados del proceso de fraguado y endurecimiento de las mezclas. En nuestro caso se usó la cal de tipo comercial, de grado construcción, sus yacimientos están ubicados en Piedras de Lumbre, Municipio de Jungapeo, Michoacán, México.

3.- Aditivos. Los aditivos utilizados fueron: fibras naturales pelo de cordero 0.3% y plumas de ave de corral 0.3% estos aditivos se emplearon en un porcentaje respecto al peso de la cal, el líquido de amasado depende de la cuantificación de la fluidez en la mezcla fresca.

4.- Solvente. Agua potable de la red municipal, con el cual se le otorgó trabajabilidad a la mezcla de mortero de cal.

Diseño de mezclas. No existe un método universalmente aceptado para el diseño de mezclas de mortero, la dosificación está usualmente basada en la trabajabilidad o reología de la mezcla, aproximadamente $100\pm 10\%$. Para obtener las fibras de cordero y de aves de corral se recolectaron de los sitios donde se encuentran estos animales, y posteriormente fueron lavados con agua.

El porcentaje e adición utilizado para elaboración de las mezclas fue determinado según trabajos previos. En el caso de la trabajabilidad, se le realizó la prueba de fluidez (Tabla 1) en estado fresco a cada mezcla además de que se observó la apariencia,

consistencia, y en el caso del recubrimiento de losa se determinó cuál de las mezclas fue la que presentó menor agrietamiento (Figura 1).



Figura 2. Prueba de fluidez y colado de losa

Tabla 1. Fluidez de las mezclas elaboradas.

Fluidez de las mezclas	
Aditivo	Fluidez (%)
Pelo de cordero	100
Plumas de ave	95
Testigo	90.5

De la tabla anterior se puede observar que los rangos de fluidez para las dos adiciones están en un rango aproximadamente del 100% con el cual la mezcla cumple con una trabajabilidad y apariencia adecuada.

Elaboración de especímenes. Para cada mezcla se elaboraron especímenes cúbicos ^[3] (5cm de arista), prismáticos ^[4] (4cm x 4cm x 16cm), y briquetas ^[5] (2.54 cm x 10 cm x 2 cm).

Las mezclas se realizaron con una relación Cal-Arena de 1:2.5 en peso, condiciones de laboratorio, y los aditivos se emplearon en adición respecto al peso de la cal. El mezclado se realizó con un taladro con aspa para que la mezcla se homogeneizara. Se

realizó la prueba de fluidez para determinar, según la norma ^[6], si la cantidad de agua era óptima para la mezcla.

Enseguida se llenaron los moldes ligeramente engrasados para evitar adherencias, según sus respectivas normas, y se desmoldaban unos días después, cuando hubiera tenido lugar el fraguado que varió según la adición.

RESULTADOS

Después de realizar las 2 mezclas de estudio, se observaron diferentes características en cada una de ellas las cuales podrían modificar diferentes propiedades a nuestros morteros. Con las adiciones de plumas de aves y pelos de cordero se apreció un buen comportamiento en las mezclas en estado fresco, es decir, una pasta trabajable y con adherencia, aparentemente.

Para las muestras en estado endurecido se les realizaron las pruebas de compresión, flexión y tensión, se puede observar que las características físicas de la mezcla en estado fresco son congruentes con los resultados en estado endurecido.

En la prueba de esfuerzo de compresión se puede observar claramente que la mezcla de pluma de ave (Figura 2) supera al testigo casi cuatro veces y la adición de pelo de cordero tres veces mas que la testigo, aunque cabe señalar que en esta prueba los mejores resultados son de la adicción con plumas.

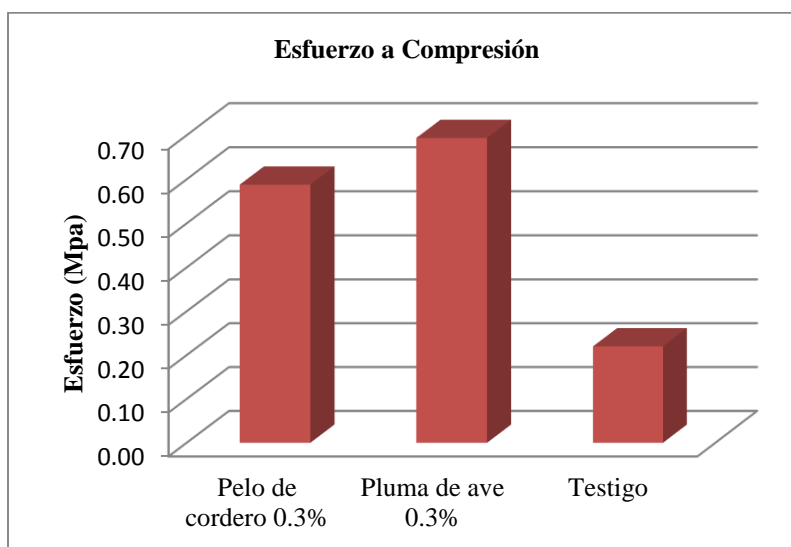


Figura2.Esfuerzo a compresión

Lo contrario sucede con las pruebas de flexión y tensión, ya que los que nos arrojan mejores resultados son los pelos de cordero siendo estos en tensión (Figura 3.) y flexión (Figura 4.) cuatro veces más que el testigo y siendo los de pluma ligeramente más pequeños que los de pelo de cordero.

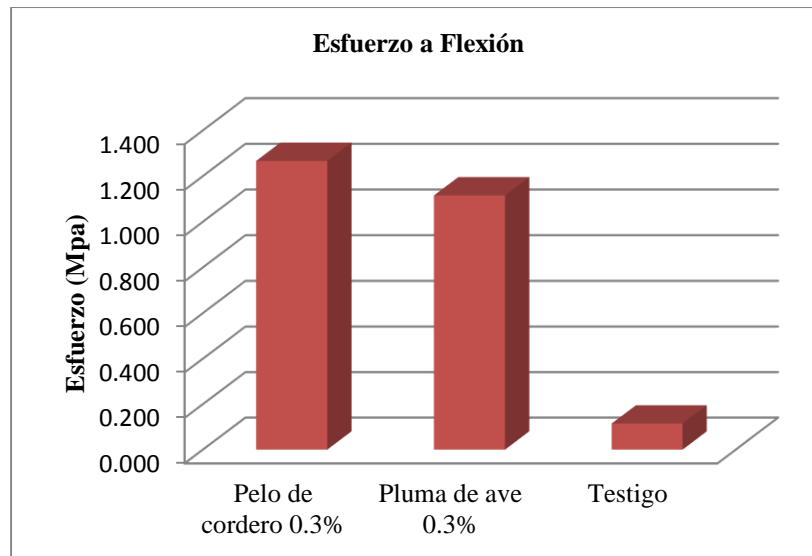
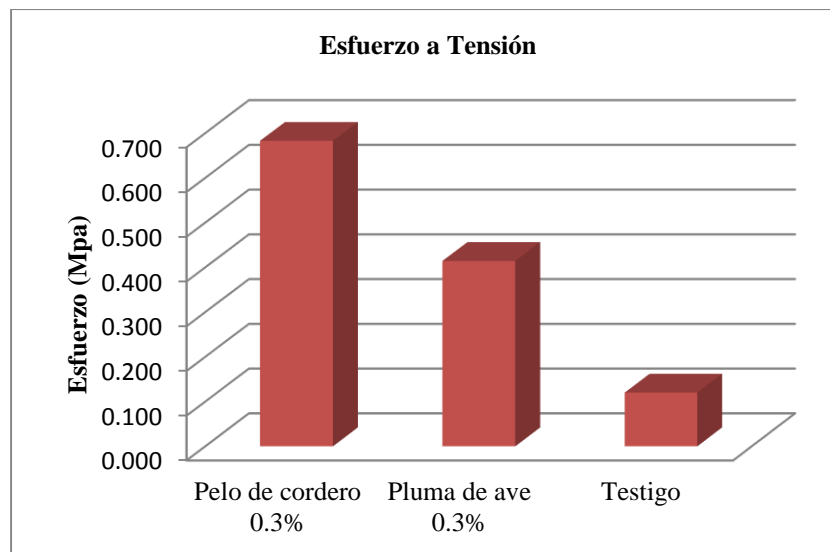


Figura 3 .Esfuerzo a Flexión



Grafica 4.Esfuerzo a Tensión

CONCLUSIONES

Los resultados aquí presentados forman parte sólo de la etapa preliminar del proyecto de investigación completo, por lo cual es importante considerar que las muestras deben probarse a mayores edades, mismas que ya se están analizando.

Como conclusión parcial, el aditivo que presentó el mejor comportamiento general es el pelo de cordero utilizado como fibra la cual le confiere más resistencia a dichos esfuerzos ya mencionados, no dejando de lado su buena trabajabilidad y apariencia en estado fresco: de tal manera que esperamos pueda ser aplicado en un futuro para preservar nuestros edificios y sitios históricos.

REFERENCIAS

[1]J. A. Bedolla Arroyo, et al. Aditivos Orgánicos en morteros de cal apagada en la edificación histórica. Revista Ciencia Nicolaita No.51, Julio de 2009, Morelia Michoacán. Pp 153-166

[2] Askeland, Donald., La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales. Editorial Thomson-México. ISBN: 9706863613 ISBN 13: 9789706863614. Año 2004.

[3]Norma ASTM C109/109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

[4]Norma ASTM C348-02, Historical Standard: ASTM C348-02 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortar

[5]Navarro Sánchez L. M., Martínez Molina W., Espinoza Mandujano A., Análisis de Materiales. Segunda edición, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. 2007

[6]Norma NMX-C-061-ONNCCE-2001

INTEGRACIÓN Y COMPATIBILIDAD DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN LA ARQUITECTURA PATRIMONIAL

F. J. Soria¹, L. F. Guerrero¹, A. B. García¹

1. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, División de Ciencia y Artes para el Diseño, Área Interdepartamental y Cuerpo Académico en Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado, Edificio P. Calzada Del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, México D.F. CP 04960

RESUMEN

México cuenta con un inmenso patrimonio edificado de diversas épocas que por su valor histórico, estético, simbólico y documental debe ser conservado con el mayor grado de autenticidad posible. Un problema importante para su preservación se presenta al intervenir estructuras cuyo diseño, tecnología y materialización obedecen a lógicas constructivas y espaciales del pasado, pero que tienen el compromiso de continuar funcionando como espacios útiles y seguros para los usuarios actuales. En el presente texto se analizan diversos criterios de intervención para consolidar y reestructurar edificios patrimoniales con base en aspectos relacionados con la compatibilidad de los materiales y sistemas seleccionados respecto al trabajo mecánico de la estructura original, así como con las consideraciones adoptadas para respetar los valores patrimoniales del edificio. El trabajo propone una serie de criterios generalizables de intervención estructural que contribuyan a la salvaguarda de los principales valores patrimoniales del entorno construido.

Palabras clave: Conservación, integración, compatibilidad estructural, reestructuración

ABSTRACT

Mexico possesses a huge and rich built heritage dating from different periods of time that, because of its historical, aesthetic, symbolic and documentary value, must be preserved with the highest possible degree of authenticity. A major problem for its conservation arises when built structures whose design, technology and implementation obey a constructive and spatial logic of the past, but which are committed to continue to function as useful and safe spaces for current users. Different criteria of intervention to consolidate and restructure heritage buildings are analyzed in regard to the compatibility of the materials and systems selected with the mechanical behavior of the original structure, as well as those considerations made in order to respect the heritage values of the building. This paper proposes a series of generalizable structural intervention criteria that may contribute to safeguarding heritage values of the built environment.

Keywords: Conservation, integration, structural compatibility, restructuration

INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio edificado es una práctica cada vez más extendida en México y en el mundo debido a una creciente preocupación por mantener y prolongar la vida de inmuebles que se consideran significativos para la sociedad actual. Sin embargo, hablar de arquitectura patrimonial o del conjunto de patrimonio edificado, representa un inmenso universo que no es fácil abarcar ya que se debe incluir bajo esta perspectiva, desde las grandes creaciones como lo son los templos, palacios, casas señoriales o edificios públicos, hasta construcciones menores, pero de alto valor cultural como es la denominada arquitectura vernácula o tradicional. Entre ambos extremos existe una diversidad tipológica y constructiva de gran riqueza que constituye un acervo histórico, documental de gran importancia para nuestro país.

Al mismo tiempo, dicho patrimonio conlleva otros valores que tocan la esfera de lo útil, por tratarse de inmuebles que siguen funcionando como espacios habitables; lo económico, por estar, en la mayoría de los casos, dentro de una dinámica urbana que por diversas razones (ubicación, cercanía, turismo) los reposiciona como recursos potenciales y, últimamente, por aspectos ambientales, por tratarse de un parque edificado que al incrementar su ciclo de vida contribuye significativamente a reducir el impacto sobre el medio ambiente.

En este contexto, la intervención de la arquitectura patrimonial debe llevarse a cabo respetando sus valores históricos, estéticos, simbólicos o documentales y, simultáneamente, aprovechar su valor funcional, económico y ambiental, buscando mantener el mayor grado de autenticidad posible. Sin embargo, uno de los problemas de mayor dificultad para su adecuada preservación, se presenta al intervenir obras cuyo diseño, tecnología y materialización obedecen a una lógica constructiva y espacial que perdió vigencia al diluirse las estructuras sociales tradicionales o ancestrales a las que estuvieron vinculadas. El reto está sin duda en que, además de preservar los valores culturales del patrimonio edificado, se tiene el compromiso de continuar su ciclo de vida como espacios útiles, pero sobre todo, seguros para los usuarios actuales y futuros.

Desafortunadamente, los procesos de conservación del patrimonio derivados de una práctica cada vez más especializada, se han visto condicionados por factores económicos y técnicos que apuestan básicamente por procesos masificados de construcción e industrialización y que apuntan hacia el desarrollo y aplicación de componentes de alta tecnología como medios de preservación, los cuales no siempre resultan compatibles con las estructuras antiguas. Las premisas y procesos de diseño estructural contemporáneo suelen pasar por alto el contexto particular que implica la intervención en inmuebles patrimoniales:

..., los criterios actuales de conservación no se encuentran difundidos correctamente en el ámbito de la práctica, por lo que desafortunadamente aún siguen siendo muy comunes las intervenciones inadecuadas en este tipo de

edificaciones. Debido a esta falta de conocimiento, a menudo la componente histórica ha sido mutilada o destruida por los ingenieros y arquitectos que no reconocen este hecho, con la aprobación de las autoridades y de otros profesionistas implicados. Por otra parte, es frecuente que autoridades e ingenieros intenten aplicar los reglamentos de construcción desarrollados para edificaciones modernas, al momento de intervenir una estructura histórica, lo cual es generalmente inaceptable. [1]

El presente texto reflexiona en torno a la necesidad de resolver la complejidad que implica la intervención estructural en edificios de valor patrimonial. Intenta, por otro lado, no sólo actualizar las recomendaciones más importantes que han realizado sobre la materia instituciones especializadas en las últimas décadas, sino también exponer algunos criterios de intervención que se están aplicando en tiempos más recientes. Se trata desde luego de un tema en constante evolución que requiere una discusión permanente en aras de aplicar los mejores criterios para preservar los valores del patrimonio edificado, pero garantizar la seguridad de los usuarios.

ANÁLISIS

Existe una larga tradición en la intervención de inmuebles del pasado para su uso y aprovechamiento en el presente. De hecho, si volteamos a ver la historia, observamos que no se trata de una práctica nueva, sino una actividad constante y recurrente desde que existe la arquitectura misma. Obedece a diversos factores que han ido cambiando y coexistiendo a lo largo del tiempo, desde razones puramente utilitarias para aprovechar una estructura preexistente, hasta aquellas de orden ideológico donde inmuebles significativos eran transformados como forma de dominación de una sociedad sobre otra, sin olvidar la necesidad de cada colectividad de conservar construcciones significativas para su historia e identidad [2].

De esta manera desde la antigüedad hasta nuestros días se han conservado, transformado, reutilizado, rehabilitado e incluso reconstruido inmuebles de toda índole como lo fueron templos, palacios, casas señoriales, obras de infraestructura, acueductos, presas, caminos, industrias, al igual que casas o edificios más modestos que constituyen buena parte de los tejidos urbanos que incluyen vivienda, comercios o espacios recreativos. Las formas de intervenir este enorme y rico patrimonio construido variaron a lo largo de la historia, sin embargo, puede decirse que hasta antes de la revolución industrial, los sistemas constructivos evolucionaron a un ritmo que permitió mantener una gran continuidad en la lógica material y estructural utilizada [3].

La necesidad de realizar “intervenciones respetuosas” en edificios patrimoniales ha sido largamente reconocido en el ámbito especialista, pero los criterios han cambiado al paso del tiempo debido a la relativa subjetividad del término “respeto” así como a progresivos hallazgos en torno al comportamiento de los materiales constructivos. La Carta de Atenas de 1931 ya indicaba, por ejemplo, en su artículo quinto la posibilidad de usar el concreto armado para intervenir edificios monumentales:

Los expertos escucharon varias comunicaciones relativas al empleo de materiales modernos para la consolidación de los edificios antiguos, y han aprobado el empleo juicioso de todos los recursos de la técnica moderna, muy especialmente del concreto armado. Expresan la opinión de que normalmente estos medios de refuerzo deben estar disimulados para no alterar el aspecto y el carácter del edificio a restaurar...” [4].

Sin embargo, esta recomendación sobre el “empleo juicioso” que buscaba orientar hacia una intervención respetuosa, no estaba necesariamente basada en una experiencia extendida en ese entonces sobre dicho material, además de estar abierta a la interpretación de los responsables. Las intervenciones en una infinidad de edificios que se habían conservado durante siglos resultaron en pocas décadas más dañinas a consecuencia de la incorporación de concreto armado.

Lo cierto es que en el ámbito de la conservación, la normativa se ha vuelto cada vez más precisa, para intentar orientar con mayor detalle la diversidad de formas de intervención. Se trata de ser en lo posible más específicos, aunque no se olvida que un principio básico en esta disciplina considera “caso por caso” y los procesos particulares que cada lugar y entorno requieren. Durante largo tiempo, si bien se priorizaban las técnicas tradicionales como medio de intervención, se ha apostado al uso de las técnicas más avanzadas como una solución viable al incluir en los medios de verificación de la calidad de los sistemas al “sustento científico”.

En las últimas décadas los estudios sobre los materiales llevaron a los investigadores e ingenieros a considerar que los resultados de laboratorio tienen mayor “rigor científico” que la tradición. Frecuentemente se dice por ejemplo que materiales tales como la tierra, la madera, la cal o componentes pétreos no cuentan con sustento científico que avale su resistencia o durabilidad, y cuando se realizan estudios para tratar de evaluarlos se “sacan de su contexto” constructivo y se les realizan pruebas similares a las empleadas con materiales industrializados con las que se “demuestra” que son vulnerables.

Una parte importante de las ciencias de los materiales y de la ingeniería de la construcción pasa por alto el hecho de que la edificación tradicional ha evolucionado a partir de milenarios ensayos y errores en los que se logró desarrollar lo que se denomina el principio de organicidad. Se trata de diseños en los que cada componente de los sistemas constructivos tiene su razón de ser con respecto al conjunto y que la capacidad de carga es solamente una de las diversas variables que conforman su comportamiento orgánico [5].

Un componente de baja resistencia a la compresión por ejemplo, puede resultar altamente cohesivo con el resto del sistema por tener menor densidad y mayor porosidad, o bien desarrollar transmisiones de esfuerzo por fricción, ser más flexible, o simplemente servir como componente de aislamiento térmico. La historia nos enseña que la combinación equilibrada de componentes de diferentes resistencias que se “ayudan” a resistir empujes, no puede ser medida a partir del estudio de sus unidades,

pues todos ellos trabajan en red. De ahí la necesidad de comprender la razón de ser de los sistemas constructivos y no únicamente de sus partes.

Sin embargo, uno de los problemas principales con el uso de concretos, resinas, polímeros, fibras de carbono entre muchas otras técnicas avanzadas, radica en el hecho de que, a pesar de haber sido evaluados bajo rigurosos estudios experimentales y con detallados controles de variables, tienen comparativamente poco tiempo de haber sido aplicados en la edificación, lo que en ocasiones no permite hacer juicios definitivos. Desde luego no se pretende decir que por ejemplo la cal sea “mejor” que el concreto como componente constructivo. Lo que sí es un hecho es que se cuenta con más de dos mil años de experiencia en el manejo de hidróxidos de calcio y solamente doscientos con el hormigón [6].

En la conferencia sobre *Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico* organizada por ICOMOS en 2003, se observa ya de manera más clara una ampliación de los criterios o principios a seguir en esta materia. En ella se hizo evidente la tarea de re-conocer y re-valorar el trabajo y uso de materiales y sistemas constructivos del pasado o de práctica tradicional, como elementos no sólo válidos de intervención segura, sino bajo una perspectiva de intervención contemporánea compatible:

2.3 La práctica de la conservación requiere un conocimiento exhaustivo de las características de la estructura y los materiales. Es fundamental disponer de información sobre la estructura en su estado original y en sus primeras etapas, las técnicas que se emplearon en la construcción, las alteraciones sufridas y sus efectos, los fenómenos que se han producido y, por último, sobre su estado actual.

3.7 La elección entre técnicas “tradicionales” e “innovadoras” debe sopesarse caso por caso, dando siempre preferencia a las que produzcan un efecto de invasión menor y resulten más compatibles con los valores del patrimonio cultural, sin olvidar nunca cumplir las exigencias impuestas por la seguridad y la perdurabilidad. [7]

De esta manera la recomendación principal para llevar a cabo cualquier intervención estructural sobre edificios existentes, parte de su conocimiento, de la correcta interpretación de su proceso evolutivo, incluido el patológico y, por supuesto, de control.

Las estructuras del patrimonio arquitectónico, por su peculiaridad y su compleja historia, requieren una organización de los estudios y análisis en distintos pasos, similares a los que se utilizan en medicina: anamnesis, diagnóstico, terapia y controles, que corresponden respectivamente a la inspección inicial, la identificación de las causas del daño y el deterioro, la elección de las medidas terapéuticas y el control de la eficacia de las intervenciones. Para ser rentables y producir un impacto mínimo en el patrimonio arquitectónico, a menudo es conveniente que los estudios repitan esos pasos de modo iterativo. [8]

RESULTADOS

A partir del análisis de la información relacionada con las formas y procesos de intervención se hace evidente que la intervención en las estructuras patrimoniales requiere de una perspectiva holista y basada en procesos detallados de conocimiento del inmueble por intervenir, su evolución, estado actual y, por supuesto, siempre con la vista puesta en el futuro, pues se trata de “legar” a las siguientes generaciones el patrimonio construido que tenemos actualmente en las mejores condiciones de conservación posible. Para ello, es posible agrupar las formas de interactuar con las estructuras preexistentes considerando los siguientes tipos:

Técnicas de continuidad estructural. A lo largo de su existencia el patrimonio edificado sufre una serie de deterioros que pueden resultar acumulativos si no son atendidos en tiempo y forma. Muchas de las construcciones existentes, en ocasiones, requieren pocos cambios en sus sistemas originales, sobre todo cuando las condiciones de uso y transformación han sido menores, desde el punto de vista estructural. En este sentido técnicas relativamente sencillas pero muy efectivas para dar continuidad al trabajo mecánico del edificio garantizan tanto las condiciones de seguridad como el respeto a su carácter patrimonial. Se trata de elementos que siempre tuvo el inmueble y que se pretende restituir o volver a colocar para recuperar sus condiciones de trabajo y comportamiento estructural originales o muy cercano a éste. Entre las principales acciones podemos señalar las siguientes: Rejunteo, recalces, injertos, inyecciones en fisuras y grietas, sustitución y reposición de componentes estructurales (muros, columnas, entresijos, cubiertas).

Técnicas de reforzamiento estructural. Una de las acciones más comunes en la intervención estructural está orientada a incrementar o mejorar el rendimiento estructural de un edificio existente. Las razones son múltiples: porque se trata de un inmueble de alto valor cultural con riesgo de estabilidad, por estar en una zona sísmica, por modificaciones en su contexto o subsuelo, por un cambio de uso. El hecho es que se requiere que el edificio sea más resistente ante las cargas y efectos permanentes o accidentales. Las técnicas en este sentido casi siempre involucran no sólo la incorporación de elementos que nunca tuvo el edificio sino incluso la modificación dimensional, material y formal de los elementos portantes. Es fundamental partir de la premisa de que los elementos nuevos y existentes interactúen de manera conjunta como una unidad nueva. El reto es mayor ya que se debe mantener buena parte de su consistencia física y formal, pero simultáneamente alterar lo menos posible el trabajo mecánico y no impactar elementos decorativos y funcionales. Entre las principales acciones en este ámbito están: la re-cimentación (ampliación de base, micro-pilotes, confinamiento lateral), incorporación de elementos de liga (trabes, tensores, columnas), incorporación de elementos de soporte adicional (contrafuertes, columnas, muros de rigidez) y revestimientos mejorados (aplanados armados).

Técnicas de sustitución estructural. Por último, se pueden distinguir intervenciones que, por diversas razones, incorporan de manera parcial o total un nuevo sistema

estructural, paralelo al existente, pero independiente del mismo. El criterio apunta a que la nueva estructura absorbe el trabajo mecánico en su totalidad para no comprometer o exigir a la estructura existente un trabajo para el cual no está diseñado. Esto permite un alto grado de reversibilidad, poco impacto sobre la consistencia física de la preexistencia, pero en ocasiones un alto impacto formal sobre el conjunto. Los tipos de intervención obedecen a tres grandes criterios: Estructuras parciales integradas auto-portantes (entrepisos, fachadas); Estructuras totales integradas auto-portantes y Estructuras de protección auto-portantes (cubiertas sobre el inmueble).

A partir de esta tipología general, se puede sintetizar una serie de consideraciones generales surgidas a partir de la experiencia directa, la discusión de especialistas y el trabajo permanente de instituciones e individuos preocupados por el tema de la conservación, especialmente en lo relacionado con la consolidación física [9] [10]. No se trata de una receta o “checklist” a seguir al pie de la letra, ya que no todo es aplicable a cada caso y la intensidad debe ajustarse de acuerdo a las condiciones particulares del lugar o edificio. Los factores a considerar son:

- 1.- Mínima alteración:** se trata de respetar al máximo posible los valores patrimoniales de los inmuebles a intervenir, lo que implica tener conciencia del sitio en el que se está trabajando en aras de contribuir a conservar su autenticidad, características, apariencia y materialidad.
- 2.- Compatibilidad:** la intervención debe tener afinidad con las características originales de los sistemas constructivos y espacialidad del inmueble desde el punto de vista químico, mecánico, tecnológico y arquitectónico
- 3.- Re-tratabilidad:** es deseable que los elementos o medidas implementadas, puedan ser retiradas, desmanteladas o removidas sin daño o deterioro permanente a las estructuras originales, para que el inmueble recupere su condición previa a la intervención.
- 4.- Eficacia:** los materiales y técnicas utilizadas deben ser eficientes, con bases “probadas” de preferencia mediante valoraciones cualitativas y cuantitativas sustentadas en la experiencia local.
- 5.- Durabilidad:** Dado que la intervención sobre la estructura casi siempre implica una acción de cierta envergadura, la resistencia y estabilidad de los materiales y técnicas en el largo plazo es siempre deseable. Sin embargo, los componentes nuevos no deberían tener resistencias mucho mayores que los originales a fin de que, en caso de que se presenten eventos dañinos, los materiales que fallen sean los incorporados.
- 6.- Conocimiento y adecuación al contexto tecnológico del lugar:** el patrimonio edificado fue concebido y materializado en base a condiciones específicas de tiempo y espacio, las cuales no siempre prevalecen hasta nuestros días. Conocer las posibilidades tecnológicas disponibles, o reproducibles en el sitio es una evaluación necesaria en el proceso de diseño, su posterior implementación en campo y su indispensable mantenimiento a futuro.
- 7.- Consideración global de las repercusiones de la intervención:** cualquier acción que se realice en un inmueble preexistente tendrá un efecto o impacto sobre el mismo.

El “Impacto 0” no es posible, más bien se trata de evaluar los efectos negativos y positivos que la intervención puede tener sobre la edificación.

8.- Bajo impacto ambiental: uno de los factores que van cobrando mayor fuerza como medio de ponderación en la restauración, se refiere a la huella ecológica. Argumentos como la integridad, autenticidad o armonía a los que hace referencia la teoría y normatividad son difíciles de evaluar, pero, ante los problemas de contaminación y agotamiento de los recursos del planeta, los indicadores sobre el impacto ambiental de los materiales y sistemas empleados en la edificación pueden convertirse en parámetros objetivos y convincentes en la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

La conservación e intervención estructural del patrimonio edificado son actividades que requieren una mayor difusión y práctica entre la sociedad en general, pero también en el ámbito profesional en esta materia. Es importante que se integren equipos multidisciplinarios para abordar este tipo de proyectos, pero muy especialmente se requiere una mayor interacción entre ingeniería y arquitectura para garantizar seguridad y autenticidad; deben ser, ambos, objetivos de los profesionales involucrados.

Esta reflexión de formas de intervención estructural en inmuebles patrimoniales hace evidente la existencia de una preocupación por aplicar técnicas de construcción que disminuyan su impacto sobre dichos bienes. Se trata de buscar procedimientos cada vez menos invasivos, respetuosos del entorno a diferentes escalas (componente, edificio, paisaje), que no afecten negativamente la autenticidad de los valores históricos, estéticos, simbólicos y sociales de la arquitectura y su entorno. La recuperación del patrimonio edificado será un proceso sostenible en la medida que incorpore componentes cuya elaboración demande el menor derroche de recursos posible y que generen la menor cantidad de desechos a la tierra, el aire y el agua. Pero, simultáneamente existe la necesidad de dar viabilidad y seguridad a la conservación de dichos bienes en el largo plazo lo que pasa necesariamente por adoptar nuevos patrones de intervención y mantenimiento.

Es evidente que en el ámbito del patrimonio cultural más que intentar aplicar *formas* reglamentarias predeterminadas para consolidar inmuebles patrimoniales, se requiere desarrollar *procesos* de conocimiento y diagnóstico específicos a cada edificio como base del proyecto de intervención estructural. Así mismo, el monitoreo y evaluación post-ocupacional de las medidas adoptadas es una práctica que debe implementarse con mayor regularidad por parte de instituciones, profesionales, investigadores y organismos responsables de la conservación del patrimonio edificado.

Referencias

[1] F. Peña, y P. B. Lourenço, “Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas”, Revista de Ingeniería Sísmica 87, www.smis.org.mx/rsmis/n87/pena.pdf (2012): pp. 47-66.

[2] F. J. Soria, “La integración en la restauración de bienes culturales inmuebles”, Anuario de estudios de arquitectura. Historia, crítica, conservación (México D. F., México, UAM-Azcapotzalco, (1999): pp. 147-165.

[3] F. J. Soria, “Consideraciones sobre técnicas de integración arquitectónica” Disertaciones Revista de difusión cultural 2 (Aguascalientes, México, Supremo Tribunal de Justicia del Estado de Aguascalientes, 1991): pp. 65-74.

[4] Carta de Atenas, “Carta de Atenas para la restauración de monumentos históricos”, www.icomos.org/doc/teoria/VARIOS.1931.carta.atenas.restauracion.monumentos.historicos.pdf

[5] L. F. Guerrero, “Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva” Apuntes, 20 (2) (Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, 2007): pp. 181-201.

[6] L. F. Guerrero, “La cal y el patrimonio edificado”, La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural 12, Abril (Oaxaca, México, Instituto del Patrimonio Cultural, 2008): pp. 17-29.

[7] ICOMOS 2003, “Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico”, www.international.icomos.org/charters/structures_sp.pdf

[8] ICOMOS 2004, “Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico”, www.coacyle.com/descargas/cat_coacyle_1177671040.doc

[9] N. Avramidou, “Técnicas de intervención tradicionales y adelantadas para el refuerzo estructural de los edificios dañados por los terremotos criterios proyectuales impuestos por las normas y responsabilidades legales y morales”, Actas de Congreso Internacional de Rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación, Tomo II (2010), CICOP, Sevilla.

[10] C. Díaz, “La rehabilitación de los elementos estructurales de la arquitectura tradicional mediterránea”, (2008), http://www.rehabimed.net/Publicaciones/Metode_Rehabimed/II.%20Rehabilitacio_Ledifici/ES/2a%20Parte.%20Herramienta%208.pdf

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS DE DETERIORO DE MORTEROS UTILIZADOS EN LA CATEDRAL DE SAN FRANCISCO DE CAMPECHE

S. Ake-Lopez¹, J. Reyes¹, E. Casanova¹, T. Pérez¹, A. Bedolla², P. Bartolo-Pérez

¹Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.

²Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacan, México.

³CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

En los últimos años, el laboratorio de Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche ha dedicado numerosos esfuerzos para estudiar de la degradación de materiales pétreos en edificios del centro histórico de la ciudad de San Francisco de Campeche, Patrimonio Cultural de la Humanidad. Entre estos edificios destaca la catedral de Nuestra Señora de la Purísima Concepción, que ha estado expuesta a la acción del ambiente marino de la ciudad desde el inicio de su construcción en el siglo XVII y en años recientes a la presión originada por su expansión urbana. Este trabajo es un estudio de la degradación observada en morteros y piedra de cantera de la catedral, realizado mediante análisis por microscopía óptica y SEM/EDX, y espectroscopía FTIR. Los resultados demuestran la interacción existente entre los agentes ambientales y los componentes de estos materiales.

Palabras clave: edificios históricos, caracterización de materiales, deterioro, San Francisco de Campeche

ABSTRACT

Since 2004, the Historical and Artistic Materials Conservation Lab from the Corrosion Research Center have been studied the degradation phenomena occurring on historic buildings from San Francisco de Campeche City. This document is focused in the analysis of the deterioration of calcareous mortars and quarry blocks stones from the "Nuestra Señora de la Purísima Concepción Cathedral", one of the most important buildings of the city. The cathedral was built during XVII century. Since that moment, it have been submitted to the action of tropical climate parameters and recently by the atmospheric pollutants produced due to the urban expansion of the city. In this contribution FTIR spectroscopy, optical microscopy and SEM/EDX analysis were carried out in samples retired from walls and the cupola of the building. Results indicate the real interaction between stony materials and environment.

Keywords: historic buildings, materials characterization, deterioration, San Francisco de Campeche City.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de San Francisco de Campeche constituye hoy en día una de las principales reservas históricas, culturales y arquitectónicas de México. Su arquitectura cuenta con destacadas construcciones hechas con materiales calizos, que datan de la época Colonial que convive con el pasado histórico de sus habitantes y un presente con intensa actividad urbana.

La catedral de Nuestra Señora de la Purísima Concepción se encuentra ubicada en la parte norte de lo que fuera el antiguo recinto amurallado que rodeaba la ciudad, fue terminada de construir en 1850 con la edificación de su segunda torre. Está conformada de una sola nave de planta en forma de cruz dividida por arcos en su interior, posee una cúpula en su último arco, en la parte norte se encuentra un patio interno y tanto la fachada como el muro sur se encuentran expuestos a emisiones originadas por el tránsito vehicular (Figura 1). La catedral fue construida con una combinación de bloques de piedra caliza de cantera y arena, cal y margas de arcilla de carbonato reposado conocido en la región como sahcab (en maya yucateco). Actualmente, este edificio funciona como sede del Obispado y la capilla interior es utilizada como Museo de Arte Sacro¹. A diferencia de otras construcciones presentes dentro del complejo histórico de la ciudad, la catedral no ha sufrido daños físicos ocasionados por el hombre, aunque dada las condiciones ambientales sí está influenciada por la brisa marina, dada su cercanía a la línea costera (450 m aproximadamente). Además, el ambiente tropical cálido húmedo predominante en la región, propicia altos niveles de humedad ambiental, lo que facilita la aparición de diversas patologías de deterioro visibles a simple vista, que afectan sus materiales constituyentes². Entre estas patologías, resultan visibles desprendimiento de morteros y fragmentos de roca de cantera, formación de costras de deterioro, arenización de morteros y crecimiento de colonias microbiana y plantas superiores sobre la superficie de muros, arbotantes y áreas exteriores de la cúpula de la catedral (Figura 1).



Figura 1. a) Catedral de San Francisco de Campeche en la actualidad, b) pérdida de mortero de recubrimiento y presencia de aves, c) aspecto general de la pared sur, d) pérdida de mortero en arbotante sobre la nave principal de la Catedral.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizó una inspección visual y levantamiento fotográfico, lo que permitió ubicar de manera precisa las patologías de deterioro que se presentaron en el edificio. Se registraron rasgos como: coloración, presencia de microorganismos, plantas y animales superiores, erosión, fracturas, pintura, cambios cromáticos y presencia de costras de deterioro entre otros.

Lo anterior permitió ubicar sitios de muestreo con patologías características en: fachada, cúpula, muro sur y torre norte. De estos sitios se retiraron muestras representativas de costra de deterioro (muestra A), piedra de cantera (muestra D), mortero intemperizado (muestras H) y mortero (muestra I).

Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR; Front- Refl ; BRUKER ALPHA), sin preparación previa de las muestras. El análisis se realizó en el rango de 500 a 4000 cm^{-1} , una resolución espectral de 0.09 cm^{-1} y 32 barridos m^{-1} .

Por otra parte, un fragmento de cada muestra fue embebido en posición transversal en resina policristalina y pulida con papel lija de diferente graduación hasta obtener una superficie uniforme, posteriormente fue analizado con un microscopio petrográfico Axioscop (Carl zeiss equipado con sistema de adquisición de imágenes), bajo una lámpara de luz fría. Estas estratigrafías fueron posteriormente analizadas en un microscopio electrónico de barrido acoplado a espectrómetro de rayos X (JEOL/ JSM – 7600 F), sin preparación previa. El análisis se realizó a 20 kV, distancia de trabajo de 10mm y ángulo de inclinación de 0°, se obtuvieron imágenes de alta resolución de las principales características morfológicas y la composición elemental de los muestras.

RESULTADOS

El análisis estratigráfico develó una superficie de los morteros que presentan una capa de productos de deterioro (costra) como consecuencia de la interacción del material con agentes ambientales. En muestras de la cúpula y torre se pudieron observar hasta dos capas de deterioro Figura (2): la primera, una capa externa de coloración oscura y aspecto poroso, y la segunda, que antecedió la matriz del mortero presentó aspecto cristalino, textura suave y espesor variable (100 a 200 μm). La zona externa, con características de costra, constituye un reservorio natural para materiales de origen externo tales como productos de emisiones antropogénicas, aerosoles marinos, partículas biogénicas o materia orgánica residual depositada por actividad biológica³. Estos materiales, contribuyen a proporcionar la coloración característica que adquieren las costras formadas en las zonas externas de morteros y materiales rocosos³. Por su parte, la muestra D (roca de cantera intemperizada) mostró una estructura homogénea y compacta, de escasa porosidad, bien cementada y aspecto de arenisca. Sobre la zona externa se observó una pequeña franja de material cristalizado con una ligera

tonalidad verde, probablemente de origen microbiano y en ocasiones restos de pigmento de tonalidad ocre.

Las imágenes al microscopio electrónico (250 X), permitieron visualizar una estructura compacta en la matriz de los morteros, con variedad de cargas de apariencia suave, homogéneamente distribuidos. La zona intermedia, que hace las veces de interfase entre la matriz del mortero y la capa externa, mostró la formación de conductos de forma tubular correspondientes a cortes longitudinales del sistema poroso de la zona interior del mortero (Figura 3a).

Por otra parte, la zona externa muestra una capa de deterioro con microestructuras menos compactas, porosas y de apariencia irregular. Por su parte, la Figura 3b, muestra lo que parece ser una estructura porosa en proceso de formación dentro de la matriz del estuco, en cuyo interior se observó el crecimiento de cristales de forma fibrilar probablemente relacionados con carbonato de calcio (Fig. 3b).

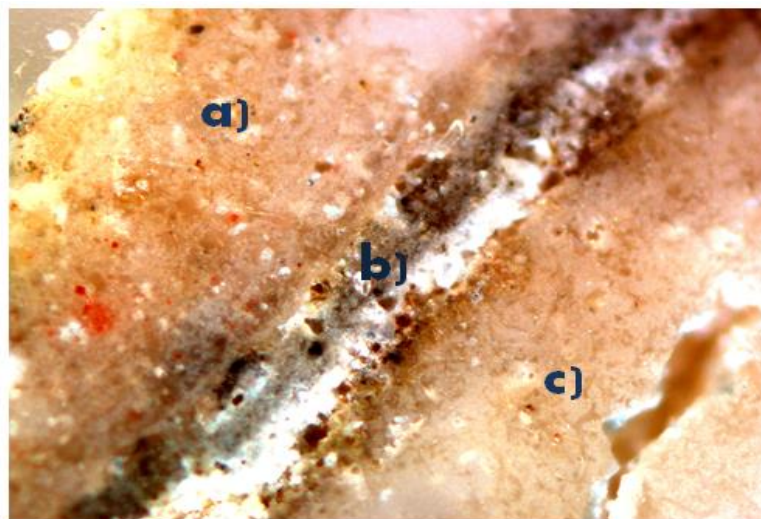


Figura 2. Estratigrafía correspondiente a una muestra de mortero proveniente de la cúpula de la catedral. a) cara exterior, b) capa intermedia de aspecto suave y textura deleznable, c) matriz de mortero.

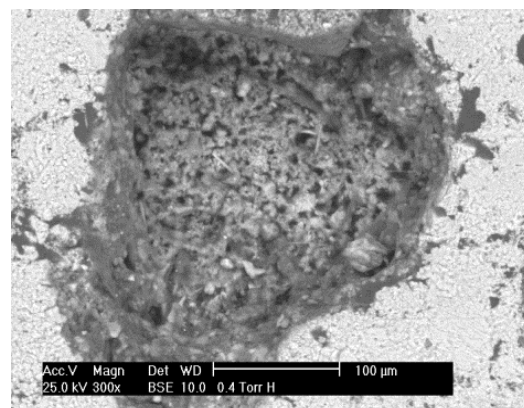
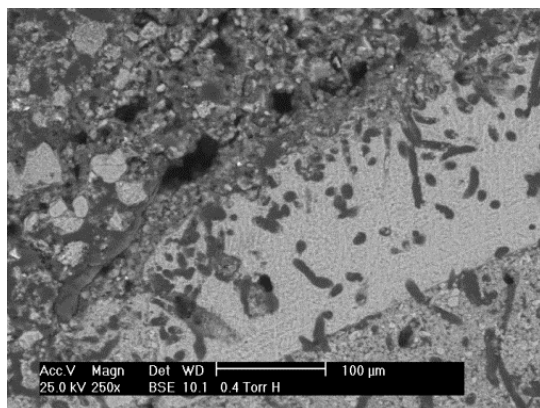


Figura 3. Imágenes obtenidas de análisis SEM a) aumento de 250x b) aumento de 300x

Los análisis realizados mediante EDX indican la presencia de Ca, O y C como elementos predominantes. Estos elementos son componentes del carbonato de calcio (CaCO_3), la fase mineral predominante en los materiales calizos. El CaCO_3 es un producto de neoformación observado en costras de deterioro de otros edificios históricos de San Francisco de Campeche^{4, 5}. Estas costras son originadas en procesos de disolución y recristalización de cementantes calizos favorecidos por la continua disponibilidad de agua proveniente del medio ambiente⁶.

Otros elementos también observados fueron Al, Si y Mg, los cuales corresponden a materiales presentes comúnmente en la roca madre de las canteras originales o formando arcillas que pudieron ser incorporados a los morteros durante su elaboración. Resulta relevante la presencia de los elementos S, Cl y P, de origen eminentemente ambiental, especialmente en el caso de la muestra D. El azufre puede tener un origen mineral, pues naturalmente se encuentra en como impurezas en bancos de materiales de origen sedimentario como los predominantes en la Península de Yucatán. Sin embargo, su presencia en zonas urbanas se relaciona estrechamente con el dióxido de azufre producido por emisiones de vehículos automotores y plantas industriales. Su ausencia en las cara interna de las muestras, tanto de roca como mortero parecen indicar origen antropogénico (Figura 4). La presencia de cloro se atribuye a los aerosoles marinos persistentes en el entorno marino urbano de la ciudad³ y su presencia preferencial en las caras externas respecto a las internas son indicadores de depósitos atmosféricos. Por su parte, el fósforo es un elemento que se relaciona con la excreta de aves, que es causa común de deterioro de edificaciones patrimoniales construidas con materiales pétreos.

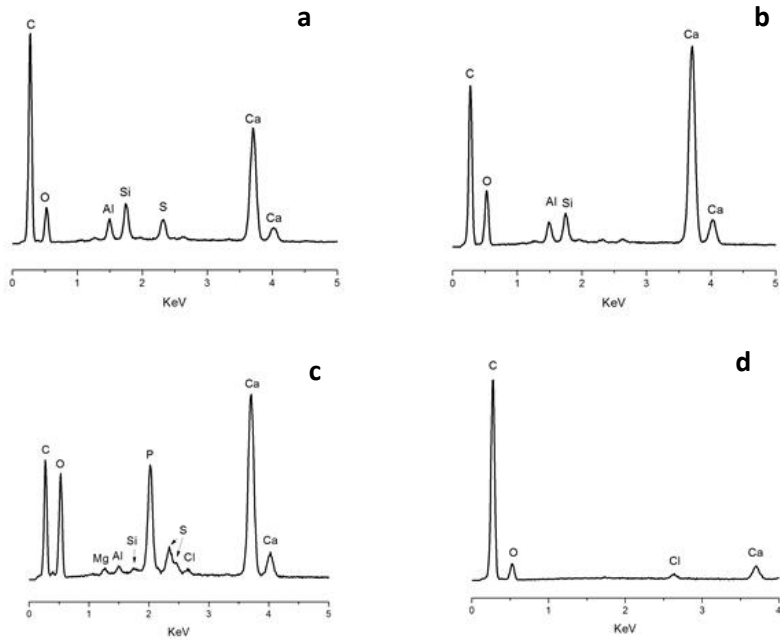


Figura 4.- Espectros EDX de las caras externa e interna de mortero (a y b respectivamente) y cara interna y externa de piedra de cantera (c y d respectivamente).

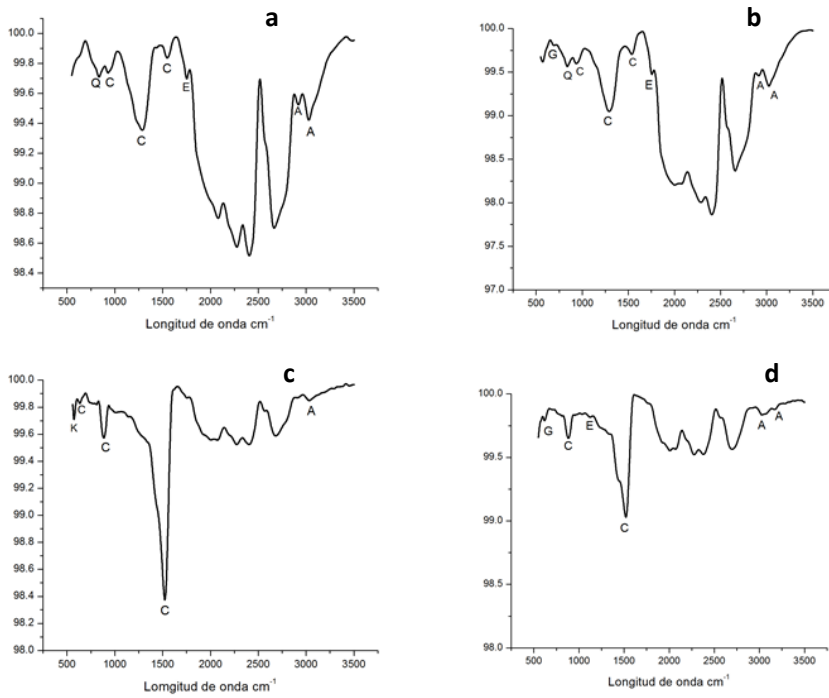


Figura 5. Espectros FTIR de las caras externa e interna de mortero (a y b respectivamente) y cara interna y externa de piedra de cantera (c y d respectivamente).

La Figura 5 muestra ejemplos de espectros FTIR generados en las caras interna y externa de muestras de mortero y piedra de cantera intemperizada. Los resultados demuestran que en todos los casos la fase mineral predominante parece corresponder a carbonato de calcio ($884, 1288, 1527 \text{ cm}^{-1}$), que es el constituyente primario de los materiales calizos empleados en la elaboración de los edificios coloniales de San Francisco de Campeche^{4,5}, mientras que como fases minoritaria se observó cuarzo (800 y 828 cm^{-1}). Por otra parte, en la cara externa de muestras de mortero y piedra de cantera se observó yeso (623 y 682 cm^{-1}) ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que es un producto de la reacción del dióxido de azufre con los sustratos calizos, y que dan lugar a costras de neoformación. Finalmente, se identificaron grupos funcionales de carácter orgánico perteneciente a ésteres (1755 cm^{-1}) e hidrocarburos alifáticos ($2900\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$), los cuales tienen origen biológico.

CONCLUSIONES

Los parámetros medioambientales influyen en el deterioro de los materiales superficiales de edificios históricos en la ciudad de San Francisco de Campeche, modificando la estructura y composición de compuestos presentes, que se aprecian como costras. Esta condición quedó de manifiesto en este estudio.

Las fases de carbonatos presentes señalan una posible ruta de formación por disolución y recristalización inducida por efectos ambientales y agentes antropogénicos.

La presencia de compuestos orgánicos revela interacción de los componentes pétreos con actividad biológica, que va desde microorganismos que se fijan y colonizan, hasta excretas de aves que reaccionan formando compuestos característicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco de la Red PROMEP Para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico. Se agradece el apoyo prestado por el Ing. William Cahuich del Laboratorio de Nano y Biomateriales del Cinvestav-Unidad Mérida.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ C. Mendoza Cruz. (2013). Evaluación de la Corrosión atmosférica sobre campanas históricas del patrimonio cultural campechano Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Campeche.
- ² J. Reyes, F. Corvo, Y. Espinosa-Morales, B. Dzul, T. Pérez, C. Valdés, D. Aguilar, P. Quintana. (2011). Influence of Air Pollution on Degradation of Historic Buildings at the Urban Tropical Atmosphere of San Francisco de Campeche City, México. In Air Pollution, Editorial INTECH, Viena. ISBN 978-953-307-526-6
- ³ F. Corvo, J. Reyes, C. Valdez, F. Villaseñor, O. Cuesta, D. Aguilar, P. Quintana. (2010). Influence of air pollution and humidity on limestone materials degradation in

historical buildings located in cities under tropical coastal climate. *Water, Air and Soil Pollution*. 205:359-375

⁴ G. Gutiérrez (2008). Caracterización de cotras de deterioro del Baluarte de San Carlos del conjunto histórico-arquitectónico de la ciudad de San Francisco de Campeche mediante técnicas analíticas avanzadas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Campeche.

⁵ J. Reyes, I. Silva, T. Pérez, F. Corvo, W. Martínez, E. M. Alonso y P. Quintana. (2012). El deterioro del Baluarte de San Pedro, un estudio de caso. *Revista ALCONPAT*, 2 (3), 170 – 184

⁶ Y. Espinosa-Morales, J. Reyes, D. Arano, R. Domínguez, J. L. Ruvalcaba, P. Bartolo-Pérez. Microscopic study of pre-hispanic stuccos from the Mayan City of Edzná, Campeche, México. *Acta Microscópica*. Vol. 22, No. 4, 2013



CONVOCATORIA 2015

La Facultad de Ingeniería Civil a través de la Subdirección de Estudios de Posgrado



Convocan a egresados de Ingeniería Civil y áreas afines a ingresar a sus programas de posgrado:

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN

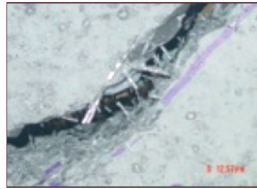
INGENIERÍA ESTRUCTURAL

BECA INTERNA



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

BECA CONACYT



INGENIERÍA AMBIENTAL

BECA CONACYT



Requisitos de Ingreso

- ✓ Título o pasantía del nivel anterior a ingresar, afín a las áreas de interés.
- ✓ Tener promedio mayor ó igual a 80 sobre 100.
- ✓ Presentar y aprobar el Examen General de Conocimientos (EXANI III) del CENEVAL y el Examen de Competencia en inglés (EXCI).
- ✓ Cumplir con lo establecido en el Reglamento General sobre los procedimientos de admisión y permanencia de los estudiantes y el Reglamento General del Sistema de Posgrado.
- ✓ Entrevistarse con al menos tres profesores del programa, miembros del comité de ingreso.
- ✓ Aprobar exámenes teóricos conceptuales de metodología científica y en diversos temas en las áreas de interés.
- ✓ Asistir a los cursos propedéuticos referentes a la metodología científica y en diversos temas en las áreas afines.
- ✓ Entregar oficio en donde se expongan los motivos para solicitar el ingreso al programa.
- ✓ Tres cartas de recomendación de personalidades de reconocido prestigio o desempeño profesional de preferencia en áreas de investigación y/o desarrollo.
- ✓ Ser estudiante de dedicación exclusiva.
- ✓ Ser aceptado por la Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación de la FIC.

Documentos requeridos

- ✓ Acta de nacimiento
- ✓ Curriculum vitae
- ✓ Seis fotografías tamaño infantil (color) fondo blanco
- ✓ Título y cédula profesional
- ✓ Copia de kárdex
- ✓ Escrito donde expresen los motivos para ingresar al Programa del Posgrado
- ✓ Certificados originales de secundaria, preparatoria y licenciatura (Egresados ajenos a la UANL)

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado

Registro 2015 en la página oficial de la U.A.N.L.:

www.uanl.mx

PERÍODO OFICIAL DE REGISTROS	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXCI	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXANI-III
1 al 20 de noviembre de 2014	28 de noviembre de 2014	29 de noviembre de 2014
1 al 18 de diciembre de 2014	9 de enero de 2015	10 de enero de 2015

Para ampliar la información

<http://www.fic.uanl.mx/posgrado/oferta/>

Dr. César A. Juárez Alvarado

Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Av. Universidad s/n
Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza
Nuevo León, México 66450

Tels: (81) 1442 4400 ext. 4447, 4448, 5206
(81) 8329 4000 ext. 7216, 7234

Correo electrónico:

cesar.juarezal@uanl.edu.mx

cesar.juareza@uanl.mx



"Educación de clase mundial, un compromiso social"



VI
CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

**T4.- PRESERVACIÓN,
MANTENIMIENTO Y
REHABILITACIÓN**



RESTITUCIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE POR TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS E INCREMENTO DE LA VIDA RESIDUAL MEDIANTE LA EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS.

D. GARCÍA¹, C. A. JUÁREZ¹, G. FAJARDO¹, P. CASTRO BORGES²

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
2. Centro de Estudios e Investigaciones Avanzadas, CINVESTAV, Unidad Mérida, Yucatán.

RESUMEN

Esta investigación en progreso tiene como objetivo rehabilitar de manera integral vigas de concreto reforzado, las cuales son expuestas a un deterioro por corrosión severa en el acero transversal (estribos), propiciado por la introducción de cloruros en la matriz cementante. Este deterioro fue alcanzado sometiendo a las vigas a ciclos de humectación y secado, además, de la aplicación de corriente eléctrica directa en los estribos por medio de fuentes de poder. La rehabilitación integral constará de dos etapas, la primera es la técnica de extracción electroquímica de cloruros cuya finalidad consiste en la remoción de la mayor cantidad de iones cloro y estabilizar los valores de E_{corr} , I_{corr} y la segunda etapa, es una reparación mecánica que permita restituir o inclusive mejorar la resistencia al cortante por tensión diagonal de las vigas de concreto reforzado utilizando métodos de reforzamiento, tales como, las láminas de fibra de carbona (CFRP) o placas de acero. Se llevará a cabo los ensayos mecánicos para evaluar la mejora en estas propiedades mecánicas, además, de predecir la vida útil residual del elemento dando seguimiento a los parámetros electroquímicos de E_{corr} , I_{corr} .

Palabras Clave: Corrosión, Cloruros, vida residual, Cortante, Reforzamiento.

ABSTRACT

This research in progress aims to holistically rehabilitate reinforced concrete beams, which are exposed to severe corrosion deterioration in the transverse steel (stirrups), led by the introduction of chlorides in the cementitious matrix. This deterioration was achieved by subjecting the beams to wetting cycles and also drying of applying direct electric current in the stirrups by power sources. The comprehensive rehabilitation will consist of two stages, the first is the technique of electrochemical chloride extraction whose purpose is the removal of as many chloride ions and stabilize the values of E_{corr} , I_{corr} and the second stage is a mechanical repair that allows restore or even improve

the shear strength of the bias voltage from reinforced concrete beams strengthening methods, such as fiber sheets carbona (CFRP) or steel plates. Mechanical assays were conducted to evaluate the improvement in these mechanical properties also to predict the residual life of the element to monitor the electrochemical parameters E_{corr} , I_{corr} .

Key words: Corrosion, Chloride, Residual Life, Shear, Reinforcement.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; gracias a éste se ha logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio. Sin embargo, una gran parte de lo encontrado está relacionado con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura [1].

La reducción de la durabilidad de las estructuras de concreto por causa de la corrosión se debe a la pérdida del estado pasivo, ya sea en grandes áreas a causa de la carbonatación o localmente por efecto de los cloruros que sobrepasan una concentración crítica, llevando a las estructuras de hormigón a la disminución de su vida de servicio [2]. Existen métodos convencionales de reparación que exigen el reemplazo del hormigón contaminado y la limpieza a fondo de las armaduras, así como costos elevados de reparación [3].

Esta situación ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas para reparar las estructuras corroídas. Un método alternativo de rehabilitación es la Extracción Electroquímica de Cloruros. Esta técnica consiste en utilizar una fuente de corriente, donde las varillas de acero se conectan a la terminal negativa (actuando como cátodos) y el electrodo externo a la terminal positiva (siendo el ánodo). Los iones cloruro con carga negativa migran a la superficie externa al aplicarse una densidad de corriente [4].

Una de las ventajas que ofrece la EEC consiste en la reducción de la concentración de Cl en el mortero por varias semanas, y no es de carácter destructivo, en comparación con las reparaciones convencionales [5].

Debido a esto, el deterioro del sistema acero-concreto provocado por la corrosión, es un fenómeno que desde hace décadas despertó el interés de muchos investigadores a nivel mundial, aunado al hecho de la importancia del concreto reforzado como el sistema de construcción más utilizado en el mundo [6].

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

MATERIALES A UTILIZAR

- Concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$
 - CPC 30 R (cemex)
 - Agregado grueso de la región de Monterrey, Nuevo León (piedra caliza)
 - Arena de la región de Monterrey, Nuevo León
 - Agua de la región de Monterrey, Nuevo León
- Acero longitudinal varillas de no 5 (5/8) $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Acero transversal varilla del num 2.5 $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$

- Pintura epóxica
- Cinchos
- Cinta de aislar
- Cimbra metálica

PRUEBAS EN LOS MATERIALES

- Densidad del cemento (ASTMC 188)
- Peso volumétrico (fino y grueso) (NMX-C-73)
- Absorción del agregado (NMX-C-165 fino) (NMX-C-164 grueso)
- Granulometría (fino y grueso) (NOM c-170-1986)
- Revenimiento en el concreto fresco (ASTM C 143)
- Contenido de aire en el concreto fresco (ASTM C 231)
- Peso volumétrico del concreto fresco (ASTM C 138)
- Compresión de cilindros de concreto (ASTM C 39/C39 M)
- Resistencia a tensión (NMX- B-6-1983)

FABRICACIÓN DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

- Utilizando el código del ACI 211 (diseño de mezclas de concreto)
- Fabricaremos 6 series de 2 vigas de concreto reforzado de 200 cm de longitud (base 20 cm y peralte de 35 cm), utilizando concreto de $f'c= 250$ kg/cm², varillas 5/8 de $f_y= 4200$ kg/cm² y varilla de 5/16 de $f_y= 6000$ a cada 15 cm.
- Se comenzara en cortar el número de varillas correspondiente a 200 cm de longitud.
- Se cortaran los estribos a una longitud con la cual cumpla con el recubrimiento de 2.5 cm.
- Se aplicara pintura epoxica en el acero longitudinal, esto con el fin de evitar la corrosión en este.
- Colocaremos un cable de cobre en la parte superior de cada estribo recubierto con silicón , el cual se encontrara un extremo unido al estribo y el otro extremo se encontrara libre fuera de la viga de concreto reforzado, este con el fin de poder medir potenciales de corrosión y poder transmitir corriente eléctrica desde el exterior de la viga.
- Se elaborara el armado respetando la separación de estribos de 15 cm, en la zona donde se haga contacto el acero transversal con el longitudinal se colocara cinta de aislar así como estos se unirán con cinchos de plasticos, esto para evitar el paso de la corriente eléctrica en el acero longitudinal ya que este proyecto solo quiere investigar fallas al esfuerzo cortante.
- Se elaborara la cimbra de acuerdo a las dimensiones fijadas en los cálculos y utilizando una longitud de 200 cm, después se recubrirá esta con grasa esto con el fin de lubricar y facilitar el desmolde de la vigas.
- Se procederá a realizar el colado con nuestro concreto de $f'c= 250$ kg/cm²
- Las vigas llevaran un proceso de curado hasta los 28 días.

INDUCCIÓN AL DETERIORO DE LAS VIGAS

Este proceso se realizara en ciclos de humectación y secado de 4 días con una solución nacl de 3.5 % que es una concentración similar a la de la salinidad del mar , esta solución se aplicara con un atomizador para que esta se encuentre distribuida lo más uniformemente posible, por último se colocara una corriente controlada.

REHABILITACIÓN ELECTROQUÍMICA

- Se colocara esponjas en la viga en los sitios donde queramos extraer cloruros
- Se recubrirá la viga con una malla de acero galvanizado la cual funcionara como anodo.
- Se conectaran las terminales en los lugares correspondientes (cátodo – cable de cobre unido al estribo, ánodo- malla de acero inoxidable).
- Se le transmitirá una corriente constante de 1 a/m² durante 5 días, luego se procederá a interrumpir este proceso 2 días
- Al pasar estos 2 días se tomaran lecturas de potencial de corrosión e intensidad de corrosión en todos los estribos con un contra electrodo de plata cloruro de plata.
- Este procedimiento se realizara en ciclos hasta observar que ya no se estén extrayendo cloruros de nuestra viga.

REHABILITACIÓN MECANICA

- Placas de acero

Se utilizaron conectores con placas de acero a compresión para reforzar la zona de corte en cada extremo de la viga.

- CFRP

Esta técnica consiste en reforzar las vigas con fibras de carbono (CFRP), del cual se colocó solamente una capa de fibra solo en la base y en los extremos de la viga.

RESULTADOS

CARACTERIZACION DE LA ARENA

Tabla 1. Peso volumétrico seco suelto de la arena realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-73)

muestra	Peso tina (g)	Peso tina + agregado (g)	Volumen tina (cm ³)	PVSS (kg/m ³)
1	2388	7047	2711	1719
2	2388	6989	2711	1697
3	2388	7081	2711	1731
4	2388	6973	2711	1691
5	2388	7029	2711	1712

Tabla 2. Absorción de la arena realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-165)

Muestra	PSSS (g)	PS (g)	Agua (g)	Absorción (%)
1	436.0	428.0	8.0	1.9
2	549.5	539.0	10.5	1.9
				1.9

Tabla 3. Densidad de la arena realizada de acuerdo a la norma

muestra	Lectura inferior (ml)	Lectura superior (ml)	Volumen desplazado (ml)	Peso seco (kg)	Densidad (kg/m ³)
1	200	405	205	537.5	2622
2	200	411	211	555.0	2630
					2626

CARACTERIZACION DE LA GRABA

Tabla 4. Peso volumétrico seco suelto de la graba realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-73)

muestra	Peso tina (g)	Peso tina + agregado (g)	Volumen tina (cm ³)	PVSS (kg/m ³)
1	4929	19859	9917	1503
2	4929	19932	9917	1513
3	4929	20038	9917	1524
4	4929	19946	9917	1514
5	4929	20087	9917	1528
				1517

Tabla 5. Peso volumétrico varillado seco de la graba realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-73)

muestra	Peso tina (g)	Peso tina + agregado (g)	Volumen tina (cm ³)	PVSS (kg/m ³)
1	4929	21200	9917	1641
2	4929	21220	9917	1643
3	4929	21073	9917	1628
4	4929	21268	9917	1648
5	4929	21215	9917	1642
				1640

Tabla 6. Absorción de la graba realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-164 grueso)

Muestra	PSSS (g)	PS (g)	Agua (g)	Absorción (%)
1	1332.5	1327.5	5.0	0.4
2	1973.0	1966.5	6.5	0.3
				0.4

Tabla 7. Densidad de la graba

Muestra	Peso seco (g)	Volumen (ml)	Densidad (kg/m3)
1	3096.5	1140.0	2716
2	3423	1256.5	2724
			2720

Caracterización del cemento

16-jul-2014 15:25:02

Sample results

Page 1

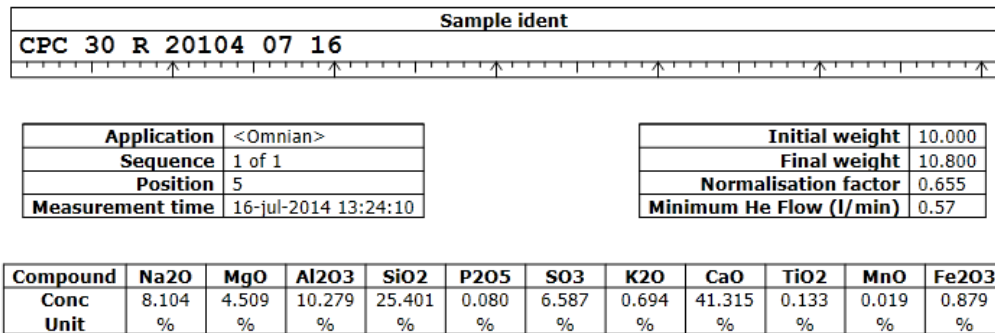


Figura 1. FRX del cemento CPC 30R

Tabla 8. Densidad del cemento CPC 30R realizada de acuerdo a la norma (ASTMC 188)

muestra	Peso (gr)	Lectura inicial (ml)	Lectura final (ml)	Densidad (kg/m3)
1	64	1.2	22.4	3010

Caracterización del acero longitudinal y transversal

Grafica esfuerzo deformación acero longitudinal

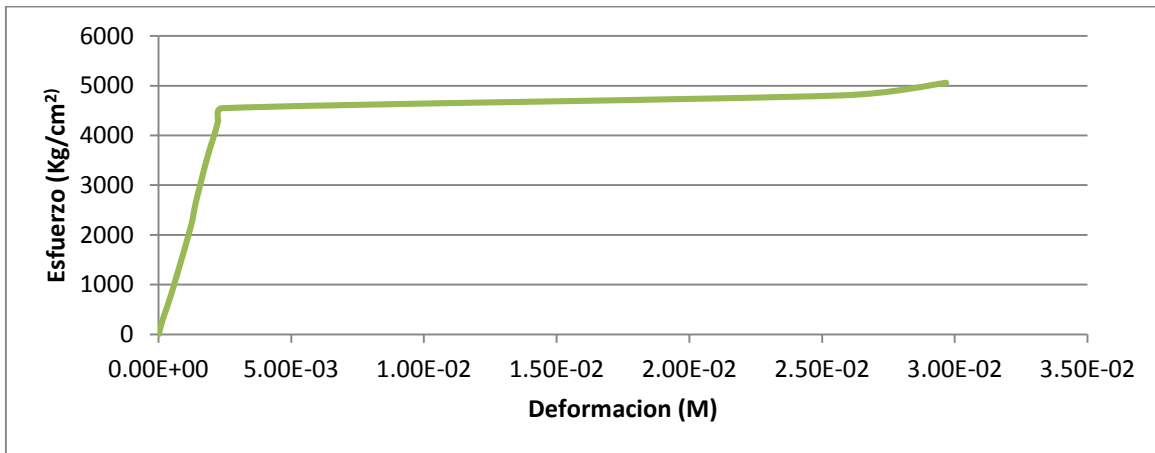


Figura 2. Cuerva de esfuerzo-deformación de varilla de acero 5/8 $f_y = 4200$ kg/cm² (prueba realizada de acuerdo a la norma "NMX- B-6-1983")

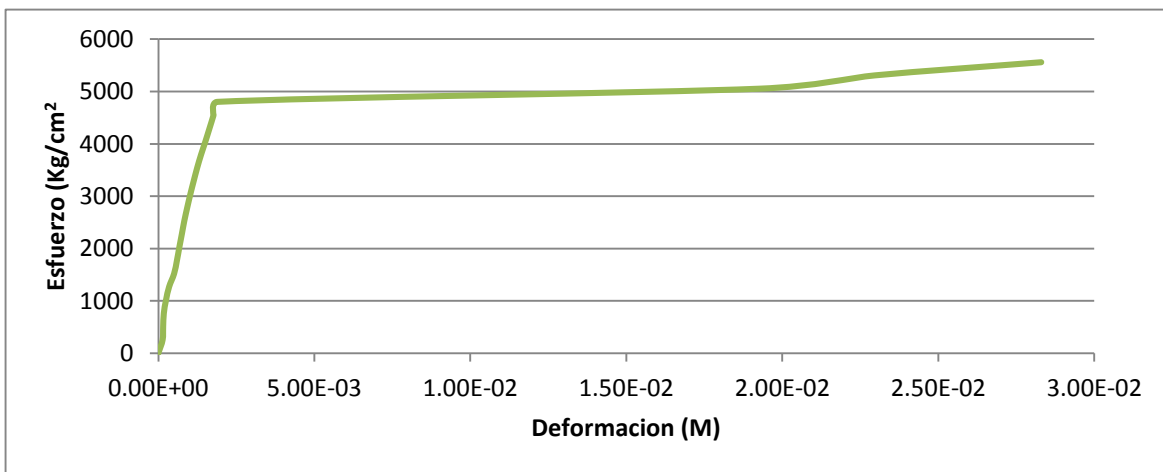


Figura 3. Cuerva de esfuerzo-deformación de varilla de acero 5/8 $f_y = 4200$ kg/cm² (prueba realizada de acuerdo a la norma "NMX- B-6-1983")

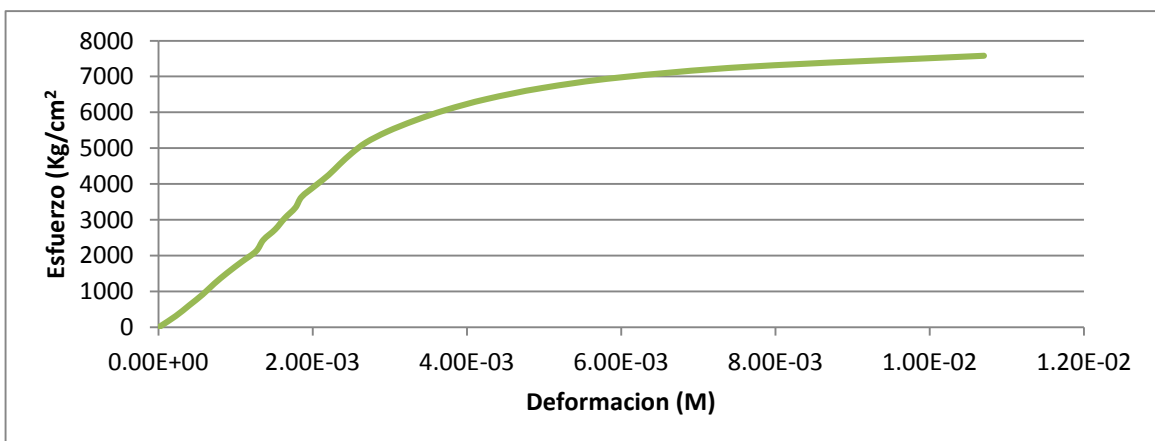


Figura 4. Cuerva de esfuerzo-deformación de varilla de acero 5/16 $f_y = 6000$ kg/cm² (prueba realizada de acuerdo a la norma "NMX- B-6-1983")

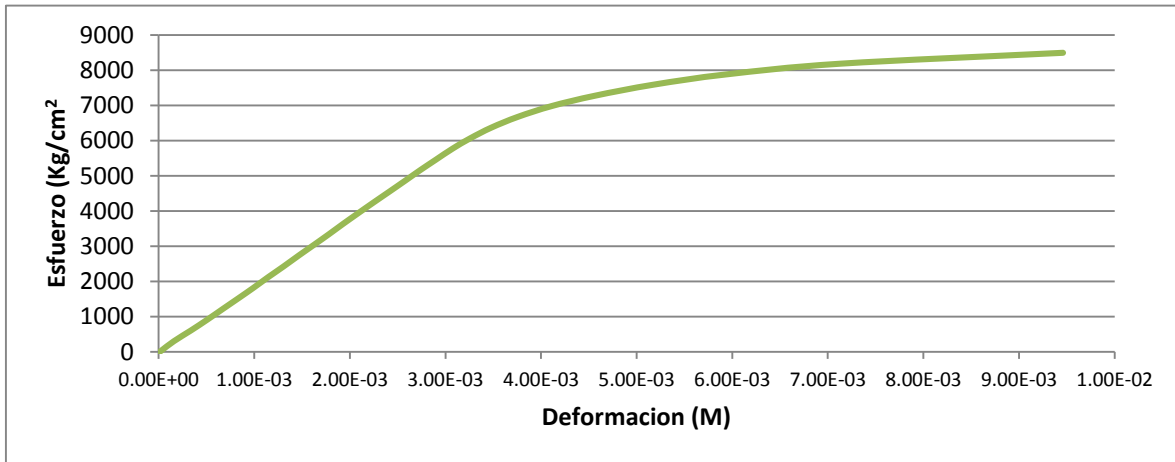
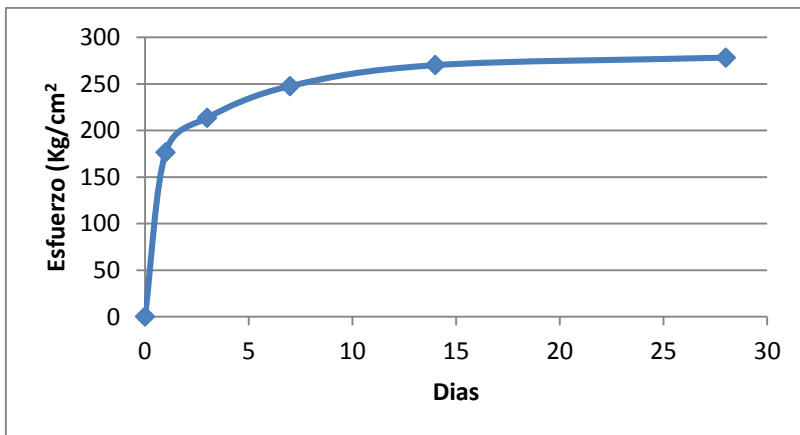


Figura 5. Cuerva de esfuerzo-deformación de varilla de acero 5/16 $f_y = 6000$ kg/cm² (prueba realizada de acuerdo a la norma "NMX- B-6-1983")

Concreto



- **Figura 6. Resistencia a compresión del concreto $f'_{cr} = 278$ kg/cm² realizada de acuerdo a la norma (ASTM C 39/C39 M)**

CONCLUSIONES

Conclusiones obtenidas con los resultados preliminares son las siguientes:

- Obtuvimos densidades, absorciones y PVSS y PVVS de los agregados así como la densidad del cemento con los cuales fabricaremos nuestro concreto.
- Obtuvimos los valores de fluencia del acero longitudinal como del acero transversal, el cual nos sirve para hacer el diseño de nuestra viga.
- Se realizaron mezclas y encontramos el proporcionamiento más adecuado el cual nos arroja una resistencia $f'_{cr}=278 \text{ kg/cm}^2 > f'_{c}=250 \text{ kg/cm}^2$
- Por ultimo cabe recalcar que estos resultados son pruebas preliminares y espero que al finalizar esta investigación se llegue a los resultados esperados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hernández-Castañeda O. y Mendoza Escobedo C. J., Durabilidad e Infraestructura: Retos e Impacto Socioeconómico, INGENIRÍA Investigación y Tecnología VII 1, Universidad Autónoma de México, Distrito Federal. México, (2006): pp. 57 – 70.

[2] Browne R.D., Geoghegan M.P., Baker A.F. Analysis of Structural Condition from Durability Results, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, ed. AP, Londres, Crane SCI, 1983, pp. 193-222.

[3] Biezma M.V., San Cristobal J.R. Is the Cost of Corrosion Really Quantifiable. *Corrosion*, volumen 62 (número 12), 2006: 1051-1055.

[4] Rodriguez-Reyna, Espericueta-González D.E., Miranda-Vidales J.M., Gaona-Tiburcio C., Resultados de una EEC variando los grados de Corrosión y el tiempo de aplicación de la técnica, Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIII (número 4), octubre-diciembre 2012.

[5] Lankard *et al.* Neutralization of Chloride in Concrete. Report No. FHWA–RD–7660, 1975, pp. 1-143.

[6] Elsener B., Andrade C., Gulikers J., Polder R. y Raupach M., Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures, RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 36, August-September (2003) 46-471.

CORRELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES Y MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS EN MORTEROS DE REPARACIÓN EXPUESTOS A CLORUROS

E. U. De Los Santos¹, J. M. Mendoza Rángel¹, C. A. Juárez Alvarado¹, J.M. Flores Jarquín¹, P. Garcés Terradillos²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad s/n Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., México

² Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura, Urbana. Universidad de Alicante, Alicante, España.

RESUMEN

En esta investigación se evalúan tres tipos de morteros pre-empacados disponibles en la ciudad de Monterrey y tres morteros a base de cemento con sustituciones de ceniza volante (0%, 20% y 50%). Se realizó la caracterización por FRX, DRX y MEB, adicionalmente se fabricaron especímenes con dos barras de acero embebidas para medir su desempeño por medio de Resistencia a la Polarización Lineal (Intensidad de corriente y potenciales de corrosión) en una solución con cloruro de sodio cuya concentración es de 0.5M y se correlaciona la composición física y química con su comportamiento electroquímico. Se observa un buen desempeño de los morteros 0% y 20 de ceniza volante comparado a un mortero comercial que contiene aditivos especiales.

Palabras claves: Corrosión, Mortero de Reparación, Caracterización Micro-estructural, cloruros, análisis de tamaño de partícula.

ABSTRACT

In this research, a total of six mortar are evaluated, three mortars available in Monterrey city and three cement based mortars with substitution of fly ash (0%, 20% and 50%). Characterization test were made by FRX, XRD and SEM, in addition to this analysis previous on powder without mixing water, specimens with two embedded steel bars and graphite counter electrode were cast to be test by Linear Polarization Resistance (corrosion potentials and current intensity) when exposed to a 0.5M sodium chloride solution, initial composition and performance were correlated. Good performance is noticed in mortars with 0% and 20% of fly ash compared with one commercial mortar with special additives.

Keywords: corrosion, repair mortar, microstructural characterization, chlorides, particle size analysis.

INTRODUCCIÓN

La construcción de estructuras de concreto en medios marinos normalmente presentan daños por corrosión del acero de refuerzo, el principal elemento que causa la corrosión son los cloruros. Mucho trabajo se ha hecho al respecto para mejorar la durabilidad del concreto reforzado en estos ambientes, desde disminuir la permeabilidad del concreto por medio del uso de cementantes suplementarios como la ceniza volante, escoria, microsílíce^{1,2}, esto con la el fin de tener una matriz cementante más densa y menos permeable que disminuya o impida el ingreso de los cloruros al interior del concreto o que incremente el tiempo en que los agentes dañinos lleguen al acero de refuerzo.

Algunos otros factores que controlan la permeabilidad son la relación agua/material cementante (a/mc) y el tipo de agregado ya que este factor afecta directamente a la porosidad del material³, a menor relación a/mc se obtiene una menor porosidad⁴, los agregados también afectan a la difusión de los cloruros ya que sus poros también funcionan como medio para el ingreso de los mismos³. Es por esto que la selección de los materiales adecuados es de gran importancia para un buen desempeño y durabilidad.

Cuando el daño en los elementos es de manera localizada y cuando aún brinda suficiente soporte, se puede optar por utilizar un sistema de reparación por parcheo de la zona dañada, el daño por corrosión a edades avanzadas se presenta como agrietamientos visibles en la superficie de manera paralela al acero de refuerzo de allí su fácil identificación. El sistema de reparación por parcheo consiste en eliminar el concreto que se encuentra contaminado y delaminado dejando el acero expuesto para realizar una limpieza y posterior sustitución del concreto por algún concreto o mortero. La selección del material adecuado es de vital importancia para lograr una reparación óptima para lo cual se deben tomar ciertos parámetros para el mejor desempeño de la reparación, estos van desde compatibilidades estéticas, físicas como resistencia a compresión, módulo de elasticidad, adherencia, porosidad, permeabilidad, cambio de longitud hasta compatibilidades químicas como pasivación del acero, similitud de composición con el concreto o material base^{5,6}.

Dado la problemática planteada anteriormente se muestra esta investigación como parte de un trabajo de más amplio que comprende el estudio de algunos morteros de reparación de manera integral considerando varias características importantes para una realizar una reparación que considere de manera integral todos o la mayor parte de los factores que inciden en el deterioro de las estructuras y sus reparaciones. En este trabajo se evalúan seis morteros distintos, 3 a base de cemento portland ordinario con sustituciones de ceniza volante y tres morteros disponibles en el mercado local de la ciudad de Monterrey, Nuevo León los cuales están señalados específicamente por cada uno de sus fabricantes como morteros a ser utilizados con fines de reparación. Estos morteros fueron evaluados mediante su desempeño frente a la corrosión por cloruros.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados fueron Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40), Ceniza volante tipo F, agregado calizo, estos para la elaboración de tres morteros sin ningún aditivo, uno de referencia con una relación $a/mc=0.5$, una proporción agregado: material cementante (ag:mc) de 3:1, estos morteros se hicieron solo en base a estas proporciones

sin ningún aditivo además de variar los contenidos de ceniza volante en 0% para la referencia (REF), 20% de ceniza volante (20FA) y 50% de ceniza volante (50FA). Además de utilizarse otros tres morteros disponibles localmente ya preparados y específicamente para realizar reparaciones, cuyas características principales de acuerdo al fabricante se pueden observar en la

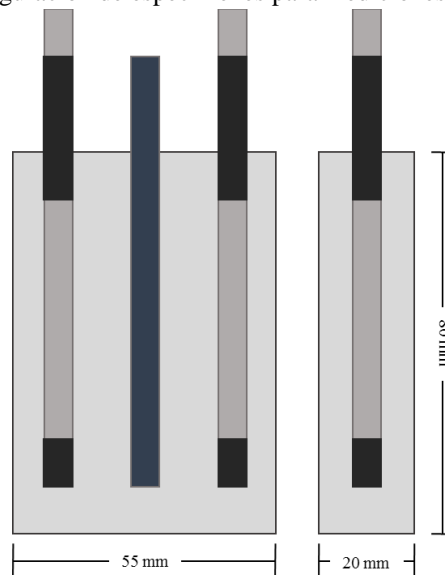
:

Tabla 1. Características de acuerdo al fabricante de los morteros comerciales

Mortero	Resistencia (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Adiciones y características relevantes
C1	75.8	9.0	A base de cemento, con micro sílice y retracción compensada
C2	40.7	6.3	Cemento portland con agregados finamente procesados y aditivos específicos
C3	63.4	10.6	Alta resistencia, mono componente, modificado con polímero y micro sílice

Cada uno de los materiales utilizados fue caracterizado para conocer su composición y desempeño frente a la corrosión. Para la caracterización física y química se llevaron pruebas de Análisis de tamaño de partícula, micrografía y EDS por MEB y FRX para obtener la composición en óxidos. Cabe mencionar que las pruebas se realizaron en los materiales antes del mezclado donde aún no se tienen compuestos de hidratación.

Figura 1. Configuración de especímenes para mediciones electroquímicas



Para las pruebas electroquímicas se recurrió a la técnica de resistencia a la polarización lineal (RP) con una velocidad de barrido de 0.06 mV/s y solo en la zona catódica yendo de 0 a -10 mV, de este procedimiento se obtuvieron potenciales de corrosión (E) y velocidades de corrosión que nos indican el estado de la varilla embebida en cada una de las matrices antes descritas estas mediciones se llevaron a cabo utilizando como referencia un electrodo saturado de Calomel.

Para la prueba de RP se fabricaron especímenes de 20x55x 80 mm con dos varillas corrugadas embebidas con diámetro de 6 mm y longitud de 100 mm, en cada una de las

varillas se delimitó el área de ataque colocando cinta aislante y dejando una longitud de 50 mm expuesta dentro del espécimen, al centro se colocó un electrodo de grafito del mismo diámetro para ser utilizado como contra electrodo una imagen de la configuración se muestra en la Figura 1. El mezclado de los morteros REF, 20FA y 50FA se realizó siguiendo el procedimiento de mezclado de la norma ASTM C305, después se procedió al llenado de los moldes de especímenes para pruebas de corrosión, mientras que para los morteros comerciales se realizó de acuerdo a los tiempos especificados en cada producto por el fabricante.

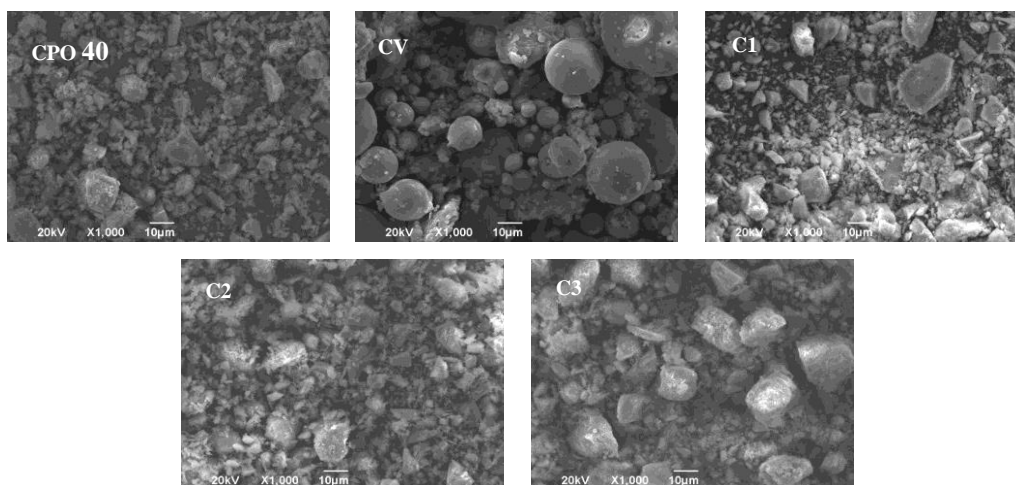
Después del moldeo de los especímenes, se mantuvieron por un día en los moldes cubiertos con hule para evitar la pérdida de humedad, pasado este tiempo se desmoldaron y se cubrieron con cinta aislante sobre la parte expuesta del acero dispuesta para la medición y se colocaron en un cuarto de curado hasta completar la edad de 14 días. Pasado el lapso de tiempo dispuesto para el curado, los especímenes en ambiente de laboratorio hasta alcanzar la edad de 35 días en que se comenzó el deterioro por medio de la exposición a una solución de cloruro de sodio 0.5M. Los especímenes se retiraron durante el tiempo de curado durante el tiempo requerido para la medición por Resistencia a polarización y lo mismo para el periodo de deterioro en inmersión.

RESULTADOS

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la Figura 2 se muestran las imágenes con una magnitud de amplificación de x1000 en donde se puede observar el tamaño de partículas mostrado y la morfología característica de la ceniza volante. De esta figura se puede observar una morfología similar para las partículas del cemento y los morteros comerciales

Figura 2. Micrografías de materiales



Fluorescencia de Rayos X (FRX)

En la

Tabla 2 se muestra una comparativa de la composición en óxidos de cada uno de los materiales, cabe mencionar que las diferencias en contenido de SiO₂, CaO son

relevantes desde el punto de vista que se modifican de acuerdo al tipo de agregado y óxidos como Al_2O_3 y SO_3 que forman compuestos que influyen en la hidratación.

Tabla 2. Composición en óxidos de los materiales y morteros por FRX

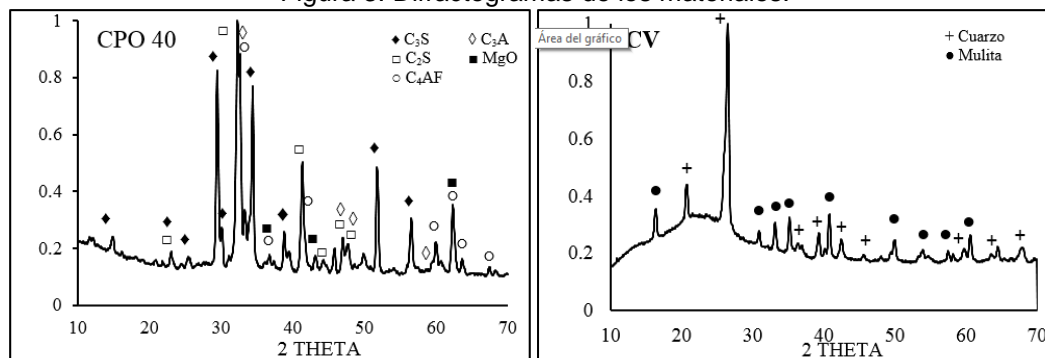
Compuesto	OPC 40	CV	C1	C2	C3
SiO_2	17.43	56.511	70.319	44.767	76.993
Al_2O_3	4.669	33.105	4.901	11.327	6.899
Fe_2O_3	2.245	1.486	0.693	0.858	0.306
CaO	63.271	0.698	18.193	24.437	6.589
MgO	1.23	1.667	1.667	3.277	0.678
SO_3	4.9814	0.344	1.8	12.798	0.784
Na_2O	0.5634	3.315	-	-	4.77
K_2O	0.746	0.518	0.329	0.314	0.941
TiO_2	0.2435	0.357	0.054	0.117	0.036
P_2O_5	0.093	-	-	-	-
MnO	0.073	-	0.021	0.105	0.004
SrO	-	-	0.012	-	-

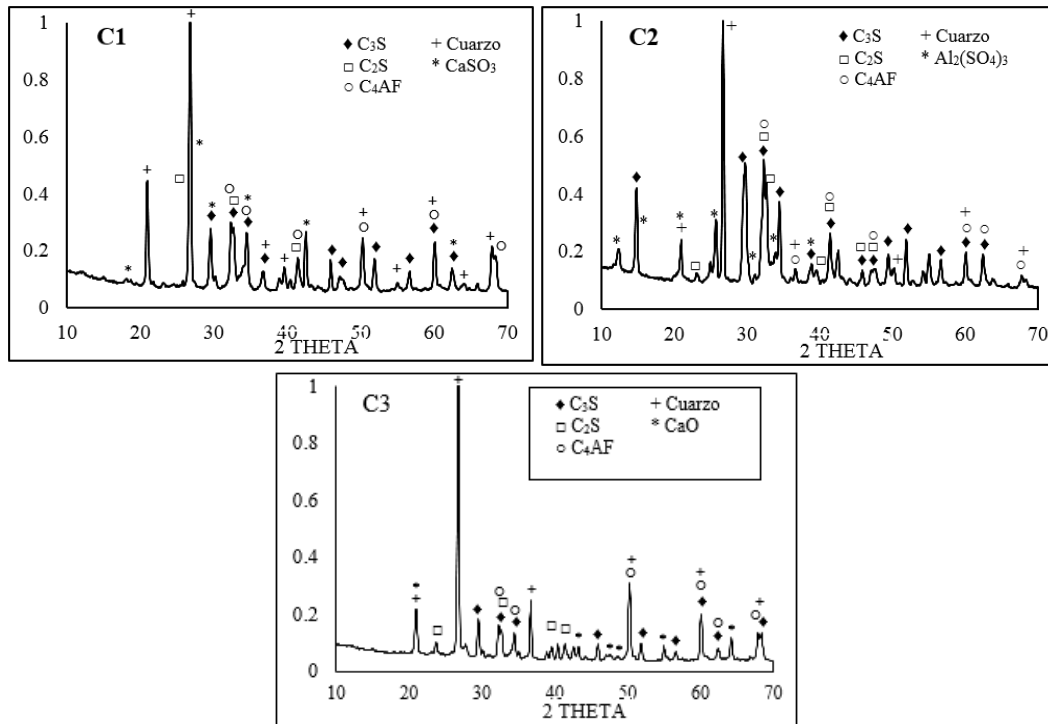
Difracción de Rayos X (DRX)

Al igual que los análisis para ATP, MEB y FRX la difracción de rayos X se hizo al CPO 40, la CV y los tres morteros, para esta prueba se trituraron los morteros comerciales y de esta manera obtener una muestra más homogénea, en la Figura 3. Difractogramas de los materiales. Figura 3 se muestran los resultados.

En los difractogramas se pueden ver las principales fases presentes en un cemento para los morteros comerciales además de que las fases que indican cuarzo son debidas al tipo de agregado utilizado y a la presencia de algunos cementantes suplementarios como en el caso de la CV.

Figura 3. Difractogramas de los materiales.



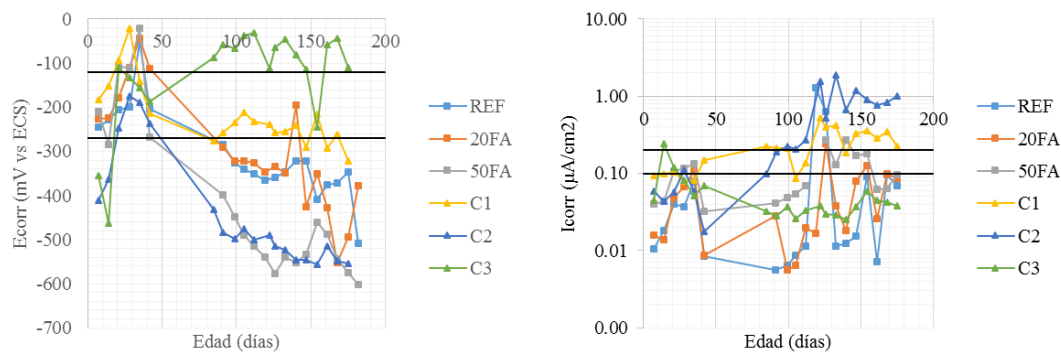


Resistencia a la polarización lineal (RPL)

En la resistencia a la polarización lineal se muestran los datos de mediciones a partir de 7 días de fabricación de los especímenes y a partir de los 35 días se inició el deterioro. En las gráficas se marcan los umbrales o valores límites para potenciales (-120 y -270 mV vs ECS) y para velocidades de corrosión (0.1 y 0.2) con líneas negras. Como se puede observar, en la gráfica de potenciales los morteros con valores más negativos son C2 y FA50 mientras que C3 es el de mejor comportamiento ya que se ha mantenido en la zona de baja probabilidad la mayor parte del tiempo, seguido por C1, mientras que REF y 20CV presentan un comportamiento similar hasta esta edad. En cuanto a las velocidades de corrosión, la mezcla de mejor desempeño muestra un valor por debajo de $0.1 \mu A$, de manera análoga a la gráfica de potenciales REF y 20CV muestran un comportamiento similar; C1 y C2 fueron las primeras en alcanzar el grado de despasivación incluso aún antes que los especímenes de 50FA, una razón para este deterioro tan rápido puede ser que los morteros C1 y C2 pueden tener poros más grandes o conexiones a modo de grietas incluso desde su fabricación ya que su consistencia para el moldeo es mucho rígida, C1 es un mortero que se muestra completamente húmedo pero de difícil colocación y C2 al tener un fraguado rápido dificulta la colocación, lo que puede resultar en una mayor cantidad de poros e interconexión con las adiciones, sustituciones o aditivos incluidos.

A este punto podemos intuir de acuerdo a los resultados de las otras pruebas que el mortero C1 tiene agregados de tipo calizo o a base de carbonato de calcio y dolomita, mientras que C2 tiene posiblemente una combinación de agregados calizo y sílico (cuarzo) y C3 tiene un agregado sílico de mayor tamaño de aquí que estos tengan también un efecto en la difusión de los Cl^- por efecto de la diferencia en la porosidad de cada tipo de agregado³.

Figura 4. Potenciales y velocidades de corrosión.



CONCLUSIONES

En esta parte de la investigación se puede inferir sobre la importancia de la materia prima y sus características físicas y químicas para el buen desempeño de los morteros de reparación, ya que al tener daños en una estructura es claro que el agente dañino va a seguir presente en el ambiente ya que es inherente a su ubicación. Se puede observar que el uso de algunos materiales cementantes suplementarios no siempre es en beneficio de la durabilidad ya que su máximo potencial se puede ver afectado por las dificultades que se presentan durante el colado.

En el caso del mortero C2, su capacidad para fraguar en poco tiempo afecta el desempeño en el periodo de colocación o moldeo.

Los morteros a base de CPO mostraron un desempeño satisfactorio a pesar de su relación a/mc y su carencia de aditivos.

REFERENCIAS

1. Ketil Videm, "Electrochemical studies of steel in cement mortar containing chloride and micro-silica", *Corrosion Science* 49, (2007): pp. 1702-1717.
2. S. E. Benjamin, F. A. Khalid, Rizwan A. Khan, "Performance of Steel in ordinary Portland, fly ash and slag cement mortars during the hydration period", *Journal of Materials Processing Technology* 103, (2000): pp. 383-388.
3. D. W. Hobbs, "Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete", *Cement and Concrete Research* 29, (1999): pp. 1995-1998.
4. Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi, Mariausz Kaczmarek, "Correlation between porosity, permeability, and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content", *Cement and Concrete Research* 36, (2006): pp. 625-633.
5. D. Cusson, N. P. Mailvaganam, "Durability of repair materials", *Concrete International: Design and Construction* 18, 3, (1996): pp. 34-38.
6. E. Janssens, G. Serré, "Compatibiliteit van herstellingsmortels in restauratieprojecten (E: Compatibility of repair mortars in restoration projects)", *msC Thesis*, K. U. Leuven, (2010): p. 186.



CONVOCATORIA 2015

La Facultad de Ingeniería Civil a través de la Subdirección de Estudios de Posgrado



Convocan a egresados de Ingeniería Civil y áreas afines a ingresar a sus programas de posgrado:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN

INGENIERÍA
ESTRUCTURAL



INGENIERÍA DE TRÁNSITO
Y VÍAS TERRESTRES



HIDROLOGÍA
SUBTERRÁNEA



INGENIERÍA
AMBIENTAL



Requisitos de Ingreso

- ✓ Título o pasantía del nivel anterior a ingresar, afín a las áreas de interés.
- ✓ Tener promedio mayor ó igual a 80 sobre 100.
- ✓ Presentar y aprobar el Examen General de Conocimientos (EXANI III) del CENEVAL y el Examen de Competencia en inglés (EXCI).
- ✓ Cumplir con lo establecido en el Reglamento General sobre los procedimientos de admisión y permanencia de los estudiantes y el Reglamento General del Sistema de Posgrado.
- ✓ Entregar oficio en donde se expongan los motivos para solicitar el ingreso al programa.
- ✓ Ser aceptado por la Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación de la FIC.

Documentos requeridos

- ✓ Acta de nacimiento
- ✓ Curriculum vitae
- ✓ Seis fotografías tamaño infantil (color) fondo blanco
- ✓ Título y cédula profesional
- ✓ Copia de kárdex
- ✓ Escrito donde expresen los motivos para ingresar al Programa del Posgrado
- ✓ Certificados originales de secundaria, preparatoria y licenciatura (Egresados ajenos a la UANL)

Registro 2015 en la página oficial de la U.A.N.L.

www.uanl.mx

PERÍODO OFICIAL DE REGISTROS	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXCI	APLICACIÓN DEL EXAMEN EXANI-III
1 al 20 de noviembre de 2014	28 de noviembre de 2014	29 de noviembre de 2014
1 al 18 de diciembre de 2014	9 de enero de 2015	10 de enero de 2015

Para ampliar la información

<http://www.fic.uanl.mx/posgrado/oferta/>

Dr. César A. Juárez Alvarado

Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Av. Universidad s/n
Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza
Nuevo León, México 66450

Tels: (81) 1442 4400 ext. 4447, 4448, 5206
(81) 8329 4000 ext. 7216, 7234

Correo electrónico:

cesar.juarezal@uanl.edu.mx

cesar.juarez@uanl.mx

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Director de la Facultad de Ingeniería Civil

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Subdirector de Estudios de Posgrado



"Educación de clase mundial, un compromiso social"



VI
CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

T6.- ENSAYOS SEMI Y NO DESTRUCTIVOS



ULTRASONIDO APLICADO AL ESTUDIO DE LA PENETRACIÓN Y LIGADO DE CLORUROS EN PASTAS DE CEMENTO

A.E. Ramirez¹, F. Castellanos¹, P.F. de J. Cano-Barrita¹

1. Instituto Politécnico Nacional/CIIDIR Oaxaca, Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, C.P. 71230, México.

RESUMEN

El presente trabajo estudia la presencia de iones cloruro y su posterior ligado en cuatro pastas de cemento conteniendo adiciones minerales. Se utilizó el método de equilibrio para determinar la capacidad de ligado de cloruros de las pastas de cemento y se realizaron mediciones ultrasónicas a diferentes tiempos en especímenes cilíndricos utilizando transductores de ondas de cortante y longitudinales. Las señales ultrasónicas fueron analizadas en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada de Fourier. Los resultados indican que existe una relación entre la energía de los espectros de Fourier y la presencia de las soluciones de NaCl de 0% a 16.5%; en algunos casos inclusive para las concentraciones de 16.5% y 33%. En cuanto a la capacidad de ligado, se observó una relación exponencial entre la frecuencia media ponderada obtenida a 14 días con los transductores a cortante de 500 kHz y la cantidad de cloruros ligados.

Palabras claves: Adiciones minerales, sal de Friedel, transformada de Fourier, ultrasonido, pruebas no destructivas.

ABSTRACT

The present work studies the presence of chloride ions and their subsequent binding in four cement pastes containing mineral admixtures. The equilibrium method was used to determine the chloride binding capacity of the cement pastes and ultrasonic measurements were undertaken at different times in cylindrical specimens using shear and longitudinal wave transducers. The ultrasonic signals were analyzed in the frequency domain by Fourier Transform. The results indicate that there is a relationship between the energy of the Fourier spectra and the presence of NaCl solutions from 0% to 16.5%; in some cases even for concentrations of 16.5% and 33%. With respect to chloride binding capacity, an exponential relationship was observed between the weighted average frequency obtained at 14 days with the 500 kHz shear transducers and the amount of bound chlorides.

Keywords: Mineral admixtures, Friedel's salt, Fourier transform, ultrasound, nondestructive tests.

INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales mecanismos de deterioro de las estructuras de concreto, generada principalmente por los iones cloruros presentes desde el mezclado de los materiales o que ingresan desde el exterior, por ejemplo, en ambientes marinos y en lugares donde se utilizan sales descongelantes¹. De la cantidad total de cloruros que penetran en el concreto, una parte se liga a los productos de hidratación del cemento a partir de mecanismos químicos (formando sal de Friedel) y físicos² (adsorción de iones en las paredes de los poros). Los cloruros que no se ligan física o químicamente se denominan libres y son los responsables del proceso de corrosión³.

Existen técnicas destructivas para la determinación de los cloruros libres y totales, las cuales requieren la extracción de núcleos de concreto de los elementos estructurales. Lo anterior implica costos de muestreo, daño a la estructura analizada y periodos relativamente largos para la obtención de perfiles de concentración de cloruros. La aplicación del ultrasonido en la detección de iones cloruro y su posterior ligado ha sido poco explorada. Aunque algunos trabajos han mostrado que existen cambios en la señal de respuesta ultrasónica en función del tiempo cuando soluciones de cloruro de sodio (NaCl) ingresan en pastas de cemento⁴, estos cambios no han sido asociados de manera clara al ligado de cloruros en la pasta de cemento hidratada. La presente investigación tuvo como objetivo la interpretación de señales ultrasónicas, obtenidas de especímenes de pastas de cemento sometidos a saturación al vacío de soluciones de NaCl con concentraciones de 0%, 16.5% y 33%, para relacionar la concentración de las soluciones y la capacidad ligado de las pastas de cemento con algunas características de las señales, tales como la energía de la señal y la frecuencia media ponderada. Esta interpretación se complementó con la determinación de las isoterms de ligado de cloruros de diferentes sistemas cementicios así como de pruebas de DRX para determinar la presencia de sal de Friedel.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Las pastas fueron elaboradas con cemento portland tipo ordinario resistente a sulfatos (CPO 30RS). Se utilizó además ceniza volante (CV) clase F con dos niveles de sustitución de 20% y 40% con respecto al peso del cemento y el humo de sílice (HS) con 10 % de sustitución. La composición química del cemento y de las adiciones minerales se presenta en la Tabla 1.

Método

Elaboración y curado de los especímenes. Las pastas de cemento se prepararon con agua destilada con una relación a/mc = 0.55 en peso, realizando las sustituciones de cemento portland como se indica en la Tabla 2. Con las pastas se elaboraron especímenes cilíndricos de 6.5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Los especímenes elaborados fueron colocados en un dispositivo para rotarlos a una velocidad de 7 rpm

para eliminar los efectos de sedimentación de las partículas más densas en estado fresco. Los especímenes fueron curados por inmersión en agua durante un mínimo de 120 días para asegurar un alto grado de hidratación y minimizar efectos de rehidratación durante las mediciones ultrasónicas. La temperatura de curado se mantuvo controlada a 23 +/- 2°C.

Tabla 1. Composición química de los materiales empleados en las pastas de cemento

Óxido	CPO % en peso	HS % en peso	CV % en peso
SiO ₂	21.07	94.92	62.28
Al ₂ O ₃	3.69	0.03	20.38
Fe ₂ O ₃	4.5	0.03	4.09
CaO	61.93	0.56	4.68
TiO ₂	0.97	<.02	0.94
P ₂ O ₅	0.1	0.13	0.38
MgO	1.83	0.38	0.98
MnO	0.08	0.05	0.09
Na ₂ O	0.09	0.08	0.31
K ₂ O	0.3	0.86	0.99
FeO	<.01	<.01	0.96
Fe	3.15	<.07	3.61
PPI a 1000 °C	4.38	3.69	3.43

Tabla 2. Niveles de reemplazo de cemento por adiciones minerales para elaborar las pastas de cemento

Pasta	Nomenclatura	Descripción
P1	CPO	100% CPO
P2	10HS	90% CPO y 10% HS
P3	20CV	80% CPO y 20% CV
P4	40CV	60% CPO y 40% CV

Método de equilibrio para determinar cloruros ligados. Se determinaron las isotermas de ligado siguiendo el procedimiento de Tang y Nilsson⁵. Después del periodo de curado, se tomó de cada espécimen una rodaja de 3 a 5 mm de espesor de la región central. Estas rodajas se colocaron en un desecador conteniendo gel de silica y cal sodada durante tres días. Posteriormente se colocaron en otro desecador con cloruro de litio y cal sodada, con el fin de obtener una humedad relativa alrededor del 11 % y eliminar el CO₂ del ambiente, respectivamente. Las rodajas permanecieron en el desecador por un periodo de 30 días y después fueron molidas hasta obtener un tamaño de partícula entre 0.25 y 2.5 mm. Se colocaron 15 g de las muestras molidas en recipientes de plástico de 125 g de capacidad, los cuales estuvieron durante 2 horas en un desecador antes de ser llenados con soluciones de NaCl al 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 y 3.0 M saturadas con Ca(OH)₂ (3 g/L). El volumen de las soluciones que se colocaron en los recipientes fue de 60 ml. Los recipientes fueron cerrados y almacenados a una temperatura de 23 +/- 1 °C hasta que la concentración de la solución de 3 M de NaCl no variara.

Determinación de las isotermas de ligado. Esta

técnica supone que una vez alcanzado el equilibrio entre la solución externa y la solución de poro de la muestra, la reducción en la concentración de la solución externa se debe al ligado de cloruros por los productos de hidratación del cemento⁶; se puede calcular la cantidad de cloruros ligados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C_b = \frac{35.453V(C_i - C_e)}{W_{11}(1 - \xi_{11})} \quad (1)$$

Donde C_b es la cantidad de cloruros ligados en mg Cl/g de muestra, V es el volumen de la solución externa en ml, C_i es la concentración inicial de cloruros de la solución externa en mol/L, C_e es la concentración de cloruros libres en equilibrio con la solución externa en mol/L, 35.453 es la masa molar del ion cloruro, W_{11} es la masa en g de la muestra a una humedad relativa de 11% y ξ_{11} es el contenido de agua evaporable a 11% HR.

Difracción de rayos X. Concluida la titulación de las soluciones empleadas en el método de equilibrio, las muestras molidas de los recipientes correspondientes a la solución de NaCl al 3M de los cuatros sistemas cementicios fueron secadas en horno durante 24 horas a temperatura constante de 105°C. Después las partículas fueron molidas y tamizadas por la malla No. 100 y fueron estudiadas por difracción de rayos X (XRD) para determinar la presencia de la sal de Friedel.

Mediciones ultrasónicas en especímenes de pasta de cemento. Para las mediciones ultrasónicas se utilizó un generador de pulsos emisor-receptor de alta tensión, el cual posee un emisor de alto voltaje con ajustes conmutados o ajustables en forma continua hasta 900 V, receptor de alta ganancia con banda ancha (10 MHz) de bajo ruido y modos pulso-eco y transmisión directa. Se utilizó un osciloscopio digital para la adquisición de señales, el cual cuenta con cuatro canales de entrada y una frecuencia de muestreo máxima de 50 MHz. Los transductores utilizados para las mediciones fueron de contacto, cuyas frecuencias preferenciales se encuentran desde los 50 kHz hasta los 2250 kHz de ondas a cortante y longitudinales.

Inicialmente se saturaron los especímenes al vacío con agua desionizada y se obtuvieron señales ultrasónicas con los transductores seleccionados. Después se colocaron los especímenes en un horno a 105°C durante dos días hasta peso constante, posteriormente se tomaron nuevamente mediciones ultrasónicas. Al día siguiente grupos de tres especímenes fueron saturados al vacío con agua desionizada (0%NaCl) y soluciones de NaCl al 16.5% y 33%. Las condiciones de posición y presión de los transductores se mantuvieron constantes durante la adquisición de señales. Así se obtuvieron registros de la señal de respuesta ultrasónica de los 4 sistemas cementicios considerando cinco condiciones de los especímenes (saturado inicial con agua, seco, saturado con agua, solución de NaCl al 16.5% y 33%), 7 edades de prueba (-4, -1, 0, 1, 3, 7 y 14 días). El procesamiento de las señales consistió en obtener su energía en el dominio de la frecuencia y la frecuencia media ponderada para relacionarlos con propiedades de concentración de cloruros y capacidad de ligado de los sistemas cementicios.

RESULTADOS

Isotermas de ligado

Efecto de las adiciones minerales. Las variaciones de concentración de las soluciones control de NaCl se empezaron a estabilizar entre la primera y segunda semana. En la tercera semana la concentración de los cuatro sistemas ya no cambió significativamente, por lo cual en la cuarta semana se procedió a titular las muestras que contenían las 7 concentraciones de NaCl empleadas.

En la Figura 1(a) se observa que la pasta P4 presenta una mayor capacidad de ligado, seguida por la pasta P2, P3 y P1 respectivamente. Las isotermas de ligado obtenidas muestran una tendencia no lineal y se ajustaron mediante una función potencial, este tipo de isotermas se conoce como tipo Freundlich. El análisis de DRX se muestra en la Figura 2 y se observa la presencia de picos que corresponden a la sal de Friedel en el ángulo $2\theta = 11.3^\circ$. La intensidad de estos picos está relacionada con la cantidad de sal formada y varía en cada sistema cementicio, presentando una mayor amplitud en la pasta P4, seguida por las pastas P3, P1 y P2 respectivamente. De acuerdo con la Figura 1(b), la capacidad de ligado se ve influenciada por la cantidad de alúmina (Al_2O_3) presente en cada sistema cementicio, que liga químicamente a los iones cloruro con algunos productos de hidratación formando sal de Friedel. En el caso de la pasta P2 su capacidad de ligar cloruros puede atribuirse principalmente a la adsorción de iones en las paredes de los poros del silicato hidratado de calcio, ya que de acuerdo con el análisis químico mostrado en la Tabla 2, la cantidad de alúmina presente en este sistema es menor y la formación de sal de Friedel contribuiría muy poco en la cantidad total de cloruros ligados. Los resultados anteriores son similares a los reportados por Zibara⁶ y Thomas *et al*⁷ para los sistemas CPO, 20CV y 40CV. Sin embargo, reportan una menor capacidad de ligado cuando el sistema cementicio presenta humo de sílice aunque la formación de sal de Friedel es consistente con lo presentado en esta investigación.

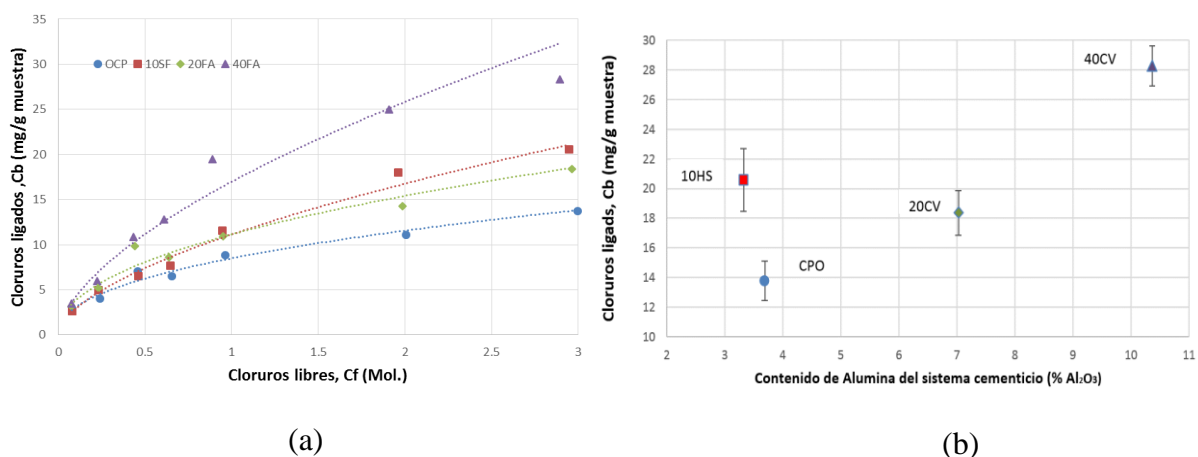


Figura 1. (a) Isotermas de ligado de los sistemas cementicios a una temperatura de 23°C y (b) relación entre el contenido de alúmina de cada sistema y la cantidad de cloruros ligados para la concentración de 3M de NaCl.

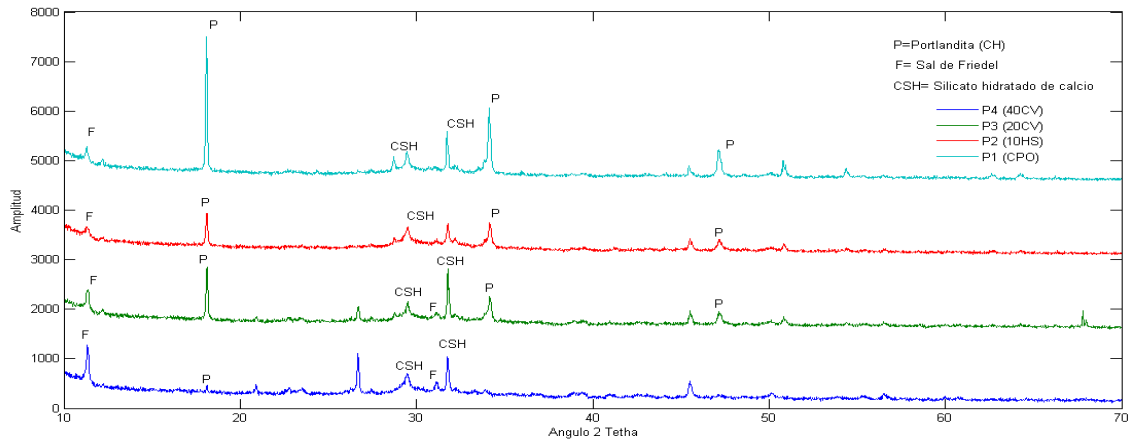


Figura 2 Difractogramas de los sistemas cementicios mostrando los picos correspondientes a la sal de Friedel.

Mediciones ultrasónicas

Procesamiento de señales ultrasónicas por Transformada de Fourier. Para los cálculos subsecuentes, se considera sólo el intervalo de frecuencias correspondiente al espectro de Fourier de la señal, Figura 3(a) y 3(b), definido por la función de transferencia de los transductores, Figura 3(c), y en el cual se amplifica la señal de entrada por arriba de los 6 dB. Con base en lo anterior y de acuerdo con el teorema de Parseval, se estimó la energía del espectro de Fourier en dicho intervalo de frecuencias para cada transductor de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$E = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (2)$$

Donde E es la energía de la señal, y x(n) la amplitud de los coeficientes de la transformada de Fourier. Se calculó también para dicho intervalo, la frecuencia media ponderada de 0 a 14 días para todas las condiciones de saturado. A partir de este procesado de las señales se identifican las concentraciones de las soluciones de cloruro de sodio empleadas y la capacidad de ligado de los sistemas cementicios.

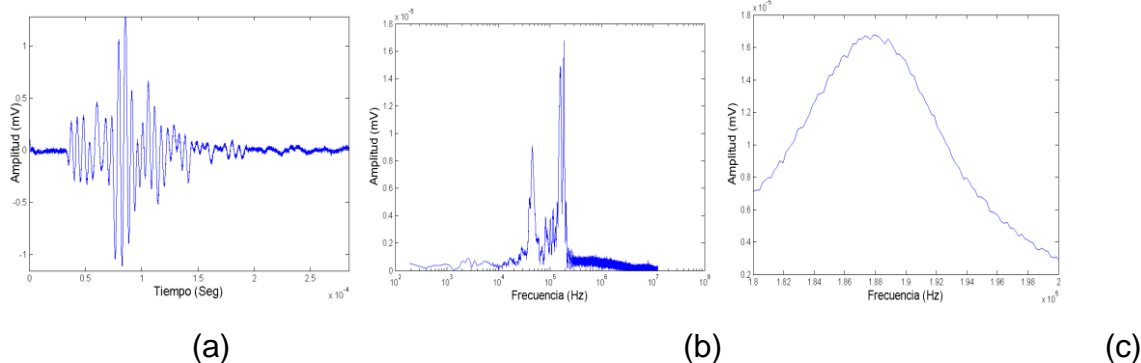


Figura 3. Ejemplo de Señal de respuesta ultrasónica (a), espectro de Fourier completo (b) y espectro de Fourier de la ventana de mayor amplificación del transductor (c), para la condición de saturado con cloruro 16.5%, frecuencia 180 kHz a cortante

Identificación de soluciones de cloruro de sodio.

Existe una tendencia a disminuir la energía de la señal cuando existe la presencia de las soluciones de NaCl 16.5% y 33% en los sistemas cementicos con respecto a los especímenes saturados con 0% de NaCl (agua). Este comportamiento es más evidente 14 días después de la saturación y con los transductores de 180 kHz con ondas de cortante, Figura 4(a), y en las frecuencias de 250 kHz y 500 kHz con ondas longitudinales, Figuras 4(b) y 4(c). Es importante considerar que las soluciones de NaCl utilizadas para saturar los especímenes cambian su densidad y viscosidad con respecto al agua pura, lo cual nos permite observar cambios en las señales debido a estas variaciones en las propiedades físicas de las soluciones. Por ejemplo, para la concentración máxima de NaCl (33% ó 2.8M) se observa un incremento en la densidad de aproximadamente 11% y de viscosidad de aproximadamente el 38% con respecto al agua⁸. Sin embargo solo para P1 en la frecuencia de 500 kHz de ondas longitudinales se puede distinguir claramente de la concentración de NaCl de 16.5% de la de 33%.

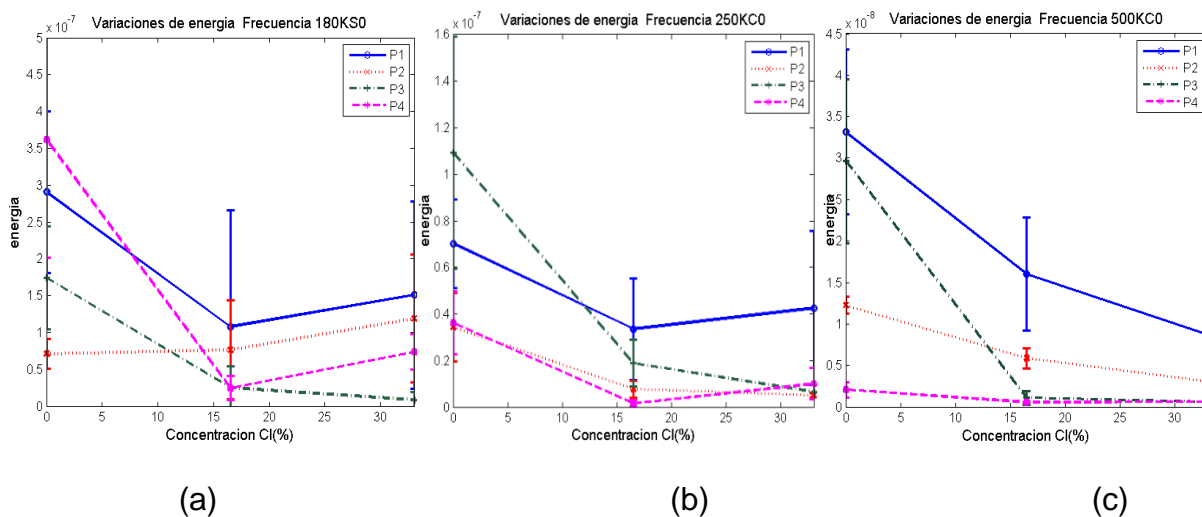


Figura 4. Relación entre la energía correspondiente a la ventana de mayor amplificación de los transductores y la concentración de NaCl en los especímenes, (a) Frecuencia 180 kHz a cortante, (b) 250 kHz longitudinales y (c) 500 kHz a cortante.

Identificación de la capacidad de ligado. La relación entre la capacidad de ligado y la frecuencia media de las señales podría estar asociada con el transductor de 500 kHz a cortante en la solución de cloruro al 16.5% y 33%, Figuras 5(a) y 5(b), donde P4 con una mayor capacidad de ligado presenta la frecuencia media más alta, seguida de P3 que de acuerdo al análisis de DRX presenta una mayor formación de sal de Friedel en comparación con P2 y P1, que presentan los picos menos intensos en el difractograma (Figura 2). Las figuras 5(a) y 5(b) muestran que existe una relación exponencial entre la frecuencia promedio obtenida a los 14 días después de saturar los especímenes con soluciones de NaCl. Esta relación puede explicarse a partir del hecho de que el ligado químico de los cloruros que produce sal de Friedel ocasiona cambios físicos en la estructura de la parte sólida de la pasta de cemento, lo que produce cambios en la respuesta obtenida en el dominio de la frecuencia⁹.

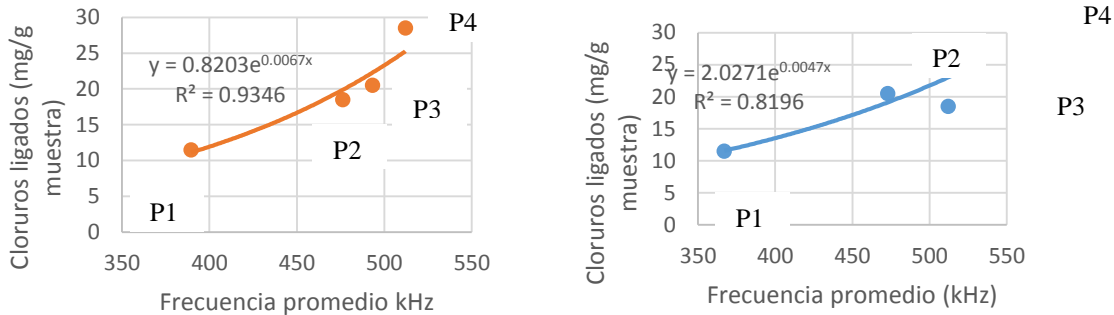


Figura 5 Relación en (a) frecuencia promedio y cloruros ligados, tra (b) or 500Hz a cortante, utilizando los especímenes saturados con NaCl al 16.5% (a) y 33.0% (b)

CONCLUSIONES

- El sistema cementicio 40CV (P4) presenta la mayor capacidad de ligado, seguido por 10HS (P2), 20CV (P3) y CPO (P1), respectivamente. Además la capacidad de ligado de las pastas P1, P3 y P4 está relacionada con la formación de sal de Friedel, mientras que la de la pasta P2 está más relacionada con la adsorción de iones cloruro.
- Existe una relación entre la energía de los espectros de Fourier y la presencia de las soluciones de NaCl de 0% a 16.5% y en algunos casos de 16.5% a 33%. Esta tendencia es más clara a los 14 días después del saturado con soluciones de NaCl con los transductores de 500 KHz que generan ondas longitudinales.
- Se sugieren algunos indicios de la ocurrencia del ligado de cloruros relacionando la cantidad de cloruros ligados de las isothermas correspondientes a la concentración de 3.0 M con las variaciones de las frecuencias medias presentadas por las pastas analizadas bajo las distintas condiciones de estudio con el transductor de 500 kHz a cortante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado al proyecto “Análisis en el dominio tiempo-frecuencia de la penetración de agentes agresivos en elementos de concreto hidráulico” y al Instituto Politécnico Nacional, por el financiamiento de los proyectos con clave SIP 20131009 y 20140613. A.E. Ramírez agradece al CONACyT por la beca otorgada para realizar estudios de doctorado.

REFERENCIAS

1. A. Neville , “Chloride attack of reinforced concrete: an overview”, *Materials and Structures*, 28,1 (1995): pp.63-70.
2. H. Hirao, K. Yamada, H. Takahashi, and H. Zibara, “Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 3, 1 (2005): pp. 77-84.

3. M.V.A. Marinescu y H.J.H. Brouwers, "Free and bound chloride contents in Cementitious Materials", 8th fib PhD Symposium in Kgs. (2010), pp. 1-6-, Lyngby: (Denmark).
4. E. Cortés-Ortiz; Caracterización de procesos físicos en materiales basados en cemento mediante interferometría ultrasónica, Tesis de Maestría, IPN CIIDIR Unidad Oaxaca, (2011): p. 54
5. L. Tang y L.O. Nilsson, "Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of CPO Pastes and Mortars", Cement and Concrete Research, 23, 2 (1993): pp. 247-253.
6. H. Zibara, "Binding of external chloride by cement pastes", PhD thesis, Department of Building Materials, University of Toronto, Canada,(2001): p. 102
7. M.D.A. Thomas, R.D. Hooton, A. Scott, H. Zibara, "The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste", Cement and Concrete Research, 42, 1 (2012): pp. 1-7.
8. J. Lin, C. W. Brown, "Simultaneous determination of physical and chemical properties of sodium chloride solutions by near infrared spectroscopy", Journal of Near Infrared Spectroscopy,1 (1993): pp. 109-120.
9. A. E. Ramirez-Ortiz; "Ultrasonido aplicado al estudio de la penetración y ligado de cloruros en pastas de cemento", Tesis de Maestría, IPN CIIDIR Unidad Oaxaca, (2013): p.81

PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DE MORTEROS ADICIONADOS CON CENIZA

H. L., Chávez-García ^{1,2}, E. M. Alonso-Guzmán ^{1,2,3}, W. Martínez-Molina ^{1,2}, C. Bernabe-Reyes ¹, M. A. Navarrete-Seras ¹, C. Lara-Gómez ^{1,2}, N. Díaz-González ¹, M. A. Mondragón-Ornelas ¹

1. Departamento de Materiales, Edif. F, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040
2. Cuerpo Académico Consolidado CA-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040.
3. Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, PIDA, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, CP 58040

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la evaluación físico mecánica de morteros de cemento Portland, CPC, con adiciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) y de un aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (® SikaViscoCrete PC 2500), se analiza su efecto principalmente en las propiedades de resistencia mecánica, a través de pruebas destructivas y no destructivas, tomando en consideración la protección del medio ambiente.

Se elaboraron especímenes con tres porcentajes diferentes para someterlos a pruebas no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico, resistividad) y destructivas (resistencia a la compresión y tensión). Con los resultados de pruebas destructivas y no destructivas se obtuvieron correlaciones empleando regresión lineal múltiple.

Palabras clave: Mortero, regresión lineal múltiple, ceniza de bagazo de caña, pruebas no destructivas, adiciones.

This work focuses on the physical and mechanical evaluation of mortars of Portland Cement CPC, with additions of ash sugarcane bagasse (CBC) and a water-reducing admixture of high ranking and super-plasticizer (PC SikaViscoCrete ® 2500), its effect is discussed mainly in the mechanical strength properties, through destructive and nondestructive testing, taking into consideration the environmental protection.

Three different percentages specimens were prepared to be subjected to destructive (compressive and stress) and nondestructive testing (ultrasound pulse velocity, resistivity). With the results of destructive and nondestructive testing correlations were obtained using multiple linear regression.

Keywords: Mortar, multiple linear regression, sugarcane bagasse ash, nondestructive testing, additions.

INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada y, posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas. Este fue el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece bajo el agua; por lo tanto, para construcciones sumergidas en agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada, finamente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaban con la cal para producir lo que se le conoce como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Puzzuoli, cerca de Vesubio, donde se encontró por primera vez ceniza volcánica^[1]

La industria cementera siempre ha estado en medio del cambio climático. El cemento es un componente fundamental en la economía de muchos países en pleno crecimiento, elemento necesario para la construcción de edificios y carreteras. El ochenta por ciento del cemento que se produce en la actualidad es utilizado en los países en desarrollo. Pero fabricar cemento supone emitir una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera, las cementeras producen el cinco por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, causa principal del calentamiento global^[2].

Sin embargo, por ejemplo, diversas empresas en su apuesta por la sostenibilidad, han desarrollado una nueva generación de cementos que no dañan el medio ambiente, que permiten reducir casi por completo las emisiones directas de CO₂ a la atmósfera. Para conseguirlo, se ha sustituido la piedra caliza como materia prima por residuos sólidos de centrales térmicas^[3].

Con esta nueva técnica de producción se ha alcanzado un triple objetivo: realizar una gestión eficaz de los residuos a través de su reciclaje, contribuir a la preservación de los recursos naturales del planeta y evitar la emisión directa de gases de efecto invernadero a la atmósfera, a través de la reducción de la calcinación de la materia prima. Al mismo tiempo, la tecnología desarrollada permite reducir en aproximadamente la mitad la demanda energética en el proceso de síntesis del cemento.

De este modo, la nueva generación de cementos ecológicos supone una revolución en el modelo de producción actual, que contribuirá notablemente a reducir los efectos nocivos para el medio ambiente derivados de la actividad de la industria del cemento^[3,4,5].

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se elaboraron especímenes cúbicos, cilíndricos, prismáticos y briquetas, para siete mezclas con las siguientes características: mezcla 1 con 0.5% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 0% de ACB, mezcla 2 con 1% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 0% de ACB, mezcla 3 con 1.5% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 0% de ACB, mezcla 4 con 0% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 3% de ACB, mezcla 5 con 0% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 5% de ACB, mezcla 6 con 0% de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 y 7 % de ACB y la mezcla 7 sin aditivos ya que es la mezcla

testigo. Las edades de prueba fueron 7, 14, 28, 45, 90 y 150 días. Una vez elaboradas las mezclas se colaron los especímenes y se procedió a realizar las pruebas correspondientes en las edades programadas.

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas del mortero fue necesario realizar una serie de pruebas destructivas y no destructivas. Las pruebas se realizan iniciando con las no destructivas ya que estas no alteran las propiedades físicas, químicas o mecánicas del espécimen a diferencia de las destructivas.

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes adiciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce con dimensiones de 5cm. Primeramente se aplicó un desmoldante, con la finalidad de que al transcurrir 24 hrs se descimbraran sin mayor problema de que los especímenes se desmoronaran, como desmoldante se empleó aceite para transmisión mezclado con diesel.

Se elaboraron prismas de una dimensión de 4 x 4 x 16cm, con la adición correspondiente, para ello se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente.

Los cilindros de mortero elaborados son de dimensiones de 10cm de altura, por 5cm de diámetro, se elaboraron los especímenes requeridos para las edades y pruebas especificadas con sus respectivas adiciones. Se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas para su fabricación.

Para la elaboración de las briquetas (especímenes en forma de cacahuete) con las mezclas y adiciones correspondientes, se empleó un molde de bronce. El proceso de elaboración es básicamente el mismo que en el resto de los especímenes con la diferencia de que estas no se dejan fraguar en el molde si no que solo se elaboran en este y en el mismo instante se desmoldan posteriormente se dejaron fraguar sobre una base de cristal. El llenado del molde para la elaboración de las briquetas se realiza en dos capas y se apisona cada una de ellas con el dedo índice y finalmente se enraza con la espátula metálica.

Una vez que los especímenes cumplieron las edades de 7, 14, 28, 45, 90 y 150 días se procedió a realizarles las pruebas programadas (a cada edad establecida), tanto las no destructivas como las destructivas. Los ensayos no destructivos realizados fueron velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica. Los ensayos mecánicos fueron resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y resistencia a la flexión. Para cada edad de prueba se ensayaron 3 especímenes de cada uno, solo en el caso de los cilindros se probaron a una sola edad de 120 ± 10 días. Antes de probar los especímenes fueron retirados del curado, se marcaron y se tomaron sus dimensiones y peso.

Para realizar la prueba de velocidad de pulso se empleó un equipo llamado máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, figura 1; con una escala de frecuencia de 24 a

150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.



Figura 1. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico.

Las mediciones correspondientes a resistividad eléctrica se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (figura 2) esta prueba solo se realizó en cubos y prismas.



Figura 2 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.

El procedimiento seguido para el ensaye de los especímenes fue el descrito en los siguientes pasos:

- Se determinaron las dimensiones de la muestra.
 - Cubos: lado 1, lado2 y espesor.
 - Prismas: base (lado1), espesor (lado2) y longitud.
- Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
- Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
- Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas figura.
- Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente).

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por la ecuación 5.1.

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (5.1)$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en K Ω -cm (ohm-m)

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en K Ω

A = Área transversal del espécimen en cm²

L = Longitud del espécimen en cm

Una vez realizadas las pruebas no destructivas se procedió con las destructivas, estas se realizaron utilizando una máquina universal de pruebas de manera tradicional.

Posterior a esto y con los resultados de las pruebas destructivas y no destructivas se determinaron las correlaciones que nos darían los modelos de predicción de la resistencia a la compresión.

RESULTADOS

La figura 3 muestra los resultados obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en los especímenes cúbicos. Para el aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes presentó los resultados de mayor rango a todas las edades de prueba, en el caso de CBC resultaron con valores inferiores a los testigos

En la figura 4, se muestran los valores obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica en especímenes cúbicos. Los valores obtenidos de mayor rango fueron los del aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 con el porcentaje del 1.5%, con el 0.5% los valores obtenidos

fueron inferiores a los de los testigos a la edad de 7, 14 y 28 y superiores en las edades consecuentes, en el caso del 1% los valores fueron más variables. Los valores de CBC resultaron inferiores en todas las edades en comparación con los testigos, sin embargo, los resultados no son valores que presentan posibles daños de corrosión.

La resistividad eléctrica en prismas se presenta en la figura 5. En este caso los especímenes que presentaron resultados de mayor rango fueron los del aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 en cada uno de sus porcentajes y a todas las edades de prueba. En el caso de CBC los resultados solo fueron superiores a los de los testigos a partir de la edad de 45 días pero solo en el 7%, en el 3 y 5% los valores fueron superiores a los de los testigos en la edad de 150 días respectivamente.

Velocidad de Pulso en Cubos (m/s)

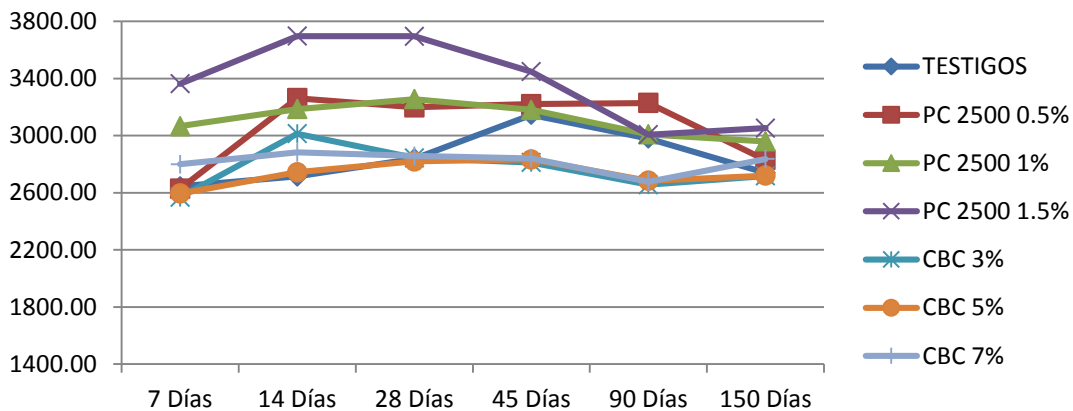


Figura 3. Representación gráfica de la Velocidad de Pulso en cubos.

Resistividad en Cubos (Ohm-m)

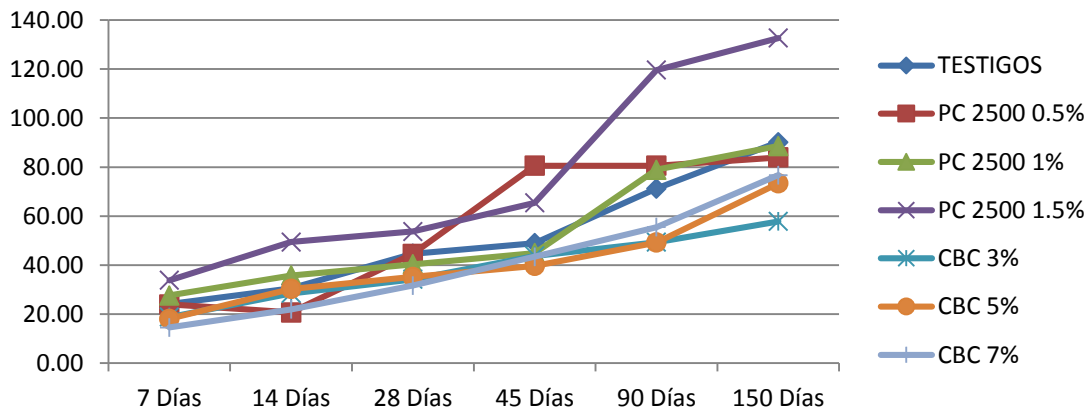


Figura 4. Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Cubos

La figura 6, muestra los resultados de resistencia a compresión en cubos, los especímenes que presentaron mayor resistencia a la compresión fueron los de Sika

ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes, seguidos de los de CBC y los de menor resistencia los especímenes testigos.

Resistividad en Prismas (Ohm-m)

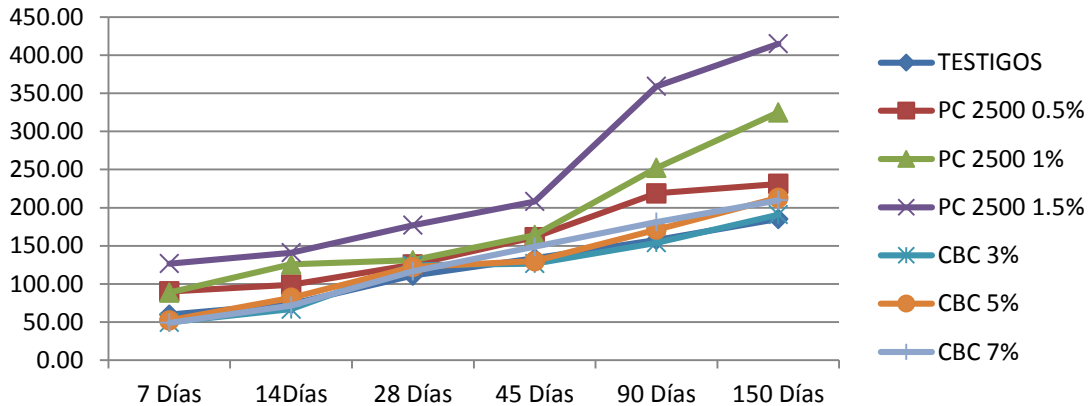


Figura 5. Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Prismas.

Compresión en Cubos (Mpa)

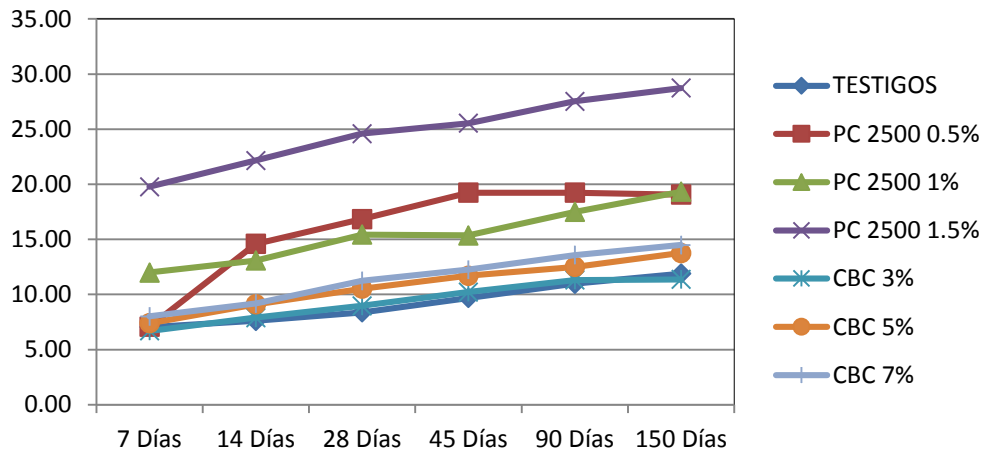


Figura 6. Representación gráfica de la Prueba de Compresión en Cubos.

Se realizó correlación empleando regresión lineal múltiple, entre las pruebas no destructivas y la prueba de resistencia a compresión para obtener un modelo que nos permitiera predecir esta resistencia. El mejor modelo obtenido en función de su factor de correlación se muestra en la ecuación 1.

$$f'c = -119.9931 + 0.00086 * \text{edad} + 58.2779 * \% \text{aditivo} + 4.7378 * \% \text{de CBC} + 1.1228 * re + 0.0571 * vpu \dots 1$$

Donde:

$f'c$ = resistencia a la compresión en Mpa

edad = edad del mortero en días
aditivo = % de aditivo Sika ViscoCrete PC 2500
CBC = % de ceniza de bagazo de caña
re = resistividad eléctrica en Ohm-m
vpu = velocidad de pulso ultrasónico en m/s

El factor de correlación obtenido en este modelo fue de 0.9618

CONCLUSIONES

Los materiales empleados como adición tienen efectos apreciables en el comportamiento físico-mecánico de los morteros, principalmente el mecánico, ya que mejoran las resistencias a compresión, flexión y tensión, destacando la compresión. El hecho de aumentar la resistencia mediante adiciones conlleva la disminución del consumo de cemento Portland y por lo tanto se disminuirá la producción de este. Se observa que los especímenes que presentaron los resultados más favorables fueron los de Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes de adición pero siendo el óptimo el del 1.5%.

Es posible obtener modelos de predicción de alguna propiedad mecánica, en este caso fue la resistencia a la compresión, sin embargo, esto se puede realizar también para las demás propiedades mecánicas.

Las pruebas no destructivas tienen un campo de aplicación considerablemente amplio, tanto en ingeniería como en otras áreas del conocimiento, por tanto se recomienda continuar con investigaciones que documenten y sustenten a las técnicas no destructivas. Se sugiere que estos ensayos pueden servir para que, dentro de los nuevos criterios de durabilidad que se imponen en la ingeniería moderna, se califique los materiales que se emplean en el concreto con una mayor precisión. También se pueden emplear para predecir la vida útil que tendrá con el correr del tiempo el material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Neville, Adam M., *Tecnología del Concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1995.
- [2] Solomona Susan, Plattnerb Gian-Kasper, Knuttic Reto, and Friedlingsteind Pierre, "Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 106, no. 6, pp. 1704–1709, December 2008.
- [3] Raoa Akash, N., Jha Kumar, and Misra Sudhir, "Use of aggregates from recycled construction," *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 71–81, 2007.
- [4] Worrell Ernst, Price Lynn, Martin Nathan, Hendriks Chris, and Ozawa, Meida Leticia, "CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 26, pp. 303 -329, 2001.
- [5] Eguchi Kiyoshi et al., "Application of recycled coarse aggregate by mixture to,"

Construction and Building Materials, pp. 1542–1551, 2007.

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN MATERIALES PÉTREOS

M. A. Navarrete Seras¹, W. Martínez Molina^{1, 2}, E. M. Alonso Guzmán^{1, 2, 3}, J. C. Arteaga Arcos⁴, H. L. Chávez García^{1, 2}, C. Lara Gómez^{1, 2}, M. A. Mondragón Ornelas¹, N. Díaz González¹

1 Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040.

2 Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070,

3 Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070,

4 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 50100.

RESUMEN

En la actualidad la mayoría de las obras de infraestructura llevan inmersos dentro de sus elementos estructurales materiales pétreos, tal es el caso del concreto hidráulico y mezclas asfálticas. Existen pruebas Destructivas y No Destructivas que nos permiten conocer su comportamiento físico y mecánico, la diferencia es que las primeras ocupan especímenes que tienen que destruirse, en las segundas se pueden realizar la prueba sin necesidad de destruir el espécimen lo cual resulta ser más práctico, económico, y esa misma muestra puede ser utilizada para determinar diferentes propiedades intrínsecas. Resulta ser importante determinar las pruebas no destructivas tales como la resistividad, velocidad de pulso ultrasónico y la frecuencia de resonancia, que son parámetros que ayudan a caracterizar y clasificar los materiales pétreos y poder inferir su comportamiento, llevando al proyectista a seleccionar el banco de materiales pétreos con mejores características y economizar en cuanto al consumo de cemento o asfalto.

Palabras claves: Pétreos, Pruebas No Destructivas, propiedades intrínsecas, propiedades mecánicas, caracterización

ABSTRACT

At present most of the leading infrastructure elements embedded within their structural stone materials, as in the case of hydraulic concrete and asphalt mixtures. There Destructive and Nondestructive tests that allow us to know the physical and mechanical behavior, the difference is that the former occupy specimens have to be destroyed in the second test can be performed without destroying the specimen which is more practical, economical, and the same sample can be used to determine different intrinsic properties. Turns out to be important to determine the non-destructive testing such as resistivity, ultrasonic pulse velocity and resonant frequency, which are parameters that help characterize and classify the rock materials and to infer their behavior, leading the designer to select the bank of materials stone with better features and saving in the consumption of cement or asphalt. .

Keywords: Stone, Nondestructive Testing, intrinsic properties, mechanical properties, characterization

INTRODUCCIÓN

Los materiales pétreos han sido parte importante para la elaboración de concreto hidráulico y mezclas asfálticas, por lo tanto conocer sus características físico-mecánicas resulta importante para tomar la mejor decisión y seleccionar el banco de materiales pétreos que tenga las propiedades ingenieriles buscados por el proyectista.

En la actualidad la utilización de pruebas no destructivas ha venido a revolucionar la forma de analizar los materiales pétreos, ya que resulta más económico y práctico realizar este tipo de pruebas las cuales nos proporcionan información valiosa del material sin necesidad de destruirlo.

Las pruebas no destructivas ofrecen significativas ventajas en cuanto a tiempo y costo en comparación con las pruebas que requieren la extracción de una muestra para su análisis posterior. La disponibilidad inmediata de los resultados puede ser también una ventaja importante de este tipo de pruebas ¹.

Los materiales que se utilizan para realizar las pruebas no destructivas es mucho menor comparado con los métodos comunes que necesitan una gran cantidad de material de prueba ².

Las propiedades de los materiales pétreos resulta ser tan importante para predecir su comportamiento ingenieril ya que son utilizados en la construcción y tiene una significativa influencia en el diseño y en el costo, por esta razón conocer sus propiedades de forma indirecta lleva a utilizar pruebas como Velocidad de Pulso Ultrasónico, Resistividad, Frecuencia de Resonancia, que están directamente relacionadas con las propiedades intrínsecas de los materiales pétreos.

Las pruebas antes mencionadas se realizaron a los bancos de material volcánico: El Tigre, Cerritos, Joyitas y Cuenembo (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de los bancos de materiales pétreos (Google Earth, 2012)

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se llevaron al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, muestras representativas de los diferentes bancos de materiales pétreos de origen volcánico para realizar las pruebas pertinentes.

Propiedades físicas

Son las propiedades intrínsecas del material y se realizaron las siguientes pruebas: Encabezados.

Porcentaje de Humedad Actual (ASTM C127-04). El procedimiento consiste en numerar las muestras y pesar cada una de ellas, secándose en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, posteriormente las muestras se retiran del horno y se dejan enfriar hasta la temperatura ambiente y se determina el peso seco³.

Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación (1).

$$\% \text{ Humedad Actual} = \frac{P_i - P_f}{P_f} 100 \quad (1)$$

Donde: P_i = Peso inicial de la muestra (g), P_f = Peso final de la muestra (g).

Porcentaje de Humedad Absorción (ASTM C127-04). El procedimiento consiste en: secar las muestras en el horno a una temperatura a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, posteriormente se dejan enfriar para posteriormente pesarlas (p_s = peso seco), una vez hecho estas muestras se saturan en un recipiente con agua durante 24 horas como mínimo, las muestras se retiran del agua y se secan superficialmente con un lienzo o franela y se pesan (p_h = peso húmedo)³.

Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación (2):

$$\% \text{ De humedad de absorción} = \frac{P_h - P_s}{P_s} 100 \quad (2)$$

Donde: P_h = peso húmedo de la muestra (g), P_s = peso seco de la muestra (g).

Densidad aparente o gravedad específica (ASTM C127-04). El objetivo es obtener la densidad de las muestras de cada roca. El procedimiento consiste en: Secar las muestras en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, dejar enfriar y pesar (P_s = peso seco), poner a saturar en agua durante 24 horas y después se pesan, para obtener el peso superficial seco (P_s), colocar en la canastilla adaptada en la báscula y se sumergen en agua, obteniéndose el peso sumergido o en el agua (P_a)³.

Los cálculos se realizan mediante la siguiente ecuación (3):

$$G.E = \frac{P_s}{P_{ss} - P_a} \quad (3)$$

Densidad por medio del picnómetro. El objetivo es determinar la densidad de la roca, el procedimiento consiste en marcar la muestra o numerarla para identificarla, se dejan saturar en el agua durante un periodo de 24 horas, después se procede a secar superficialmente y registrar su peso húmedo (W en gramos), se procede a llenar con agua el picnómetro (aparato que sirve para medir el volumen de agua desalojado por el material sólido equivalente al volumen del mismo, tal como grava y arena) colocando dentro de este la muestra de roca y el volumen de agua desalojado (V en cm^3) es medido con una probeta, los cálculos se realizan mediante la siguiente ecuación (4)⁴:

$$D = \frac{W}{V} \quad (4)$$

Donde: D= Densidad de la muestra (g/cm³), W= Peso de la muestra (g), V = Volumen de agua desalojado por la muestra de roca (cm³).

Pruebas no destructivas

Resistividad eléctrica. La prueba se realiza para roca tal como se describe para conocer la resistividad en el concreto, las rocas se dejan saturando en el agua y posteriormente se sacan cubriendo con una franela húmeda antes de iniciar la prueba tanto en los corazones como en los cubos. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica marca Nilsson (figura 2). El objetivo de este ensayo es la determinación de la Resistividad Eléctrica de la roca en el laboratorio.

Materiales y equipos:

- Equipo para la toma de núcleos cilíndricos
- Medidor de resistividad eléctrica, método de Wenner cuatro electrodos tipo pines.
- Equipo para medir dimensiones con precisión de décimas.
- Esponjas húmedas.
- Dos placas de cobre.

Procedimiento:

- 1.- Tomar las dimensiones de la muestra (área, diámetro y longitud).
- 2.- Montaje de la muestra.
- 3.- Se colocan las caras laterales del cilindro entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas.
- 4.- Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el cilindro a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
- 5.- La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente) ⁵.

Los cálculos se realizan mediante la ecuación 5:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (5)$$

Dónde: Resistividad eléctrica (KΩ-cm o ohm-m), Resistencia eléctrica que el equipo proporciona (KΩ), Área transversal del espécimen (cm²), Longitud del espécimen (cm)



Figura 2. Equipo de resistividad (Fuente M. A. Navarrete Seras).

Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM D2845-00). Al aplicar un esfuerzo mecánico de forma súbita un sólido se produce en este una deformación que se va transmitiendo por su seno, dependiendo de la naturaleza del esfuerzo aplicado y las características intrínsecas del sólido. Este fenómeno físico se representa gráficamente mediante las vibraciones que, durante el tránsito de la deformación, sufren las partículas del sólido. Según los principios de la física teórica, cuando tal esfuerzo se aplica a un cuerpo continuo, homogéneo, isótropo y sin límites, tiene lugar el tránsito de una deformación perfectamente elástica y la vibración de sus partículas responde a movimientos oscilatorios periódicos. Desgraciadamente los materiales rocoso carecen de todas las circunstancias teóricas anteriores; por las especiales circunstancias de su historial geológico, las piedras como materiales están repletas de discontinuidades, son marcadamente heterogéneas, presentan anisotropías variables en función de la escala de observación y, desde luego, muestran límites geométricos ⁶.

En consecuencia, a medida que la deformación progrese por la roca irá modificándose en función de sus características petrofísicas: carácter elástico/inelástico, reflejado en su estado de alteración y presencia de discontinuidades (poros y fisuras), grado de anisotropía, etc. Recíprocamente, del análisis de tal deformación podrán deducirse algunas características petrofísicas de la roca ⁶.

Por consiguiente, está plenamente justificada la aplicación de este principio físico a materiales de edificación y no debe resultar extraño que la medición de parámetros relacionados con la propagación de ondas elásticas, a través de éstos, constituya uno de los métodos más habituales para su caracterización física ⁷.

Las técnicas basadas en este fenómeno se engloban normalmente bajo la denominación de procedimientos ultrasónicos, y su interpretación se realiza a partir del análisis de las variaciones que experimentan dichas ondas durante su tránsito por el material ⁷.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel (Figura 3) ^{8,9}.

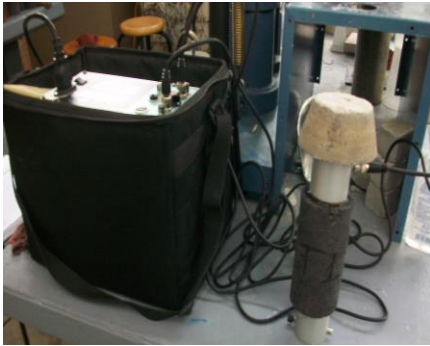


Figura 3. Equipo de ultrasonido Fuente (M. A. Navarrete Seras).

Procedimiento:

- 1.- Se aplicó el gel antibacterial en las caras planas del cilindro o en los transductores del equipo.
- 2.- En el menú del equipo se buscó el número de prueba en el que se guardaron los rebotes y se abrió el archivo para proceder a tomar las lecturas de velocidad de pulso.
- 3.- Se tomaron las lecturas de velocidad de pulso.

Los cálculos se realizan mediante la ecuación (6):

$$V = \frac{d}{t} \quad (6)$$

Dónde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico (km/s), d = Distancia entre transductores (mm), t =Tiempo de tránsito (μ s).

Frecuencias de resonancia (ASTM C215 -02). Las frecuencias de resonancia fueron determinadas después de la velocidad de pulso, con un equipo E-meter C-4959 Mark II de James instrument del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H. Cuenta con un oscilador que tiene 4 rangos de frecuencia cubriendo de 10Hz a 100kHz, dos controles de velocidad 10:1 y 50:1, y un display de medidor de frecuencia de 6 dígitos; un indicador de resonancia graduado de 0 a 100 con indicación en 70.7 para mediciones de ancho de banda, un amplificador de entrada con una sensibilidad de 1 mV, impedancia de entrada de 10M ohm, un acelerómetro tipo pick-up de 35Hz, cuenta con modo semiautomático de manejo con paradas automáticas en los picos de amplitud; un control de acelerómetro; opera en un rango de temperatura de 0 a 40°C; dimensiones de 14.6in x 7.5in x10in, y es alimentado por 120/240V, 50-60Hz (figura 4).

Procedimiento:

- 1.- Se llevó el control de voltaje de salida y ganancia de amplificador totalmente a la izquierda. Se colocó en 1seg, el output-input se llevó a output, se seleccionó el modo manual en el botón de manual-auto. Se prendió el instrumento y se dejó prendido 10min para alcanzar una estabilidad térmica.

2.- La frecuencia de resonancia fundamental longitudinal está en un punto nodal al centro del largo de un prisma o cilindro, por tanto el espécimen debe colocarse en el centro de apoyo de la tabla de pruebas en el punto nodal. La muestra puede ser simplemente apoyada o sujeta por la barra de sujeción del equipo.

3.- Se debe poner vaselina o un medio grasoso en los extremos de las barras de contacto del vibrador y acelerómetro. En esta investigación se usó grasa de calidad mecánica automotriz.

4.- Para que los extremos de los especímenes estén libres a la vibración en la dirección longitudinal es esencial que se cuente con un mínimo de restricción en dichos extremos. Ambas barras, la del vibrador y la del acelerómetro son libres a moverse en el montaje y es necesario solamente el movimiento de los apoyos del vibrador y del acelerómetro a lo largo de los rieles hasta que las barras hagan contacto con el centro de los extremos del espécimen. Los apoyos deben asegurarse usando el tornillo de sujeción.

5.- Se seleccionó el rango de frecuencia de interés, para especímenes de concreto éste estará generalmente en un rango de 1khz a 10khz dependiendo de las dimensiones del espécimen.

6.- Posteriormente se ajustó el control del voltaje de salida para una lectura de 4 volt y se aumentó ligeramente la ganancia del amplificador partiendo de cero.

7.- Comenzando del final de bajas frecuencias del rango se giró el control de frecuencia y al mismo tiempo se observó el medidor de ganancia. En la frecuencia fundamental de resonancia, la vibración de los extremos del espécimen será presentada por un máximo indicado por un pico del medidor de ganancia.

Teniendo establecida la región de la resonancia fundamental, el botón del control fino puede ser ajustado hasta que el medidor de ganancia de entrada indique un pico absoluto, la frecuencia de resonancia es entonces indicada en el contador digital de frecuencia.

Los cálculos se realizan mediante la ecuación (7) ^{10,11}:

$$E = 4n^2 l^2 \rho 10^{-12} \quad (7)$$

Dónde: E = Módulo de Elasticidad Dinámico (MN), n = Frecuencia de resonancia fundamental (Hz), l = Longitud del espécimen (mm), ρ = Densidad del espécimen (kg/m^3).



Figura 4. E-Meter C-4959 Mark II de James Instrument (Fuente M. A. Navarrete Seras).

RESULTADOS

Los siguientes resultados muestran las diferentes pruebas físicas y las pruebas no destructivas, realizadas a 48 cubos de roca de cinco centímetros de arista, de las cuales doce muestras fueron labradas en el laboratorio por cada banco para poder realizar las pruebas no destructivas, ya que se tienen que realizar en especímenes con caras planas.

Tabla 1. Resultados de pruebas físicas y no destructivas de los cuatro bancos de materiales pétreos.

Muestra	% H. Actual	% H. de Absorción	G.E	D(gr/cm ³)	ρ (ohm-m)	Vp (m/s)	Frec. long.(Hz)
CERRITOS	0.15	6.62	1.46	1.53	6005.51	1441.10	1564.14
JOYITAS	0.68	3.31	1.45	1.49	3794.65	1305.59	1469
CUENEMBO	0.23	5.15	1.65	1.72	1845.72	991.96	1545.06
TIGRE	1.58	4.65	1.35	1.44	12088.92	1484.33	1719.50

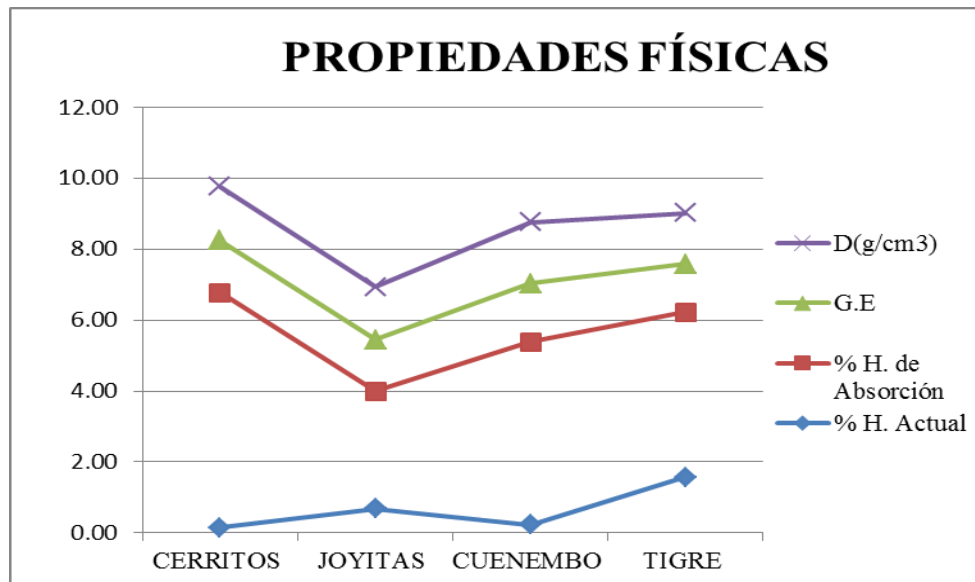


Figura 5. Resultados de las pruebas físicas. (Fuente M. A. Navarrete Seras).

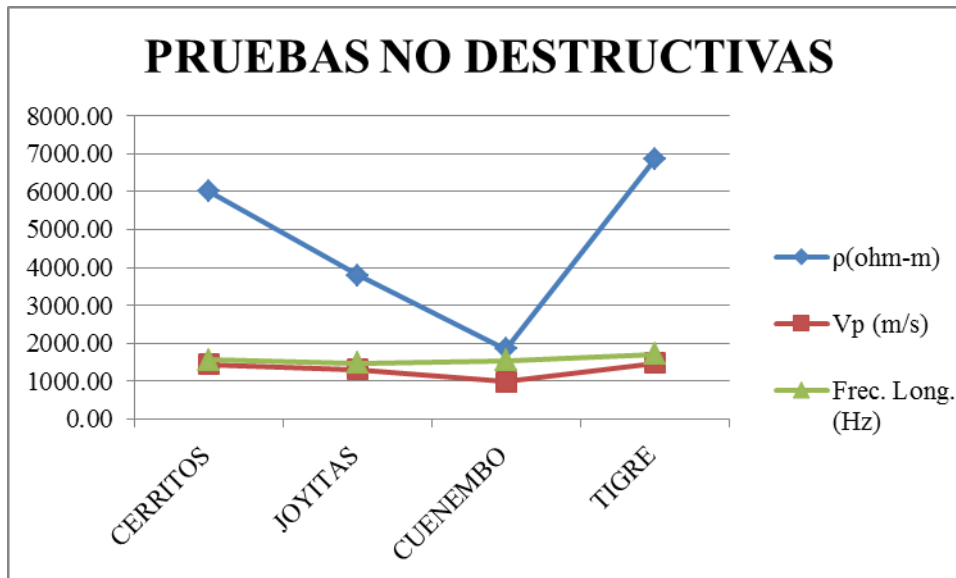


Figura 6. Resultados de las pruebas no destructivas. (Fuente M. A. Navarrete Seras).

CONCLUSIONES

Los bancos de materiales pétreos volcánicos: El Tigre, Cerritos, Joyitas y Cuenembo, poseen características físicas muy similares esto se puede observar en la figura 5, ya que la gráfica de Porcentaje de Absorción, Densidad, Gravedad Especifica tienen la misma forma, el Porcentaje de Humedad Actual se puede ver afectado por las condiciones del sitio donde se extrae el material o por labrar los cubos de cinco centímetros de arista.

En cuanto a las pruebas no destructivas se concluye que a menor resistividad, mayor densidad y entre mayor resistividad menor densidad, por ende la porosidad también influye en resistividad de la roca.

Los bancos de materiales volcánicos, en general siguen un comportamiento similar de acuerdo a sus propiedades físicas y por lo tanto influye directamente en la resistividad de la roca debido a que entre más homogénea es una roca se tiene menor resistividad, refiriéndose a homogeneidad en base a la observación macroscópica y microscópica de la porosidad de cada una de las rocas, por lo que al tener menor porosidad esto impide el paso de la corriente eléctrica obteniendo menores ohms, debido a que no tiene tanta absorción de agua factor que es importante para la resistividad, sin dejar de lado la estructura interna de las rocas ya que los poros pueden estar no interconectados lo que provoca cambios en la resistividad.

La Velocidad de Pulso Ultrasónico y la Frecuencia de Resonancia siguen un mismo comportamiento como puede observarse en la figura 6, por lo tanto estas propiedades dependen de las propiedades intrínsecas de los materiales pétreos.

En base en estos resultados el proyectista puede elegir el banco de materiales pétreos que para sus fines sea el más adecuado y poder optimizar la elaboración de mezclas de concreto y asfalto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el apoyo de las instalaciones del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

Los autores agradecen el soporte financiero del Proyecto Ciencia Básica del CONACYT.

REFERENCIAS

1. Mahmood Naderi, (2011). Non-Destructive Evaluation of Engineering Properties of Intact Rock Using the Friction-Transfer Method, Arab J Sci Eng, 36:215–226.
2. Christaras B, (1996). Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments. Bolletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY, Paris - No 54.
3. ASTM Standards, Standard: C 127-04. Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
4. Navarro L., Martínez W., Espinoza A “ANÁLISIS DE MATERIALES”, Libro de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales, FIC – UMSNH, tercera edición. (2011).
5. Juan José Carpio y miembros de la Red DURAR., 1998, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión En Estructuras de Hormigón Armado. Segunda Edición. Agosto, ISBN 980-296-541-3, pp. 117-119.
6. MONTOTO, M., 1996, Técnicas no destructivas aplicadas a la Conservación del Patrimonio Histórico. En "Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos", Sebastián, E., Editor. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía. Consejería de Cultura, pp 85-94.
7. Esbert, R. M.; Ordaz, J.; Alonso, F. J. y Montoto, M. (1997). Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales cerámicos pétreos y cerámicos. Col·legid'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 139 pp.
8. ASTM Standards, Standard: D 2845 – 00. Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.
9. CONTROLS, 58-E0049/A, 58-E0049/B Instrument for Ultrasonic Pulse Velocity and Rebound Hammer Tests, INSTRUCTION MANUAL.
10. ASTM Standards, Standard: C 215-02. Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.
11. JAMES INSTRUMENT INC. NON DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS, E-METER Resonant Frequency Tester MANUAL C-4959 MARK II.

USO DE VPU PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ENDURECIMIENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO

J. Flores-Gutiérrez¹, J.A.Vazquez-Feijoo², P. Montes-García², J.M. Mendoza-Rangel³

1. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Egresado de la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Calle Hornos No. 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.
2. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Profesor Investigador, Calle Hornos No. 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. pmontes@ipn.mx
3. Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), FIC, Cd Universitaria S/N, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C. P. 66451, México.

RESUMEN

Se analizó el proceso de endurecimiento de concretos mediante el tiempo de tránsito de la onda de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Se proporcionaron concretos de acuerdo con los métodos de Abrams, ACI y para altas prestaciones incluyendo ceniza volante (HPC0, HPC1 y HPC2). Inmediatamente después del colado de los concretos se realizaron pruebas de VPU a cada 15 minutos durante 24 horas. Los resultados de VPU se filtraron y se les aplicó la Transformada Rápida de Fourier. Se calcularon los cocientes espectrales con respecto HPC0 y se aplicó la Antittransformada de Fourier para la identificación de patrones de endurecimiento del concreto. El análisis de los residuales ayudó a definir el periodo a partir del cual el tiempo de tránsito puede ser confiable en el análisis de concreto en estado fresco. Además, se propone un método para la estimación de los tiempos de fraguado con base en la razón de cambio de los valores de tiempo de tránsito de la onda.

Palabras clave: Ceniza volante, Cociente Espectral, Transformada de Fourier, Velocidad de Pulso Ultrasónico.

ABSTRACT

In the present research the hardening process of concrete was analyzed by using the transit time of the wave from the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) test. Concrete mixtures in accordance with Abrams (Abrams), ACI and High Performance (HPC0) specifications were designed; to the latter 20 and 40% fly ash was added (HPC1 and HPC2). Reinforced acrylic molds were built and concretes were poured in them; following the casting UPV tests were conducted every 15 minutes for 24 hours. UPV results were filtered and then the Fourier Transform was applied. Spectral quotients relative to HPC0 were calculated; then the Fourier Antitransform was applied in order to identify specific hardening patterns. The residual analysis helped to define the period after which the UPV can be reliable in the study of concrete in fresh state. Based on the rate of change of the UPV measurements a method to estimate the setting times is proposed.

Keywords: Fly ash, Fourier Transform, Fourier Transform Quotient, Ultrasonic Pulse Velocity

INTRODUCCIÓN

La técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) se utiliza de manera cotidiana para la evaluación de las propiedades de materiales. En concreto hidráulico endurecido a base de cemento Portland se ha empleado como índice para la estimación indirecta de su resistencia a la compresión y para la identificación de imperfecciones, tales como fisuras, poros grandes y recientemente para estudiar delaminaciones¹.

En estado fresco la técnica de VPU se ha utilizado para estudiar, también de manera indirecta, el fraguado y endurecimiento del cemento Portland en pastas, morteros y en concretos^{2,3}, inclusive en materiales basados en cemento que contienen adiciones minerales de origen industrial^{4,5}.

El denominador común en la mayoría de esos estudios es que para la realización de la prueba de VPU se utilizaron generadores de funciones y un osciloscopio. Un enfoque más sencillo y económico es solamente el análisis del tiempo de tránsito de la onda a través de la probeta de concreto como aquel realizado por Beraldo y Zucco (2007). En ese trabajo los autores encontraron que con la ayuda de la técnica de VPU se puede analizar el desarrollo de los cambios estructurales en compuestos de cemento Portland y subproductos agrícolas⁶. Además, aunque de manera descriptiva, sugieren que el método empleado es suficientemente sensible para detectar la interferencia del tamaño de las partículas de la adición mineral y el efecto del contenido en cenizas en la magnitud de la VPU; así mismo, que permite evaluar la estabilización de las mezclas a lo largo del tiempo.

Las lecturas de velocidad de tránsito de la onda obtenidas de sistemas cementantes pueden arrojar valiosa información para la identificación de regiones en donde la pendiente puede considerarse como aproximadamente constante, y esto podría asociarse a cambios en las fases o periodos de densificación de la masa del concreto.

Por otra parte, la Transformada de Fourier es una herramienta útil para pasar al dominio del tiempo y así obtener información que no es evidente en el dominio temporal. Por ejemplo, es más fácil saber sobre que ancho de banda se concentra la energía de una señal analizándola en el dominio de la frecuencia. Es decir, se pueden estudiar en donde se encuentran los mas altos niveles energéticos durante el desarrollo de procesos; mientras que el cociente espectral de la transformada ayuda a identificar si un proceso involucra más energía que otro⁷.

El objetivo de la presente investigación fue identificar patrones de endurecimiento, la influencia del contenido de cemento y de la adición de ceniza volante en concretos hidráulicos utilizando la Transformada de Fourier y los cocientes espectrales de lecturas de VPU; así como definir la confiabilidad del uso de la técnica de VPU en concreto en estado fresco.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño del experimento.

En el presente estudio se elaboraron cinco tipos de concreto de acuerdo con los métodos de Abrams (Abrams)⁸, el Instituto Americano del Concreto (ACI)⁹ y el propuesto para concreto de altas prestaciones (HPC0) (Aitcin y Malhotra 1994)¹⁰; a este último se incorporó por reemplazo 20 y 40% de ceniza volante Tipo F (mezclas HPC1 y HPC2). Se utilizó cemento portland compuesto, arena de río y agregado grueso triturado de ¾".

Los proporcionamientos para las diferentes mezclas de concreto se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de materiales para elaborar 1m³ de concreto utilizando los tres métodos de diseño.

Método	a/mc	Cemento (kg)	Agua (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Ceniza volante (kg)	SP Plastol-4000 (lt)
Abrams	0.55	352	194	1014	774	0	0
ACI	0.40	505	214	929	713	0	1.52
HPC0	0.41	435	205	996	674	0	0.87
HPC1	0.41	348	205	996	674	78	0.69
HPC2	0.41	261	205	996	674	156	0.52

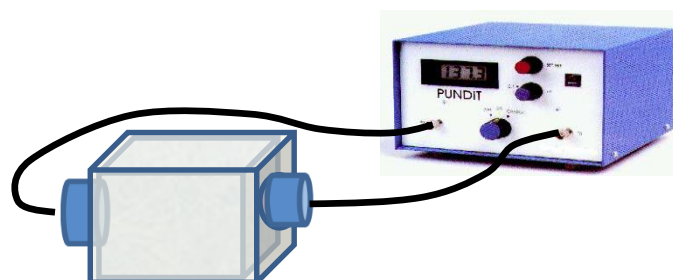
Pruebas en estado fresco.

Las mezclas de concreto se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C 172 – 04¹¹, y en seguida se les realizaron las pruebas de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams (ASTM C143/C143M-05), contenido de aire (ASTM C 231 – 04), peso volumétrico del concreto (ASTM C94/C94M-04^a) y temperatura (ASTM C1064/C1064M-05) (Figura 1).



Figura 1. Pruebas en estado fresco

Se elaboraron moldes de acrílico reforzado en donde se vertió la mezcla de concreto en estado fresco. Inmediatamente después del vertido se realizaron pruebas de VPU en todas las mezclas a cada 15 minutos durante 24 horas. La prueba de VPU se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM - C 597 – 02 utilizando un dispositivo de la marca SCHAFFNER, modelo PUNDIT 6, serie 971164589. Los arreglos para las pruebas de resistencia y VPU se muestran en la Figura 2.



Concreto en estado fresco

Figura 2. Arreglos para las pruebas de VPU

Los resultados de VPU se corrigieron utilizando un filtro de altas frecuencias y se les aplicó la Transformada Rápida de Fourier para eliminar la oscilación de las ondas, ya que algunos valores no eran crecientes con el tiempo, lo cual no representa de manera realista el proceso de densificación del concreto. En el dominio de la frecuencia se calcularon los cocientes espectrales con respecto a la mezcla HPC0 con el objeto de analizar el efecto del método de diseño de las mezclas y el de la adición de ceniza volante, especialmente para el caso del concreto de altas prestaciones. Enseguida, se aplicó la Antitransformada para regresar las lecturas al dominio del tiempo, y de esta manera identificar patrones de endurecimiento del concreto.

Se calcularon los residuales, es decir, la diferencia entre los datos originales y los analizados mediante la técnica de Fourier con el objeto de evaluar la efectividad del instrumento de medición en las diferentes etapas de endurecimiento del concreto.

Además, se obtuvieron las derivadas de los valores de VPU para analizar los cambios de las velocidades de la onda. De manera similar a los datos de VPU se filtraron, se les aplicó la Transformada Rápida de Fourier y se antitransformaron para eliminar las aceleraciones negativas de la onda registradas. La señal modificada sirvió para identificar el proceso de densificación del concreto el cual puede asociarse a la cantidad de energía producida durante la hidratación del cemento en cada mezcla. Es decir, se intenta estimar los tiempos de fraguado inicial y final de las diferentes mezclas en estudio.

RESULTADOS

Propiedades en estado fresco.

A pesar de que la mezcla de concreto Abrams tenía una relación agua/cemento más alta, las mezclas ACI y HPC tuvieron un revenimiento mayor debido al uso de superplastificantes. Los resultados también muestran el efecto de la ceniza volante ya que los revenimientos se incrementaron a medida que se incrementaba también el nivel de sustitución de dicho material.

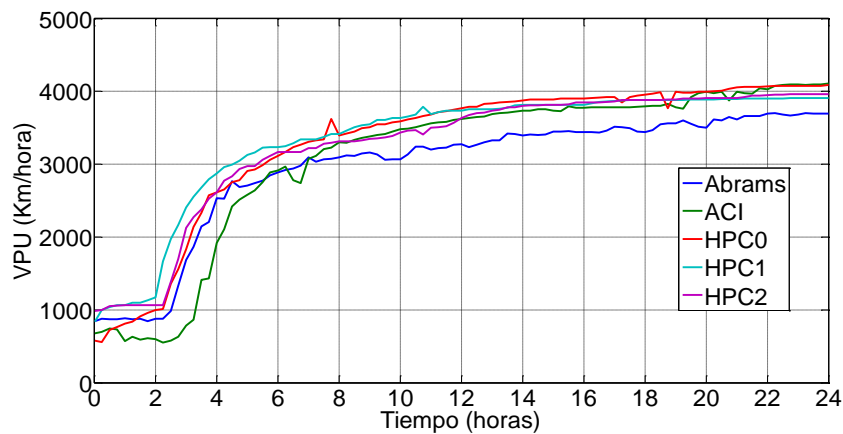
Los contenidos de aire atrapado en las mezclas de concreto fueron menores al 2%, similares a los valores reportados en la literatura¹². Además, el peso volumétrico del concreto disminuyó a medida que el contenido de aire disminuía. El concreto HPC obtuvo el mayor peso volumétrico comparado con las demás mezclas; no obstante, el peso volumétrico del concreto fue disminuyendo con el incremento de las cenizas volantes, dicho cambio se debió principalmente a que la densidad de la ceniza volante (2.27g/cm^3) es menor que la del cemento Pórtland (2.94g/cm^3). Los resultados de las pruebas anteriores son resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados en estado fresco del concreto

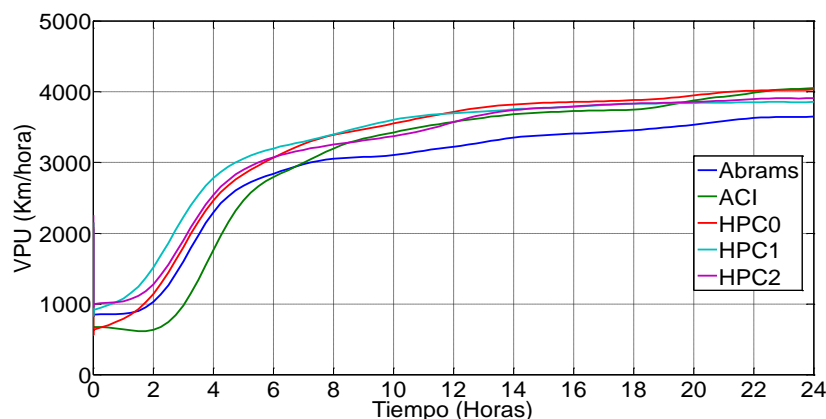
Tipo de mezcla	Revenimiento (mm)	Temperatura (°C)	Peso volumétrico (kg/m^3)	Contenido de aire (%)
Abrams	75	23.0	2335	1.7
ACI	90	24.0	2393	1.9
HPC	100	24.5	2443	1.8
HPC1	104	24.5	2348	1.6
HPC2	112	24.0	2333	1.4

Mediciones de VPU.

Los lecturas originales del tiempo de tránsito obtenidas de la prueba de VPU se muestran en la Figura 3a. Es importante mencionar que bajo el supuesto de que la solidificación de la matriz de concreto es un proceso continuo, las oscilaciones en la velocidad de onda pueden considerarse no pertenecer al proceso de densificación general. Por lo tanto el filtrado de altas frecuencias, la transformación y antitransformación de la señal ayuda a suavizar la curva y mostrar de una manera más realista el desarrollo del fenómeno en estudio (Figura 3b).



a) Datos originales



b) Datos filtrados

Figura 3: Registro de valores de velocidad de pulso ultrasónico en concreto en estado fresco

La figura 3b muestra la evolución de la VPU durante las primeras 24 hrs para todos los concretos. Todas las curvas pueden dividirse en tres regiones¹³. En la región 1, la hidratación inicia y enseguida ocurre el periodo durmiente. En este periodo las ondas se propagan a través de una suspensión viscosa. Conforme la hidratación continua, la tortuosidad del sistema de poros incrementa como resultado de la formación de productos de hidratación. La formación de una pequeña cantidad de productos de hidratación ocasiona un cambio importante en la tendencia al incremento de los valores de VPU.

En la región 2, los granos de cemento empiezan a entrar en contacto con el agua y la percolación de los sólidos parece ocurrir al inicio de esta región. La estructura sólida de poros que se encuentra aún llena de agua empieza a conectarse con los

nuevos productos de la hidratación del cemento generados; los valores de VPU de la estructura sólida en este punto se nivelan y las curvas se comportan como asíntotas.

A edades tardías, Etapa 3, las ondas se propagan principalmente a través de la estructura de la fase sólida. En ese punto, el agregado grueso contenido en el concreto tiene mayor rigidez que los constituyentes del mortero. En esta etapa, los valores de VPU incrementan gradualmente hasta la conclusión del experimento.

Al comparar las curvas se observa que el comportamiento de los concretos HPC es similar al del concreto ordinario (Abrams). Esto contradice a lo reportado en otras investigaciones en donde se sugiere que en concretos ordinarios los valores de VPU permanecen esencialmente constantes en la región 1, pero incrementan abruptamente en la región 2; mientras que los concretos de altas prestaciones exhiben un desarrollo lento y gradual de las lecturas de VPU⁴.

Es notable que los valores de VPU para el concreto sin CV con la misma a/c son mayores a edades tempranas a aquellos que contienen CV; pero a edades tardías son mayores. Este comportamiento puede atribuirse a que a edades tempranas las ondas se propagan a través de la fase viscosa del material. El comportamiento a edades tardías, en este caso, se debe a que el reemplazo de cemento por CV retarda la reacción de hidratación.

Es de esperarse que a edades mayores de 24 horas las lecturas de VPU de los concretos que tienen una mayor cantidad de cemento (ACI y HPC0) se incrementen considerablemente con respecto al concreto ordinario. De la misma manera, pero a más largo plazo, que los valores de VPU de los concretos que contienen CV (HPC1 y HPC2) sean mayores que los valores del concreto sin CV (HPC0). Esto ocurrirá como resultado de la reacción de hidratación del cemento retardada mediante el uso del SP y de la reacción puzolánica por la adición de CV, puesto que los dos aditivos se usaron en combinación en esos concretos.

La figura 4 muestra los cocientes espectrales de los diferentes mezclas de concreto cuando son comparadas contra la mezcla de altas prestaciones (HPC0). Las grandes oscilaciones al inicio y término de la señal son el resultado del uso de la Transformada Rápida de Fourier, lo cual ocurre cuando el número de datos que conforman la señal es pequeño. Por lo anterior, solo se analizan los cocientes calculados entre 3 y 22 horas.

Se observa que la energía asociada con las reacciones de hidratación que ocurren en la mezcla Abrams es menor que en la mezcla HPC0 (cociente espectral menor que 1). Por el contrario, para la mezcla ACI se observa la mayor generación de energía (cociente espectral mayor que 1). Esto es congruente con la información sobre las dosificaciones de cemento presentadas en la Tabla 1. Es decir, la mezcla ACI es la que contiene la mayor cantidad de cemento, siendo la mezcla Abrams la que tiene la menor cantidad.

Por otra parte, en las mezclas que contenían CV (HPC1 y HPC2) se observa que el cociente espectral es menor que 1; además, el efecto del uso de una mayor cantidad de CV (HPC2) puede también ser detectado.

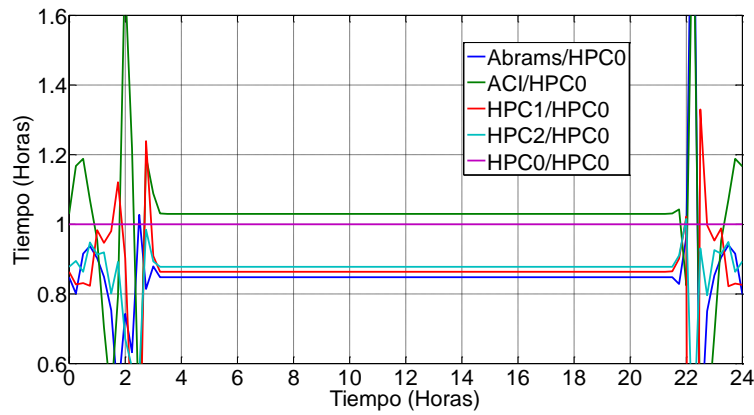


Figura 4: Cocientes espectrales de las mezclas con respecto a la mezcla HPC0

La figura 5 muestra los valores de los residuales, es decir, las diferencias entre los valores originales de VPU y valores de VPU filtrados y transformados. Las mayores diferencias se observan durante los primeros minutos posteriores al colado de los concretos, aunque estas diferencias disminuyen conforme transcurre el tiempo. Lo anterior sugiere que conforme la solidificación de las pastas aumenta, la estabilidad de las regiones sólidas es mayor.

Otra conclusión relevante del análisis de los residuales es que muestran que el tiempo de tránsito de la onda puede ser confiable para el estudio del proceso de densificación del concreto en estado fresco a partir de aproximadamente 8 horas posteriores al colado. En los concretos que contienen ceniza volante se observa menos variabilidad en los residuales, es decir, la técnica de VPU se puede utilizar para caracterizar las propiedades de estos concretos a edades menores que en concretos que contienen solo cemento, esto es, aproximadamente 5 horas posteriores al colado.

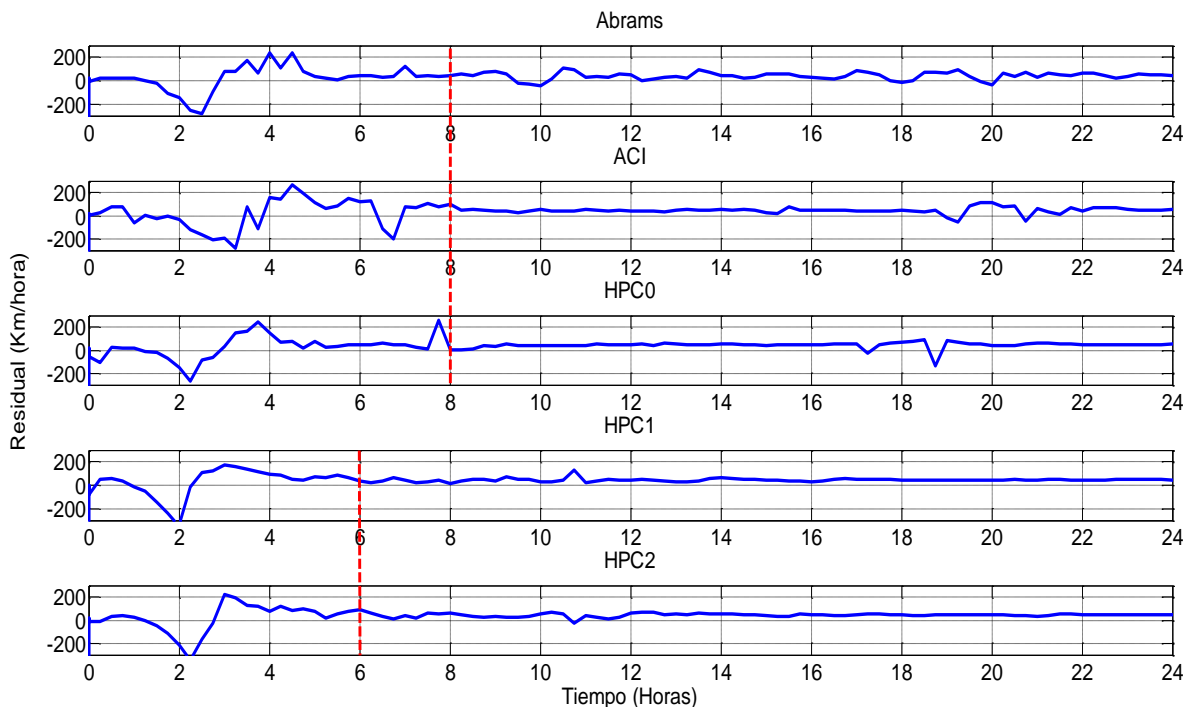


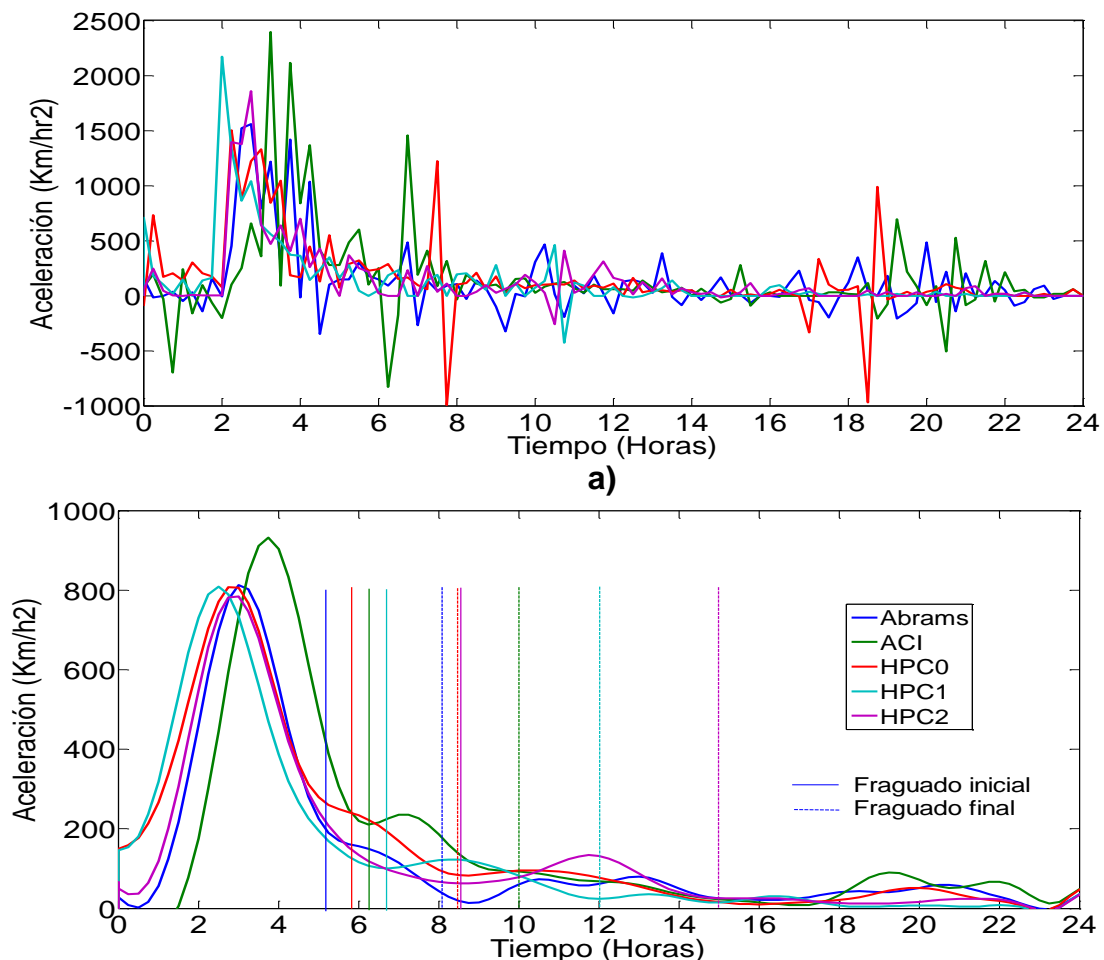
Figura 5: Resumen de residuales para las mezclas estudiadas

El cambio de rapidez de las velocidades de pulso ultrasónico se presenta en la figura 6a. Los resultados sugieren no solamente la desaceleración sino también la regresión (aceleraciones negativas) en el proceso de densificación de los concretos. Este último fenómeno no es posible ya que implicaría la pérdida espontánea de materia en el proceso de densificación de los concretos.

En la figura 6b se muestran los datos filtrados y transformados, lo cual permite elucidar que el proceso de hidratación de los diferentes concretos es variante en el tiempo.

De acuerdo con la literatura^{14,15}, los cambios en el estudio del proceso de hidratación del cemento portland a edades tempranas pueden ser observables principalmente en los siguientes casos: (a) cuando se usa un tipo diferente de cemento o una cantidad significativamente mayor del mismo cemento, (b) cuando se incorporan aditivos acelerantes o retardantes del fraguado, y (c) cuando se incorporan adiciones minerales ricas en compuestos de calcio o alúmina.

En la figura 6b se observa en primer lugar que la razón de cambio de la mezcla ACI es significativamente diferente a las demás, debido a que contiene una cantidad de cemento mayor. También se observa un pequeño efecto ocasionado por la incorporación de ceniza volante a edades tempranas. La ceniza volante incorporada fue Tipo F, con bajo contenido de calcio, por lo tanto su influencia en la razón de cambio de los valores de VPU, aunque perceptible, es poco significativa.



b)

Figura 6: Cambio en velocidad de pulso ultrasónico sin filtrar y filtrado

Un análisis cuidadoso de las razones de cambio de las lecturas de VPU puede arrojar información valiosa sobre el proceso de fraguado de las mezclas de concreto. Es evidente que durante las primeras horas posteriores al mezclado ocurre una actividad vigorosa la cual está representada por la primer cresta para cada una de las mezclas, tal como se observa en la figura 6b. La segunda cresta involucra cambios de menor intensidad de las lecturas de VPU. Los contenidos energéticos de la primera cresta y de la segunda pueden asociarse a los tiempos de fraguado inicial y final respectivamente. En la tabla 2 se presentan estos valores obtenidos de manera gráfica.

Los tiempos de fraguado obtenidos son congruentes con aquellos de la literatura⁴. Es decir, se ha reportado que los tiempos de fraguado inicial y final de una mezcla que contiene una mayor cantidad de cemento son mayores comparados con los de otra mezcla que contiene una menor cantidad de cemento. También se ha reportado que los tiempos de fraguado de una mezcla que contiene FA son mayores que los de una que no contiene este tipo de puzolana. Los retrasos en los tiempos de fraguado de concretos de altas prestaciones pueden atribuirse al tipo y cantidad de SP adicionado a la mezcla, así como a su combinación con puzolanas.

Tabla 3: Tiempos de fraguado inicial estimados

Mezcla	Tiempo de fraguado inicial estimado (horas)	Tiempo de fraguado final estimado (horas)
Abrams	5.0	8.0
ACI	6.5	10.0
HPC0	5.5	8.5
HPC1	6.5	12.0
HPC2	8.5	15.0

Investigaciones futuras abordarán la estimación de los tiempos de fraguado con base en los tiempos de tránsito de la onda utilizando una técnica más sofisticada y adecuada para el tratamiento de señales variantes en el tiempo, tal como el uso de la Transformada Ondícula Discreta.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los resultados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El tiempo de tránsito de una onda obtenido mediante pulsos ultrasónicos a través de concreto elaborado con cemento portland en estado fresco es útil para describir su proceso de endurecimiento. Las oscilaciones de las lecturas pueden atenuarse mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier.
2. Los cocientes espectrales, resultado de la división de la transformada de Fourier de una señal entre la transformada de Fourier de una señal control, son útiles para estudiar las cantidades de energía generadas por la

ocurrencia de reacciones de hidratación en el proceso de solidificación del concreto a base de cemento portland.

3. Los residuales, resultado de la resta de una señal original y una transformada, pueden ser utilizados para evaluar la confiabilidad del método de VPU en el estudio de las propiedades en estado fresco de concreto.
4. El estudio de la razón de cambio de los valores de tiempo de tránsito mediante el análisis de Fourier en concreto en estado fresco ayuda a identificar el efecto de adiciones químicas y minerales. Además, mediante un análisis más detallado de la señal es posible obtener una aproximación de los tiempos de fraguado inicial y final.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca para estudios de maestría otorgada a uno de los autores, y a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo financiero otorgado para la realización del proyecto.

REFERENCIAS

1. J.T. Petro Jr., J. Kim, "Detection of delamination in concrete using ultrasonic pulse velocity test", *Construction and Building Materials* 26, (2012): pp. 574–582.
2. H.W. Reinhardt, C.U. Grosse, A.T. Herb, "Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar", *Materials and Structures* 33, (2000): pp. 580 – 583.
3. M.I. Valic, "Hydration of cementitious materials by pulse echo USWR method, apparatus and application examples", *Cement and Concrete Research* 30, (2000): pp. 1633 – 1640.
4. H.K. Lee, K.M. Lee, Y.H. Kim, H. Yim, D.B. Bae, "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research* 34, (2004): pp. 631 – 640.
5. H. J. Yim, J.H. Kim, S.P. Shah, "Ultrasonic monitoring of the setting of cement-based materials: Frequency dependence", *Construction and Building Materials* 65, (2014): p. 518–525.
6. A.L. Beraldo y L.L. Zucco, "Evaluación de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) en mezclas de cemento Pórtland, ceniza y cáscara de arroz" in: IV Conferencia Panamericana de END, Asociación Argentina de Ensayes No Destructivos y Estructurales (Octubre 2007), Buenos Aires.
7. Lecture Notes for EE 261. The Fourier Transform and its Applications. Prof. Brad Osgood Electrical Engineering Department. Stanford University (2002)
8. D. A. Abrams, "Design of Concrete Mixtures", *Structural Materials Research Laboratory, Bulletin 1*, Sixth Printing, July (1924), Lewis Institute, Chicago, 20 pags.
9. ACI. 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)
10. P.K Mehta, P.C. Aitcin, "Principles Underlying Production of High-Performance Concrete", *Cement Concrete and Aggregates* 12, 2 (1990): pp. 70-78.
11. ASTM. Book of the American Society for Testing and Materials. American National Standards Institute.

12. A. Neville, Properties of Concrete, Fourth Edition (England, England: Pearson Education Limited, 1996): p. 623-641.
13. A. Smith, T. Chotard, N. Gimet-Breart, D. Fargeot, "Correlation between hydration mechanism and ultrasonic measurements in an aluminous cement: effect of setting time and temperature on the early hydration", J. European Ceramic Society 22, (2002): pp. 1947– 1958.
14. V. F. Rahhal, V. L. Bonavetti, R. Talero, "Hidratación temprana de cementos con mediano y alto contenido de adiciones minerales cristalinas", Revista de la Construcción 4, 2 (2005): pp. 13-24.
15. E. Rikard Ylmén "Early Hydration of Portland Cement: An Infrared Spectroscopy Perspective Complemented by Calorimetry and Scanning Electron Microscopy", Tesis de Doctorado, Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden, (2013): p. 38,41.



DIPLOMADO DESARROLLO DE ADMINISTRACIÓN DE **PROYECTOS**

Dirigido a gerentes, líderes y administradores de proyectos, y en general para toda aquella persona interesada en mejorar sus competencias como administrador de proyecto.


Obtendrás los conocimientos necesarios para **iniciar, planear, ejecutar, monitorear y cerrar** un proyecto de manera profesional.

Realiza **proyectos exitosos**, obteniendo experiencia transmitida por expertos.


El uso de técnicas de administración de proyectos ahorra tiempo y dinero a largo plazo.

**INSCRIPCIONES ABIERTAS.
MÁS INFORMES EN:**

 /educacioncontinuafic

 @educonfic

 educonfic@uanl.mx
educonfic@gmail.com

 14424447 y
14424400 Ext. 6724



VI CONGRESO NACIONAL **ALCONPAT**

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

T7.- CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO



CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO EN CONCRETO REFORZADO CON EL USO DE JALES COMO SUSTITUTO DE ARENA

F. J. Olguin Coca¹, L. D. López León¹, F. M. Almeraya Calderón², M. A. Baltazar Zamora³, L. G. Lizárraga Mendiola¹, Y. Rangel Martínez¹, M. R. González Sandoval¹, J.R. Betancourt⁴

1. Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

2. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, CIIIA, Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 6645

3.- Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n Zona Universitaria, Xalapa, Ver. C.P. 91090

4.- Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n Fraccionamiento Filadelfia, 35010 Gómez Palacio, Durango México

RESUMEN

El estudio de la corrosión en estructuras de concreto reforzado empleando agregados naturales es de vital importancia para caracterizar su durabilidad. En el presente trabajo se realizó la caracterización electroquímica de especímenes de concreto reforzado empleando jal como sustituto de arena. Para esto, se emplearon diferentes relaciones a/c (0.40, 0.50 y 0.60); de igual manera se realizaron concretos con arena de banco; además, se empleó la técnica de impedancia electroquímica para determinar la velocidad de corrosión. se realizó la comparación de los distintos sistemas evaluados, los cuales se sometieron a un medio salino sintético para acelerar el proceso de corrosión, empleando una cámara de niebla salina a diferentes tiempos de exposición de las probetas evaluadas.

Palabras clave: Corrosión, Jales, Electroquímica, Durabilidad

INTRODUCCIÓN

En nuestro país en gran medida los avances tanto científicos como tecnológicos están encaminados a la generación de nuevos productos conjuntamente con el establecimiento de nuevos procesos que garanticen un desarrollo sustentable, los cuales involucran sin dejar duda alguna a todas las áreas del conocimiento. En el campo de la ingeniería civil no hay excepciones ya que también se debe cumplir con la función esencial de fomentar la producción de nuevos materiales además de desarrollar esquemas tecnológicamente adecuados que aseguren un mejor empleo de los recursos naturales igualmente hay que asegurarse de que los procesos de producción y transformación de estos recursos satisfagan las necesidades de una comunidad cada vez mas demandante.

El inicio del concreto armado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX con la introducción del acero como material de refuerzo al concreto, hecha por Lambot en 1855 en la construcción de barcos de ferrocemento; ya en 1897 Hennebique construyó la primer estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña en el Molino de Weaver [1].

Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constructivos, agregados especiales (los diversos agregados ligeros o pesados), aditivos (plastificantes, micro sílice, ceniza volante) [2].

El incorporar materiales cementantes suplementarios al cemento Pórtland (mezclas ternarias) presenta grandes ventajas, debido a que desarrolla excelentes propiedades mecánicas y características de larga durabilidad [3].

La corrosión del acero embebido en el concreto, es un proceso electroquímico en el cual se desarrolla un ánodo donde se produce oxidación y un cátodo donde se produce reducción. El proceso de corrosión puede ser ocasionado por diversos factores, uno de esos factores son los sulfatos los cuales forman parte de las sales inorgánicas que normalmente están presentes en el terreno, en las aguas freáticas y superficiales, aunque su grado de concentración puede ser muy variable [4,5]. La presencia de sulfatos en el agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación y por otra parte el acero queda desprotegido y es ahí donde se desencadena el proceso de corrosión [6,7].

El material residuo de proceso de extracción de materiales de mina (jal), genera un contaminante muy importante en la cd. de Pachuca, el interés de esta investigación es poder aprovecharlo en la fabricación de elementos de concreto reforzado, con el fin de determinar las propiedades mecánicas así como su comportamiento electroquímico en el refuerzo de la varilla de acero en un sistema acero-concreto.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los principales parámetros a considerar para la realización de la presente investigación son:

1. Mezcla de concreto con $f'c=350$ kg/cm².
2. Dos tipos de cemento CPC 30 R y CPO 30R RS.
3. Acero al carbono AISI 1018, diámetro de 3/8".
4. Cuatro medios de exposición (arena contaminada con: 0, 1, 2 y 3% de Mg₂SO₄).
5. Monitoreo de potenciales e interpretación de acuerdo a Norma ASMT C876-09[8].
6. Monitoreo de velocidad de corrosión con la técnica de Rp ASTM [9]

Diseño y proporcionamiento de la Mezcla de Concreto

El diseño de las mezclas de concreto, se realizo de acuerdo al método del ACI 211.1[10]; para el cual se debe hacer la caracterización de las propiedades físicas de los agregados a utilizar, con base a la Normativa ONNCCE, posteriormente con el método del ACI se hace el proporcionamiento para determinar la cantidad de material necesario para elaborar un metro cubico de

concreto; en la siguiente tabla se muestra las cantidades empleadas.

Tabla I. Dosificación de la mezcla de concreto.

Contenido Kg/m ³	Concreto con $f'c=350$ kg/m ³
Cemento	456
Agua	205
Agregado grueso	995
Agregado fino o Jal	562

Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

Como anteriormente se menciona se emplearon dos tipos de acero de refuerzo, acero al carbono AISI 1018 de 3/8", en el centro de los especímenes se colocó una barra de acero inoxidable la cual funciona como electrodo auxiliar. Las dimensiones de los especímenes y el arreglo de las barras embebidas en ellos se observa en la Figura 1.

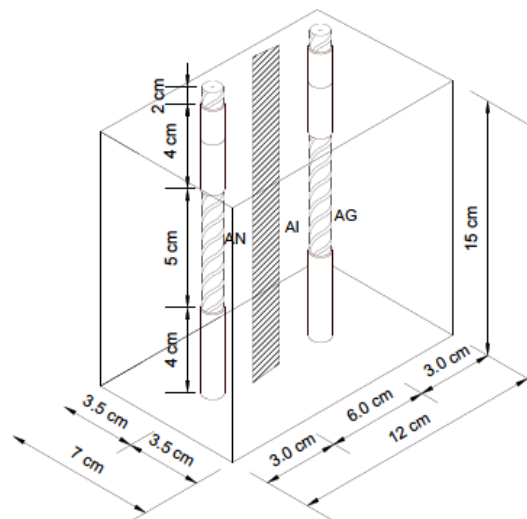


Figura 1. Dimensiones de los especímenes de prueba.

Las varillas de acero normal fueron limpiadas para retirar cualquier impureza que en ellas estuviese presente, posteriormente se delimitó el área a evaluar y el resto se cubrió con una pintura anticorrosiva.



Figura 2. Varillas pintadas a utilizar.

La fabricación de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-159-2004. A cada uno de los especímenes se le asignó una nomenclatura, en función de sus variables, la cual se muestra en la siguiente tabla.

Se fabricaron tipos de especímenes:

- 25% de jal
- 50% de jal
- 75% de jal
- 100% de jal
- Agregados de banco

Y 2 relaciones a/c 0.40 y 0.60

Tabla 2. Nomenclatura de especímenes de prueba.

Nomenclatura Empleada				
25J40C	50J40C	75J40C	100J40C	0J40C
25J60C	50J60C	75J60C	100J60C	0J60C

Los especímenes después de haber sido elaborados y descimbrados se sometieron a la etapa de curado durante 28 días como lo indica la norma, NMX-C-403-ONNCCE-1999.



Figura 3. Curado de especímenes.

Los especímenes fueron expuestos a la cámara de niebla salina (marca Ascott modelo S120s) utilizando el método que establece la norma ASTM B117 por periodos de 24 horas en dos ciclos, al igual se les realizó un monitoreo empleando la técnica electroquímica para determinar potenciales de corrosión y velocidad de corrosión.

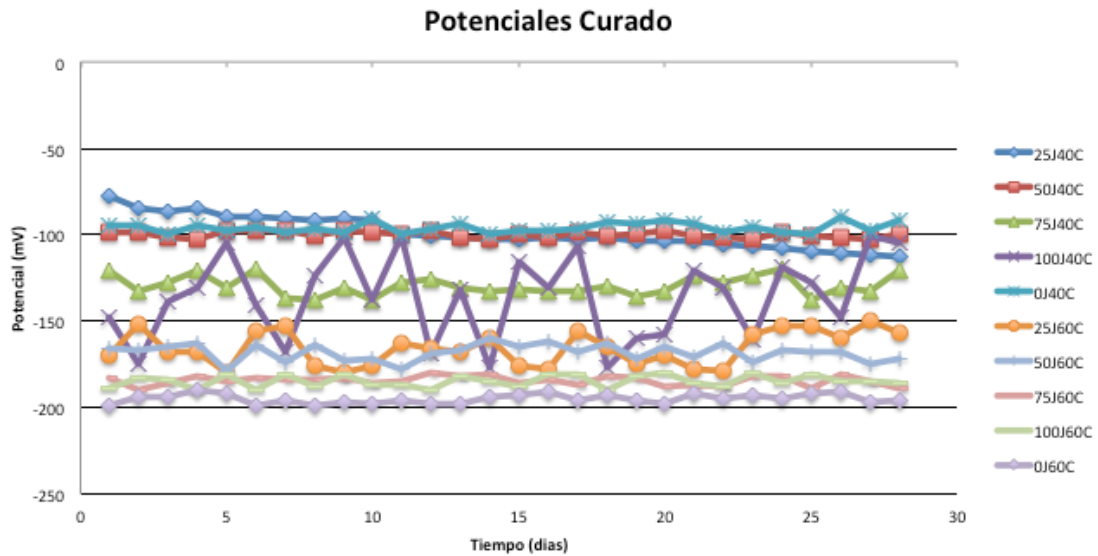
RESULTADOS

El monitoreo y la interpretación de los potenciales de corrosión se realizó con base a lo establecido en la Norma ASTM C876-09, que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

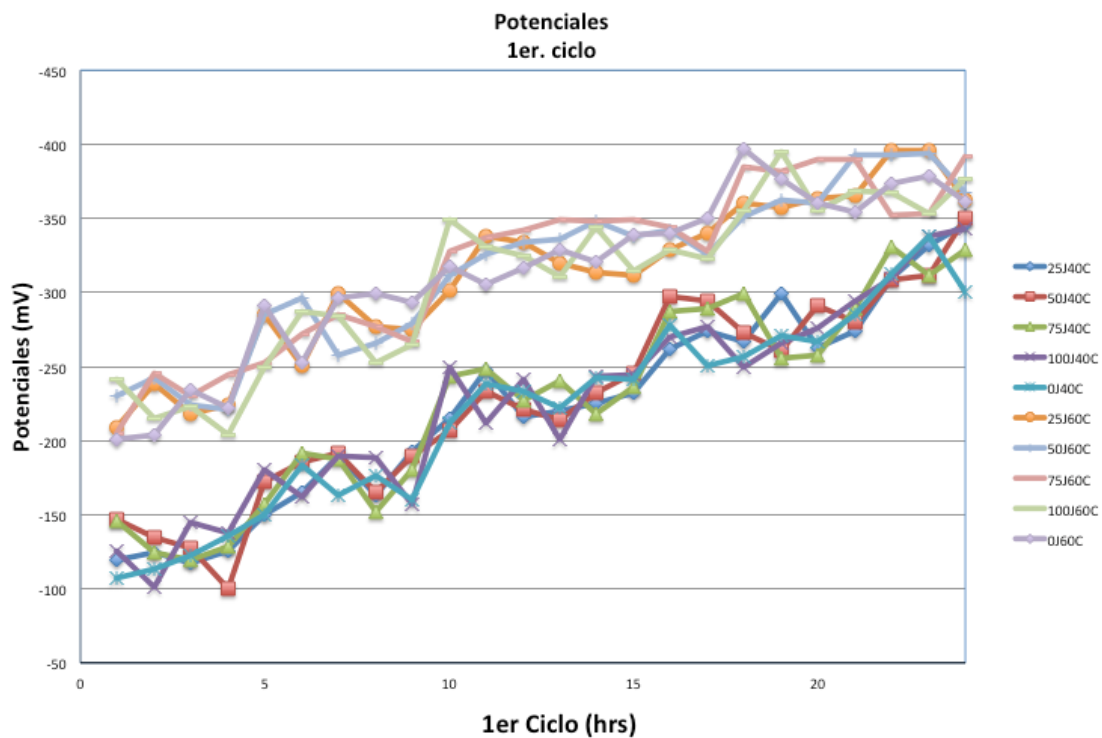
Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO₄	
< - 500	Corrosión Severa
< -350	90% de Probabilidad de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Probabilidad de Corrosión

En la grafica 1 se muestran los potenciales de corrosión en la etapa de curado donde se observa que los especímenes se encuentran en la zona de potenciales menores de -200 mV con un 10 % de probabilidad de corrosión.



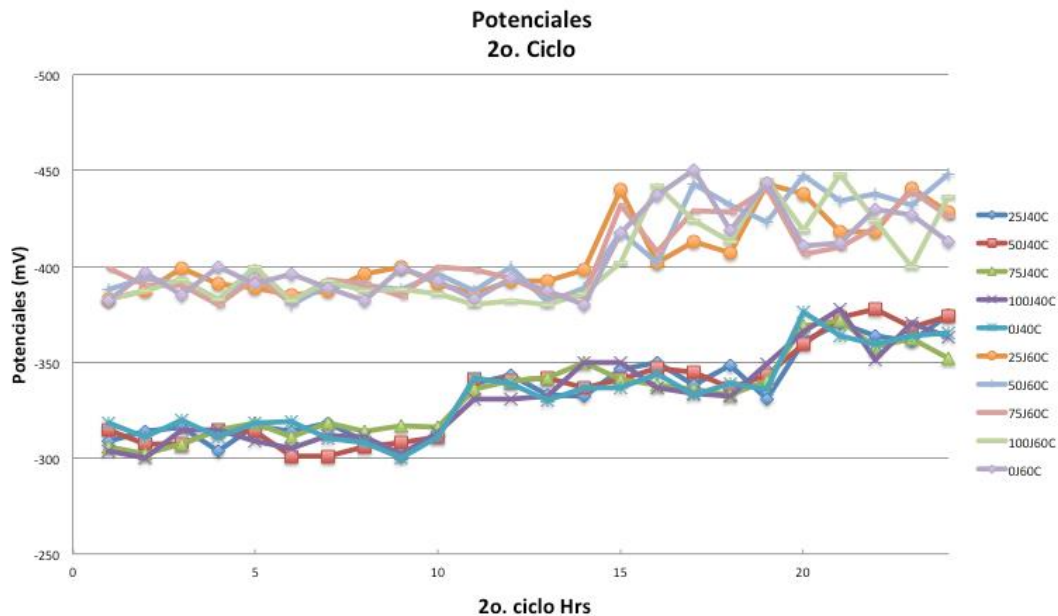
Grafica 1 Potenciales de corrosión en etapa de curado

En la grafica 2 se muestran los potenciales en las horas de exposición en la cámara salina donde se observa un incremento del porcentaje de corrosión después de la etapa de curado, el comportamiento de los potenciales en los especímenes de relación a/c 0.40 indican un incremento del potencial a zonas mas activas a un 90 % de probabilidad de corrosión, mientras que los de relación a/c 0.60 se conservan en una zona de incertidumbre.



Grafica 2 Potenciales de corrosión en el 1er ciclo

En la grafica 3 se muestra los potenciales en el 2º ciclo en la cámara salina se muestra los potenciales de media celda, se observa como los especímenes se encuentran en la zona de 90 % de probabilidad de corrosión por lo que muestra que los residuos de material de mina (Jal) se comportan de manera semejante que si se empleara arena de banco.



Grafica 3. Potenciales de corrosión en el 2º ciclo

Velocidad de corrosión

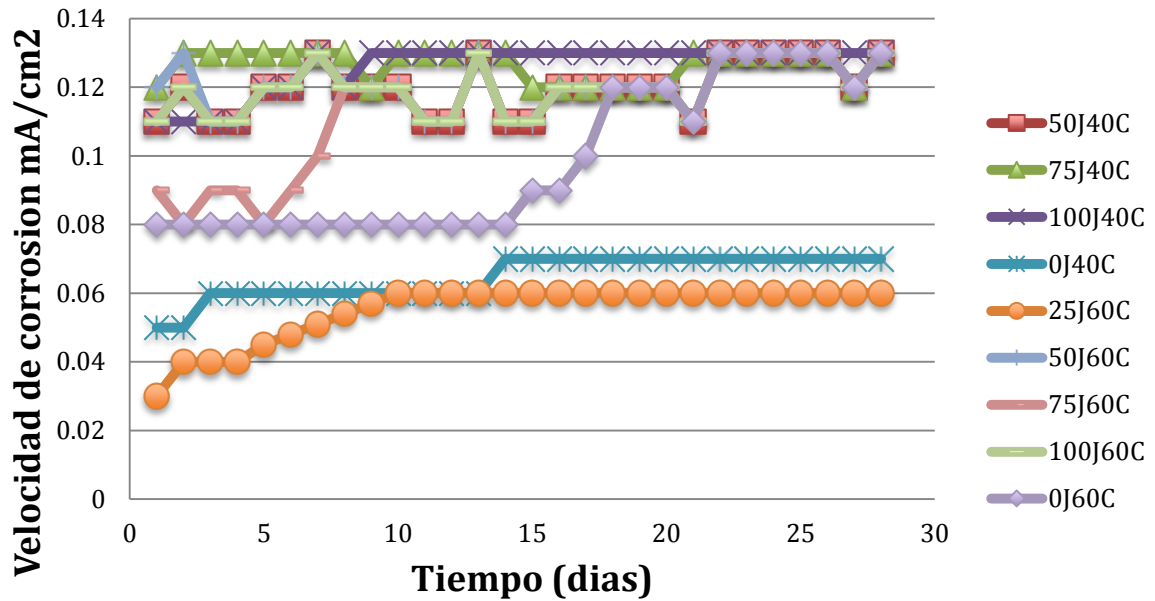
Las graficas 4 a 6 muestran el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero 1018 durante la etapa de curado y los ciclos de la cámara salina. La interpretación de los valores de icorr se realizó con base los rangos establecidos en el manual de la red DURRAR, tabla 4.

Tabla 4. Valores de icorr para la determinación de la velocidad de corrosión.

Velocidad de corrosión $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ vs Cu/CuSO_4	
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderada
0.5 – 1	Elevada
>1	Muy Elevada

En la grafica 4 se observa el proceso del comportamiento de la velocidad de corrosión empleando la técnica de resistencia a la polarización, donde se observa una velocidad un velocidad de corrosión con mayor actividad en los especímenes con material con jal, de igual forma se observa que los especímenes se encuentran en una velocidad de corrosión despreciable siendo que los especímenes están en la etapa de curado.

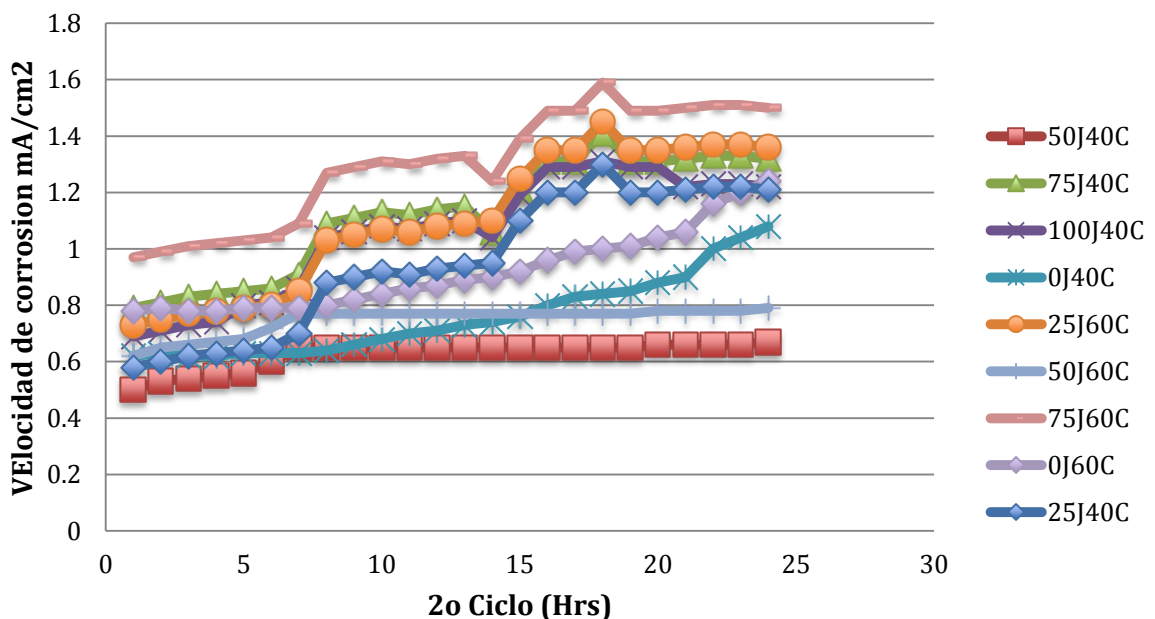
Velocidad de corrosión



Grafica 4 Velocidad de corrosión en la etapa de curado.

En la grafica 5 donde se observa la velocidad de corrosión en los especímenes en el 2º ciclo expuestos en la cámara salina se observo un incremento en la velocidad de corrosión y generándose una pasivación en los especímenes con 50% de Jal y un aumento en la velocidad de corrosión en los especímenes con rel. a/c de 0.60 pero mostrando de igual forma un periodo de pasivación en los especímenes con 50% de jal.

Velocidad de corrosión



Grafica 5 Velocidad de corrosión en 2º ciclo de cámara salina

CONCLUSIONES

El reciclado de material de mina (jal) aporta en un 50% una protección contra la corrosión de manera preliminar al combinarse con materiales de banco de material calizo.

El material estudiado presenta un comportamiento muy similar al material de banco en su comportamiento corrosivo, el material presenta una actividad corrosiva cuando se emplea al 100% debido a los componentes químicos que lo contiene.

La velocidad de corrosión se presentó como una corrosión elevada debido a que los resultados presentan valores entre 0.5 y 1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, en estudios posteriores se realizara los estudios con ruido electroquímico para conocer la evolución del material y su deterioro.

REFERENCIAS

- [1] P. Castro-Borges, M. Castillo, J. Carpio, J. Genescá, P. Helene, W. López, J. Pazini, A. Sanjuán y L. Véleva, *Corrosión en estructuras de concreto armado*, IMCYC, México (2001).
- [2] A. H. Nilson, *Diseño de estructuras de concreto*, Mc. Graw Hill, Colombia, (1999).
- [3] R.E. Núñez, C. Gaona-Tiburcio, J. Uruchurutu, C. P. Barrios, F. Almeraya-Calderón y A. Martínez-Villafañe, *Corrosion Evaluation of Modified Reinforcement Concrete by Electrochemical Noise Techiques, Portugalie Electrochimica*, Acta 23 (2005).
- [4] E.E. Maldonado-Bandala y et al. "Electrochemical Characterization of Modified Concretes with Sugar Cane Bagasse Ash" *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 6,, Pág. 4915-4926, Rep. de Serbia, 2011.
- [5] E.P. Reyes-Díaz y et al. "Corrosion Behavior of Steel Embedded in Ternary Concrete Mixtures" *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 6, Pág. 1892-1905, Rep. de Serbia, 2011.
- [6] ACI. *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1*, p. 29. Ed. IMCYC, México (2004).
- [7] Baltazar Zamora M.A., *Corrosión por Sulfatos en Concreto Reforzado*, Tesis de Maestría, U.A.CH, 2000.
- [8] Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, ASTM C 876-09, ASTM Volume 03.02, (2009).
- [9] M. A. Baltazar-Zamora y et al. "Efecto del tipo curado en la probabilidad de corrosión de concreto con acelerante expuesto a un medio urbano y marino". *CONGRESO ALCONPAT 2010*, Xalapa, Ver; México. (2010).
- [10] ACI. *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1*, p. 29. Ed. IMCYC, México (2004).
- [11] ASTM B117

CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE CLORUROS APLICANDO EDS-SEM PARA ACERO AL CARBONO Y ACERO TERMOTRATADO EN CONCRETO

R.A. Martínez-García¹, G. Fajardo¹, J. Pacheco², R. Orozco-Cruz³

- 1 Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
- 2 Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.
- 3 Unidad Anticorrosión, Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S. S. Juan Pablo II, Zona Universitaria, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México.

RESUMEN

Uno de los parámetros más significativos para la predicción del periodo de vida útil de una estructura de concreto reforzado expuesta en ambiente marino, es la concentración crítica de cloruros (CCC) necesaria para iniciar la corrosión del acero de refuerzo. Este trabajo compara la CCC y el comportamiento electroquímico entre el acero al carbono y el acero termotratado – QTB. Se utilizaron especímenes prismáticos de concreto con una relación agua/cemento de 0.65 expuestos a ciclos de inmersión en una solución de NaCl y secado a 40 °C. El potencial de media celda (HCP), la resistencia a la polarización lineal (LRP) y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) fueron monitoreados regularmente. Finalmente, la CCC fue cuantificada por medio de titulación potenciométrica y estimada por espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS-SEM), en ambos casos el acero termotratado requirió de una menor cantidad de cloruros que el acero al carbono para ser despasivado. Sin embargo, la cinética de corrosión presentó diferencias entre ambos tipos de refuerzo.

Palabras clave: acero termotratado, comportamiento electroquímico, concentración crítica de cloruros, espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X, concreto.

ABSTRACT

One of the most significant parameters for predicting the service life of reinforced concrete structures exposed to marine environment is the critical chloride concentration (CCC) for initiating the reinforcement steel corrosion. This work compares the CCC and the electrochemical behavior between carbon steel and thermo-treated steel – QTB. Reinforced concrete prismatic specimens with a water/cement ratio of 0.65 exposed in an accelerated environment through immersion-drying cycles were used. The half-cell potential (HCP), linear polarization resistance (LPR) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were monitored regularly. Finally the determination of the critical chloride concentration was performed with a potentiometric titration and estimated applying energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS-SEM), in both cases the thermo-treated steel required a smaller amount of chlorides than carbon steel to be depassivated. However, differences in the kinetics of corrosion between the two types of reinforcement were found.

Keywords: thermo-treated steel, electrochemical behavior, critical chloride concentration, energy dispersive X-ray spectroscopy, concrete.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzado constituyen la base fundamental de las obras de infraestructura, siendo su principal causa de deterioro la corrosión electroquímica del acero de refuerzo. La corrosión acorta considerablemente el periodo de vida útil, y de no tomar las precauciones necesarias puede generar costos directos e indirectos sustanciales, derivados de la reparación o sustitución de elementos estructurales y del cierre temporal o permanente de la estructura. El problema reside en que el concreto es por naturaleza un material poroso que permite mecanismos de transporte, por lo que la durabilidad de este tipo de estructuras expuestas en ambientes con altas concentraciones de agentes agresivos como los cloruros, presentan una tasa de deterioro muy elevada producto de la despasivación del acero de refuerzo a causa de un ataque localizado de estos aniones. La cantidad de cloruros necesaria en la interfase refuerzo-concreto para iniciar la corrosión del acero se denomina contenido crítico de cloruros (CCC) y ha sido objeto de numerosos trabajos.

Diversos autores han planteado distintas soluciones a esta problemática desde un enfoque preventivo, basado en la modificación de las propiedades y características químicas, microestructurales y superficiales del concreto y del acero de refuerzo [Belaïd et. al., 2001]. Hoy en día existen aceros de refuerzo modificados con diferentes manufacturas como el acero termotratado (ATT), que si bien su proceso de manufactura y propiedades físico-mecánicas han sido ya bien establecidas, existe una carencia de información acerca de su comportamiento frente a mecanismos como la corrosión en ambientes marinos. Aunque se trata de un acero de composición química similar a la del acero al carbono (AC), cumple con los requerimientos de ASTM-A-615 e incluso se comercializan de manera indistinta; el enfriamiento súbito que sufren las varillas ATT durante su proceso de fabricación, crea una capa superficial de martensita, la cual puede diferir en su comportamiento electroquímico de una ferrita-perlita, y por lo tanto del CCC para AC [Alonso C. et. al., 2000]. Debido a lo anterior, se considera de suma importancia caracterizar el comportamiento de dichas varillas actuando como acero de refuerzo embebidas en concretos expuestos en ambientes marinos.

Por otro lado existen distintos métodos y técnicas para cuantificar la concentración crítica de cloruros en el concreto, la más usual es la titulación potenciométrica descrita en ASTM-C-1152. Sin embargo hoy en día se han aplicado técnicas como la espectroscopía de energía dispersiva de rayos – X (EDS) de una forma novedosa, mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM). La finalidad de este trabajo de investigación es, además de obtener el CCC para dos aceros de diferente manufactura, comparar las técnicas de cuantificación antes mencionadas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Fabricación de los especímenes.

Se fabricaron 2 series de especímenes (AC y ATT) prismáticos de concreto con dimensiones de 17.50cm x 9.00cm x 15.00cm con una relación agua/cemento=0.65, a los cuales se les embebieron 2 varillas de un mismo tipo de acero con un diámetro

nominal de 0.95 cm y una longitud de 18 cm, utilizando un recubrimiento de concreto de 4 cm entre el refuerzo y las caras de exposición. Pevio a su montaje, las varillas se decaparon siguiendo el procedimiento descrito en ASTM G1, cuidando no afectar la capa martensítica superficial del acero ATT, y se prepararon delimitando un área de estudio con una longitud de 5 cm, como se muestra en la Figura 1. El resto de la superficie de las varillas se cubrió con pintura epóxica y cinta de aislamiento eléctrico. En uno de los extremos se realizó una conexión eléctrica, haciendo uso de un conductor eléctrico con la finalidad de realizar las lecturas electroquímicas. Finalmente, se utilizó un sellador vinílico en la superficie del concreto para delimitar el área de inducción de los mecanismos de transporte, protegiendo aquellas zonas en la que la acción de los agentes agresivos era indeseable.

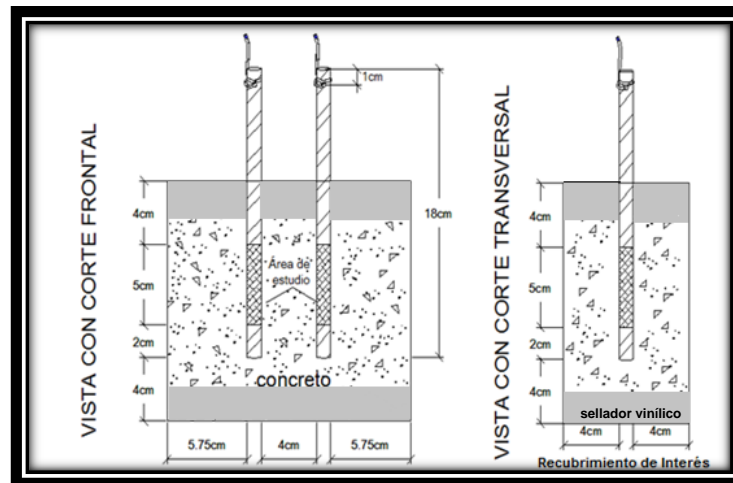


Figura 1. Esquema geométrico de los especímenes monitoreados durante la experimentación.

Exposición de los especímenes.

Para iniciar la corrosión, los cloruros deben ser transportados a través de la matriz porosa del concreto y romper la capa pasiva del acero de refuerzo, requiriendo de un amplio periodo de exposición en un ambiente marino natural. Por lo cual, la inducción de la despasivación se llevó a cabo sometiendo los especímenes a una exposición acelerada, promoviendo la difusión y el ingreso de cloruros a través de la matriz cementante hasta el acero de refuerzo. Este procedimiento consistió en 3 días de inmersión en una solución de 3.5% de NaCl y 4 días de secado a 40 °C con una H.R. de 60% y ventilación constante.

Seguimiento electroquímico.

Para evitar la caída óhmica por efecto del estado de humectación del concreto, las mediciones electroquímicas se llevaron a cabo al finalizar el ciclo de inmersión, de la siguiente manera:

Para cada serie, se seleccionaron 3 probetas para realizar el seguimiento electroquímico, utilizando el mismo electrolito de exposición y una configuración de 3 electrodos: un electrodo de trabajo (varilla), un electrodo de referencia de calomel

saturado (SCE) y un electrodo auxiliar o contra-electrodo (placa de acero inoxidable). Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un sistema VoltaLab PGZ-301, el cual consiste en un potenciostato-galvanostato con un analizador de frecuencias integrado y el programa VoltaMaster 4.0, utilizando siempre el equipo en modo potenciostático. Las técnicas empleadas para llevar a cabo el seguimiento electroquímico, se mencionan a continuación:

Potencial de media celda (E_{corr}). Se utilizó para obtener el potencial de corrosión (E_{corr}) del acero embebido en concreto, el criterio de activación se asignó tomando como referencia la norma ASTM-C-806.

Resistencia a la Polarización Lineal (LRP). Se utilizó para obtener la densidad de corriente asociada a la velocidad de corrosión (i_{corr}) del acero embebido en concreto, aplicando 20mV catódicamente a 20 mV anódicamente partiendo del potencial de reposo a una velocidad de barrido de 12 mV/min. El criterio de activación asignado fue una densidad de corriente igual o mayor a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [Alonso C. et. al., 2000].

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS). Se utilizó para interpretar el comportamiento del acero embebido en concreto y verificar los valores obtenidos por las técnicas de corriente directa (E – LRP). Esta técnica se aplicó en un rango de frecuencia de 10 mHz a 100 kHz con una perturbación de 10 mV de pico a pico.

Cuantificación de cloruros.

Titulación Potenciométrica. Una vez que las varillas se despasivaron debido al ataque por cloruros, se obtuvieron muestras de concreto a cada 8 mm desde el exterior del recubrimiento hasta el acero de refuerzo mediante corte con disco de diamante, para posteriormente ser trituradas y cribadas por el tamiz #100. El porcentaje de cloruros totales por peso de cemento se determinó en un titulador marca Metro-Ohm compuesto de un dosificador modelo 848 Titrino plus y un intercambiador automático de muestras 869 Compac Sample Changer, previa digestión ácida del polvo.

Espectroscopia de Energía de Rayos-X (EDS). Esta una técnica utilizada para identificar los elementos y/o fases presentes en un material de forma cualitativa. Además, de ser requerido, se pueden realizar análisis cuantitativos midiendo las intensidades de las líneas de rayos X emitidas desde el espécimen, lo cual se logra calculando las concentraciones elementales a partir de la relación entre dichas intensidades y las emitidas por muestras estándar de composición estequiométrica conocida. Cabe mencionar que su aplicación a la cuantificación de cloruros resulta novedosa y la preparación de la muestra tiene una importancia significativa, ya que de esta depende la calidad de los resultados obtenidos durante el análisis.

Así que asumiendo una adecuada preparación para una muestra de concreto sólido [Winter N.B., 2012], algunos autores [Pacheco J. et. al., 2012] han elaborado recomendaciones bajo las cuales se pueden obtener análisis cuantitativos por medio de la técnica de EDS-SEM. Sin embargo dichas condiciones pueden variar de un equipo a

otro. Para esta investigación, se realizó un análisis semicuantitativo de todas las muestras, con la finalidad de comparar cualquier valor de contenido de cloruros obtenido en la interfase acero-concreto con un espesor de 8mm al momento de la despasivación; por lo cual se optó por utilizar condiciones de análisis fijas y normalizar los resultados. Esto se logró haciendo uso de un microscopio JEOL JSM – 6510 LV, bajo los siguientes requerimientos:

- Se utilizó la primera apertura del SEM en modo de electrones secundarios, con un tamaño de apertura (spot-size) de 40 y 120 segundos de adquisición (live seconds).
- Se utilizó un voltaje de aceleración de 15 KV, con una intensidad de corriente de 80 μ A. Además de una distancia de trabajo de 15 mm, a 2500 aumentos.
- Para todo análisis se verificó que las cuentas por segundo (CPS) sobre la fase más continua (agregados) fueran ≥ 2000 , con la finalidad de corroborar la similitud entre las condiciones de experimentación. Solo los siguientes elementos en la pasta del concreto fueron considerados: Na, Mg, K, Ca, O, Al, Si, S y Cl.

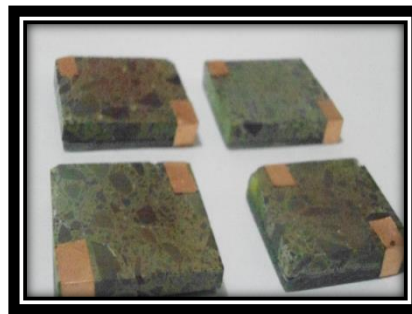


Figura 2. Muestras de concreto para el análisis de concentración de cloruros, EDS-SEM.

RESULTADOS

Seguimiento electroquímico.

Se asumió el mismo criterio electroquímico según ASTM-C 876, considerando para ambos tipos de acero la despasivación e inicio de la corrosión cuando el valor de E_{corr} es igual o menor a -273 mV (vs. SCE) y el valor de i_{corr} excede $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [Alonso C. et. al., 2000]. En la Figura 3 se presenta el seguimiento electroquímico para E_{corr} e i_{corr} de AC y ATT respectivamente.

Las varillas AC permanecen pasivas dentro un rango de -90 mV a -150 mV, activándose a los 20 ciclos (140 días) de exposición, llevando los potenciales a valores de -400 mV a -600 mV con una densidad de corriente cercana a $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Proceso que se acentúa a los 28 ciclos, con potenciales más electronegativos (-500 mV a -600

mV) e incrementando la i_{corr} en promedio hasta 4 veces, comportamiento que se mantiene hasta el final del periodo de exposición.

Por su parte las varillas ATT permanecen pasivas en un rango de -90 mV a -180 mV, activándose a los 15 ciclos (105 días) de exposición, con potenciales de -300 mV a -500 mV y una densidad de corriente de 0.1 a 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Al igual que las varillas AC acentúan su proceso de corrosión con valores de -500 mV a -600 mV, incrementando la i_{corr} en un rango de 1.0 a 3.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ hacia el final del periodo de exposición.

Sin embargo, es importante mencionar que a diferencia de AC, el ATT muestra un comportamiento de repasivación, el cual le permite reducir su potencial y velocidad de corrosión durante 4 ciclos inmediatamente después de su despasivación. Posteriormente presenta un comportamiento similar al de las varillas de AC. Durante el periodo de iniciación (del ciclo 1 al 13), ambos tipos de acero de refuerzo se comportan termodinámicamente de una manera similar, tal como lo evidencian los valores de E_{corr} . Sin embargo, la i_{corr} demuestra que el ATT presenta tasas hasta 2 veces menores que las de AC, tanto en el periodo de iniciación como hacia el final del periodo de estudio (propagación).

En la Figura 4 se presentan los diagramas de Nyquist obtenidos mediante EIS para el AC y el ATT. Se constata de manera cualitativa el rompimiento de la capa pasiva para cada uno de los sistemas. Del análisis de los resultados E_{corr} e i_{corr} , se puede deducir que el ATT requerirá de una menor cantidad de cloruros para su activación, ya que la concentración de cloruros en la interfase acero-concreto aumenta en función del tiempo; pero es preciso mencionar que a pesar de que el ATT tenga un periodo más corto para la despasivación, esto no implica en ninguna medida que tenga un periodo de vida útil menor al del AC. En efecto, mientras el AC se activa con un proceso de corrosión irreversible, el acero termotratado presenta propiedades intrínsecas para repasivarse y/o atenuar el proceso electroquímico de degradación sobre su superficie.

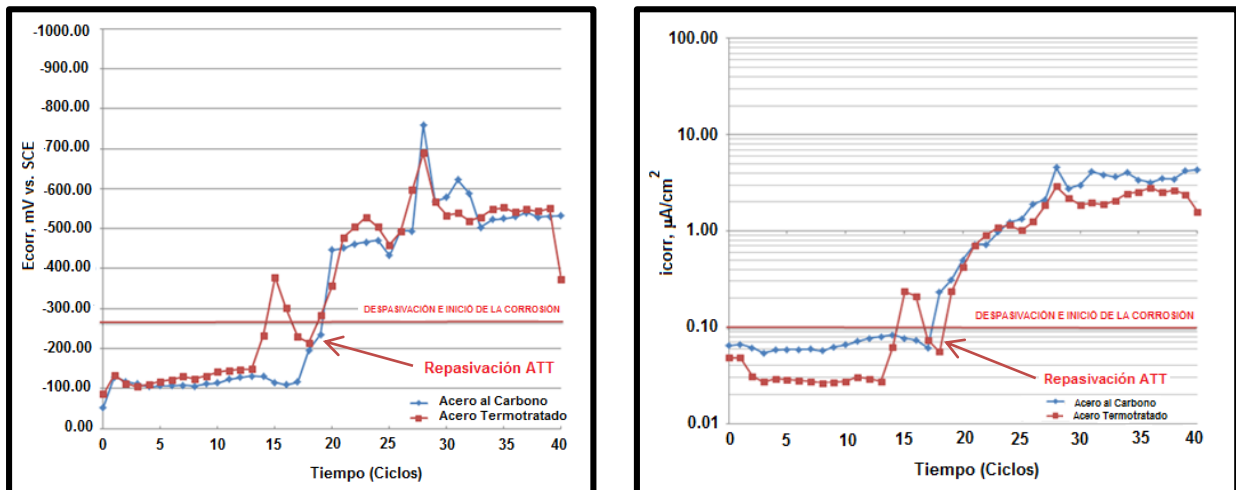


Figura 3. Comportamiento de E_{corr} e i_{corr} para AC y ATT.

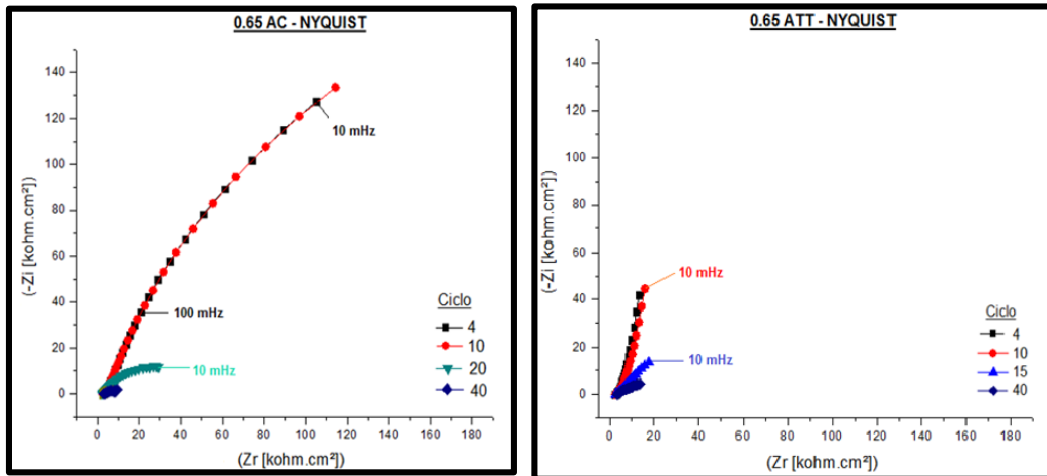


Figura 4. Respuesta de EIS para el AC y ATT a diferentes ciclos durante la exposición de los especímenes.

La termodinámica predice si un sistema tiene una tendencia a comportarse de una u otra manera. En particular, ambos tipos de acero por contener hierro (Fe) en su composición química, serían susceptibles a una reacción espontánea de oxidación; no obstante la termodinámica no proporciona información acerca de la velocidad con la que ocurren las reacciones. Es posible suponer que el ATT tenderá a activarse en un periodo de tiempo más corto que el AC, debido a que el ATT guarda una mayor cantidad de energía producto de su proceso de fabricación, en el cual se enfría súbitamente produciendo una capa exterior de martensita. Sin embargo el ATT presenta un comportamiento electroquímico de repasivación, el cual difiere por completo del comportamiento que presenta el AC e incluso muestra una menor i_{corr} . Este fenómeno se puede atribuir a dos razones:

- La composición química del ATT por lo general tiene una mayor proporción de microaleantes tales como el Cr y Mn, los cuales además de disminuir la temperatura de endurecimiento para el revenido y posterior formación de la capa martensítica, en términos cinéticos pueden incrementar la resistencia a la corrosión al formar óxidos e hidróxidos más compactos que los del AC, el cual se supone entonces, producirá más herrumbre que el ATT.
- Algunos autores [Arellano et. al., 2006] han reportado procesos de corrosión generalizada para acero termotratado expuesto en ambientes marinos. Por lo cual se propone que en un determinado momento, la superficie de las áreas anódicas es similar al de las áreas catódicas, lo cual puede balancear las reacciones electroquímicas y dar como resultado un aumento en el potencial de corrosión y una disminución de la velocidad de corrosión. Esto se puede llegar a percibir como una repasivación de forma momentánea mientras que se redistribuyen las áreas anódicas y catódicas en la superficie del acero.

Cuantificación de cloruros.

En general, a un mayor periodo de exposición en un ambiente salino corresponde una mayor cantidad de cloruros en la interfase acero-concreto. Consecuentemente, se puede esperar un aumento en la probabilidad de corrosión (E_{corr}) y una mayor velocidad de corrosión (i_{corr}). Aunque las técnicas de cuantificación son distintas y no se puede realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos, se encontró una cantidad menor de cloruros para provocar la despasivación del ATT con respecto al AC. Con los valores de CCC obtenidos mediante las técnicas de titulación potenciométrica por ASTM-C-1218 y EDS-SEM, se calcularon porcentajes y coeficientes de correlación, como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Contenido Crítico de Cloruros.

CONTENIDO CRÍTICO DE CLORUROS						
Sistema	Ciclo	% Cl⁻ / Peso de Cemento	% Cl⁻ EDS	% Correlación	Coefficiente	
AC	20	0.73	2.08	285	2.85	
ATT	15	0.45	1.37	304	3.04	

Los coeficientes de correlación resultaron en un rango aproximado de 2.85 a 3.04 con un coeficiente promedio de 2.95, lo cual indica que para un análisis de EDS llevado a cabo bajo las condiciones semicuantitativas ya descritas, se pueden esperar concentraciones 3 veces mayores a las obtenidas por el método ASTM.

Sin embargo, se recomienda realizar la cuantificación EDS-SEM, midiendo la corriente de la columna del SEM antes, durante y después de cada análisis; además de utilizar estándares de referencia para realizar una calibración de las concentraciones, obteniendo un valor más aproximado del contenido de cloruros sobre el espécimen.

CONCLUSIONES

Termodinámicamente ambos tipos de refuerzo (ATT y AC) se comportaron de manera similar, tanto en la etapa de iniciación, como en la etapa de propagación. Sin embargo cinéticamente el ATT se conservó desde un principio con una velocidad de corrosión (i_{corr}) hasta 2 veces menores que las de AC, observando además una etapa de repasivación en el ATT. Esta se puede explicar de dos formas: La formación de óxidos-hidróxidos más estables en el ATT debido a la diferente composición química de la fase martensítica exterior, o bien, a la redistribución de las áreas anódicas y catódicas debido a un proceso de corrosión generalizada sobre su superficie.

Se requirió de un menor contenido crítico de cloruros para despasivar las varillas de acero termotratado (ATT), requiriendo un % Cl⁻ / Peso de Cemento = 0.45 y un % Cl⁻ EDS = 1.37; que para las varilla de acero al carbono (AC), las cuales requirieron un % Cl⁻ / Peso de Cemento = 0.73 y un % Cl⁻ EDS = 2.08. Finalmente el coeficiente de correlación promedio en los sistemas concreto-acero analizados fue de 2.95.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más profundo agradecimiento a PROVERICYT, PAICYT y SEP-CONACYT por el apoyo financiero otorgado a los proyectos IT573-10 y 177839 CB-2012. Así mismo a la empresa DEACERO por la donación en especie del

material objeto de investigación. El Sr. Pacheco agradece y reconoce la beca “Ing. Félix Cantú –FIC”.

REFERENCIAS

- 1) F. Belaïd, G. Arliguie, R. François "Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements ". Cement and Concrete Research, Vol. 31, n°11, (2001) pp. 1561-1566.
- 2) C. Alonso, C. Andrade, M. Catellote, P. Castro, (2000), “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”, Cement and concrete research, Vol. 30, (2000) pp. 1047-1055.
- 3) J. Arellano, F. Aguilar, D.I. Martínez, G. Fajardo “Estudio de corrosión de varillas de alta resistencia obtenidas por el proceso tempcore® embebidas en concreto”. En memorias del II Congreso Nacional ALCONPAT, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. (2006) ISBN 968-9031-14-7. Tampico, Tamaulipas, México.
- 4) J. Pacheco, O. Copuroglu, B. Savija, E. Schlangen, R.B. Polder “Assessment of critical chloride content in reinforced concrete by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) revisited”, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III (2012).
- 5) N.B. Winter “Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete” First edition, WHD Microanalysis Consultants Ltd (2012).

COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN DEL CONCRETO DE ALTO RENDIMIENTO

F. Almeraya Calderón¹, F.J.Olguin Coca², F.H. Estupiñan López¹,
J.A. Cabral M¹., P. Zambrano R¹., C. Gaona Tiburcio¹,

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, FIME
Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA
Carretera a Salinas Victoria Km. 23. Apocada. Nuevo León. México.

² Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

RESUMEN

Los concreto de alto rendimiento son fabricados con cementos a base de aluminatos de calcio, a diferencia del cemento portland el cual tiene silicatos de calcio. En este estudio se evaluaron tres especímenes de concreto de 15 x 30 cm; dos especímenes (Piso y Muro) en solución acida y espécimen (testigo) en agua corriente. La exposición de los especímenes fue en dos medios corrosivos, solución acida H₂SO₄ al 10 % y un espécimen en agua corriente como muestra patrón. Exposición de los especímenes a 170°C (exposiciones por 24 horas: 48, 96,144, 192 horas y 14 semanas). Las técnicas empleadas fueron: Potenciales de corrosión conforme lo marca la norma ASTM C876 estas mediciones se hicieron con un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre. Esta medición es para saber cuál es su tendencia hacia corrosión y Medición de la velocidad de corrosión con la técnica de resistencia a la polarización lineal con base a ASTM G59. Teniendo una polarización de ± 20 mV a partir del E_{corr} . Los potenciales de corrosión indican que la probabilidad de corrosión esta en incertidumbre. La velocidad de corrosión esta en el orden de 10⁻³mm/año lo que representa un riesgo de daño moderado y despreciable después de 14 semanas de exposición y los especímenes en estudio tuvieron en general un buen comportamiento ante la corrosión.

Palabras Clave: Corrosión, monitoreo, concreto

INTRODUCCIÓN.

Los concreto de alto rendimiento son fabricados con cementos a base de aluminatos de calcio, a diferencia del cemento portland el cual tiene silicatos de calcio. Este tipo de concretos son utilizados porque tiene un endurecimiento muy rápido y en la industria petrolera, específicamente en las refinerías, por las necesidades del proceso de transformación del gas amargo en azufre, donde se utilizan fosas para almacenar al dicho azufre y es necesario contar con materiales resistentes a estas condiciones. El azufre liquido esta a una temperatura de 150°C y la presencia eventual del anhídrido

sulfúrico SO_3 muy corrosivo puede ser al origen de corrosión muy severa para los concretos tradicionales y aceros.

Determinar el deterioro por corrosión de especímenes de concreto reforzado elaborados con cemento a base de aluminatos de calcio, para aplicaciones en refinerías.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se fabricaron tres especímenes (foto 1.) de concreto con características ya definidas; dos especímenes (Piso y Muro) en solución ácida y espécimen (testigo) en agua corriente.

- La exposición de los especímenes se realizó en dos medios corrosivos, solución ácida H_2SO_4 al 10 % y un espécimen en agua corriente como muestra patrón.
- Exposición de los especímenes a 170°C (exposiciones por 24 horas: 48, 96, 144 y 192 horas).
- Las mediciones electroquímicas que se realizaron fueron (foto 2): Potenciales de corrosión conforme lo marca la norma ASTM C876 estas mediciones se hicieron con un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre. Esta medición es para saber cuál es su probabilidad de corrosión. Y Medición de la velocidad de corrosión con la técnica de resistencia a la polarización con base a ASTM G59. Empleando los siguientes parámetros $\pm 20 \text{ mV}$ a partir del E_{corr}

Las técnicas electroquímicas que se basan en la imposición de una perturbación al sistema en estudio, registrando la respuesta obtenida. La medición de las variables de corriente y voltaje obtenidas por medio de alguna técnica electroquímica puede proporcionar información sobre el potencial de corrosión, mecanismo y velocidad de corrosión.

Medición de Potenciales de Corrosión

Consiste en medir el potencial de corrosión (ASTM C876-09) del acero en el concreto mediante uso de electrodos de referencia. Se determinará el potencial de corrosión (tabla 1), que es un potencial eléctrico de metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. En la foto 3, se observa el esquema general para poder realizar la medición del potencial de corrosión del acero embebido en el concreto.

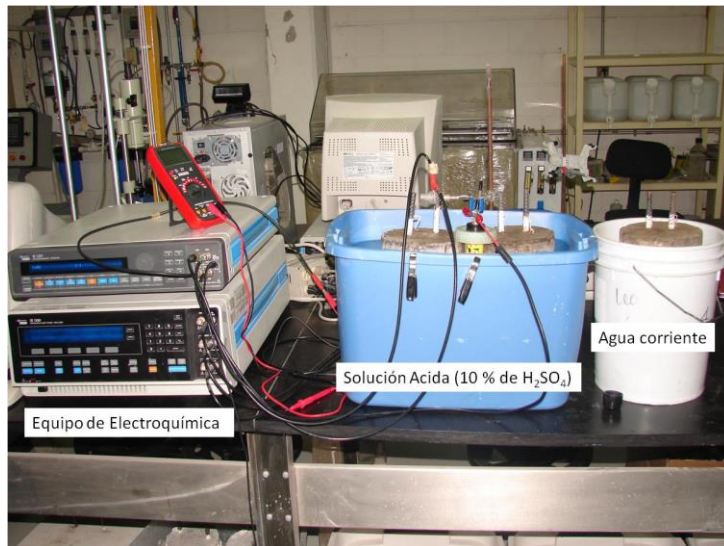


Foto 2. Arreglo experimental de los especímenes de concreto embebidos en solución acida y agua corriente.

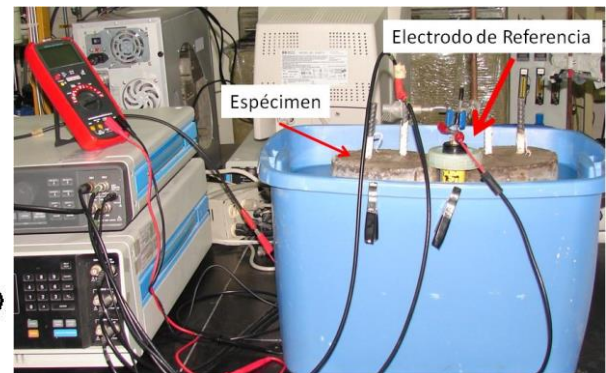
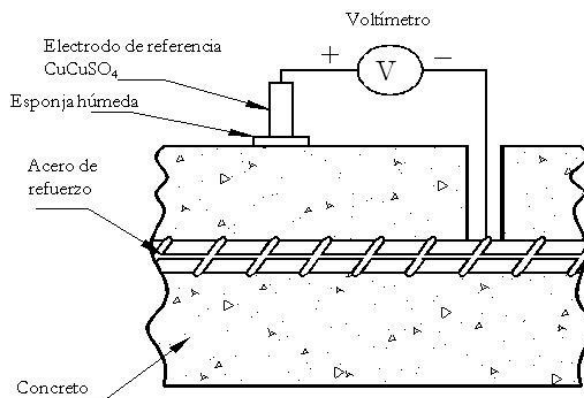


Foto 3. Esquema general para realizar la medición de potenciales de corrosión.

La interpretación de los potenciales de corrosión se realiza con base a la norma ASTM C-876 (ver tabla 1).

Tabla 1. Interpretación de resultados de los potenciales de corrosión: ASTM C-876

Potencial E_{corr} (mV)	Riesgo de Daño
< -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Incertidumbre
> -350	90 % de probabilidad de corrosión

ASTM C-876 (ASTM C876-91 (reapproved 1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)

Velocidad de Corrosión.

Las mediciones de la velocidad de corrosión se realizaron en base a la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización, R_p (ASTM G59-97). Este instrumento es capaz de medir la Resistencia a la Polarización (R_p), que se relacionan con la i_{corr} a través de la ecuación de Stern y Geary.

La medición se puede efectuar en los especímenes de concreto y la interpretación de la velocidad de corrosión es en base a la i_{corr} .

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

Tabla 2. Interpretación de la i_{corr} de corrosión en concreto (DURAR*).

*DURAR (Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura. CYTED, (1997).

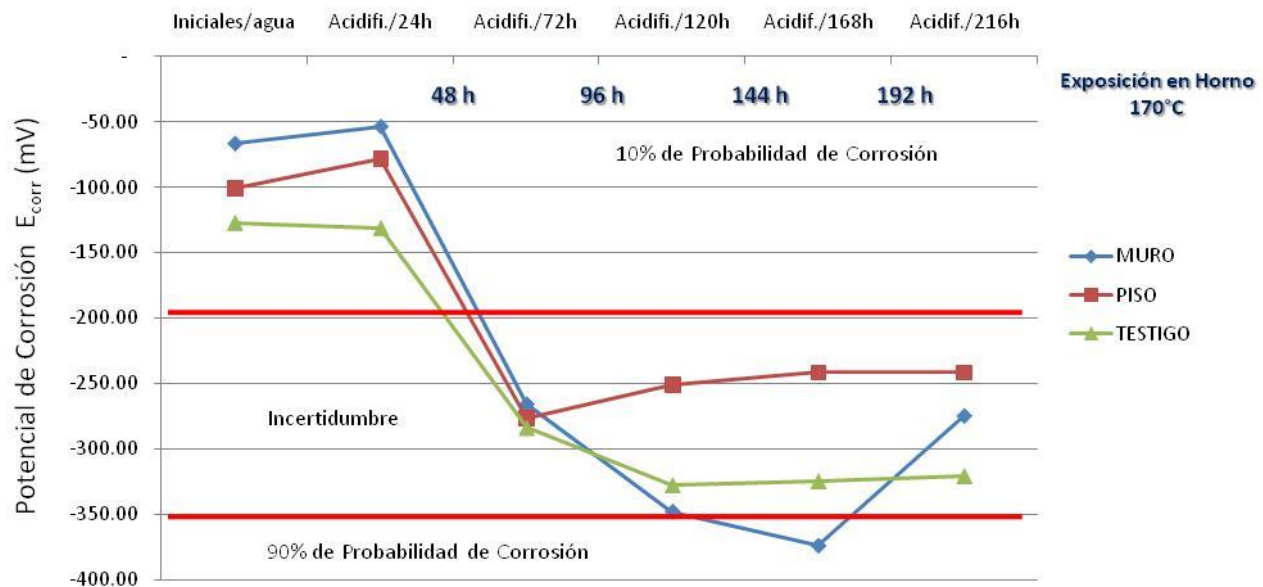
RESULTADOS

Pruebas de Corrosión

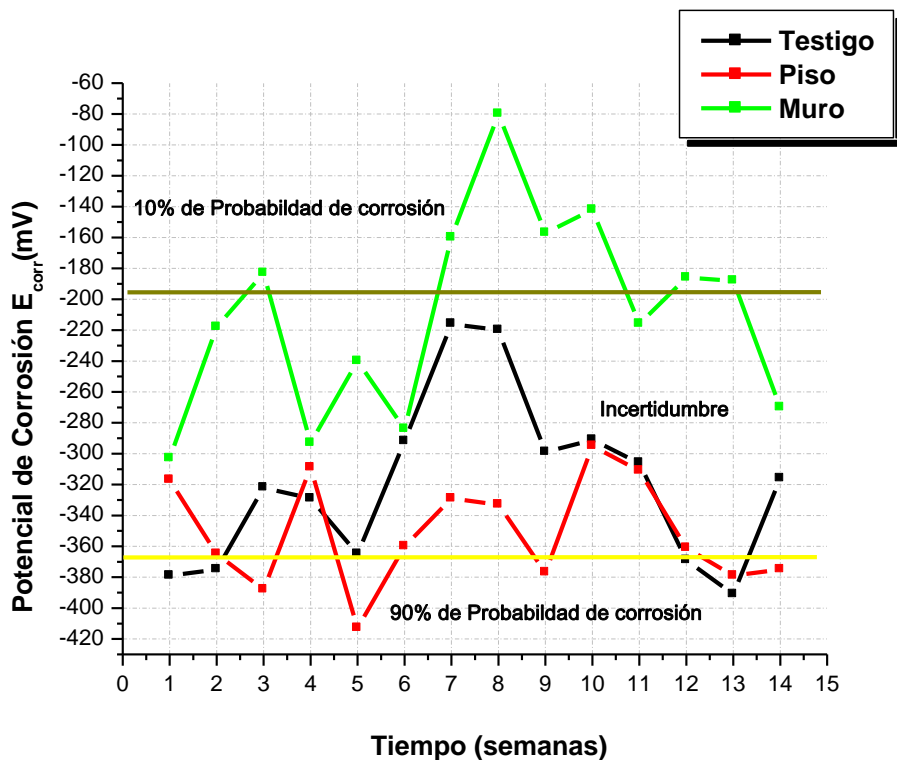
El análisis de las gráficas de potencial de corrosión o potenciales de media celda obtenidas durante el estudio a especímenes de concreto, se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876 ver Tabla 1.

Los valores de potencial proporcionan la probabilidad acerca de la corrosión del acero que se está presentando dentro del espécimen de concreto, en la tabla 3, se presentan los valores.

Los potenciales de corrosión (grafica 1 y 2) de los especímenes en estudio indican que desde las primeras horas de exposición este material tiende a ir a valores activos y mantenerse en el intervalo de incertidumbre. El espécimen testigo que representa a un concreto normal se mantiene en un comportamiento intermedio, entre los especímenes de muro y piso.



Gráfica 1. Potenciales de corrosión, después de 216 horas.



Gráfica 2. Potenciales de corrosión, después de 14 semanas

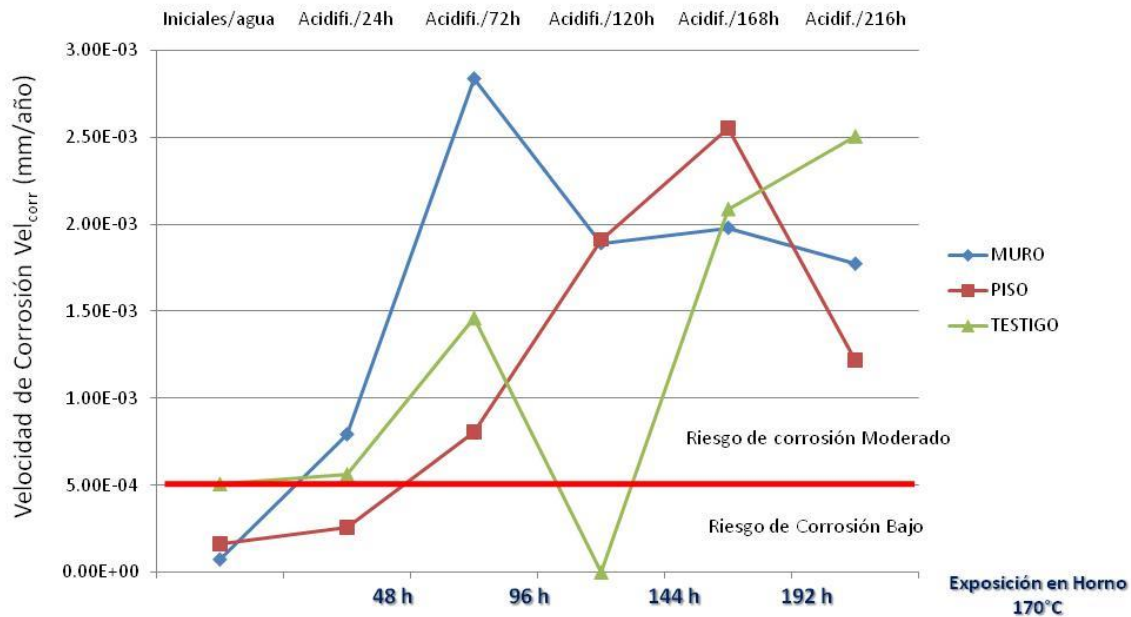
En la gráfica 1, se puede observar que los potenciales de corrosión fueron disminuyendo a valores activos conforme pasa el tiempo de exposición ya sea en la solución acida y en exposición dentro del horno. Se puede ver que los especímenes de concreto en las primeras exposiciones agua corriente y 24 horas de inmersión en solución acida, tiene solamente el 10% de probabilidad de corrosión. Después de las primeras exposiciones a 170°C, los potenciales bajan al intervalo de incertidumbre (-200 a -350 mV). Solamente el espécimen del Muro a las 120 y 168 horas de exposición quiso bajar más el potencial y meterse a la zona del 90% de probabilidad de corrosión.

Velocidad de Corrosión

El análisis de la cinética de corrosión (velocidad de corrosión) permite establecer el riesgo de corrosión que puede tener el acero embebido en el concreto.

En la gráfica 2 se puede ver que los valores de la velocidad de corrosión para los especímenes en estudio están en el orden de 10^{-3} mm/año, lo cual establece un riesgo

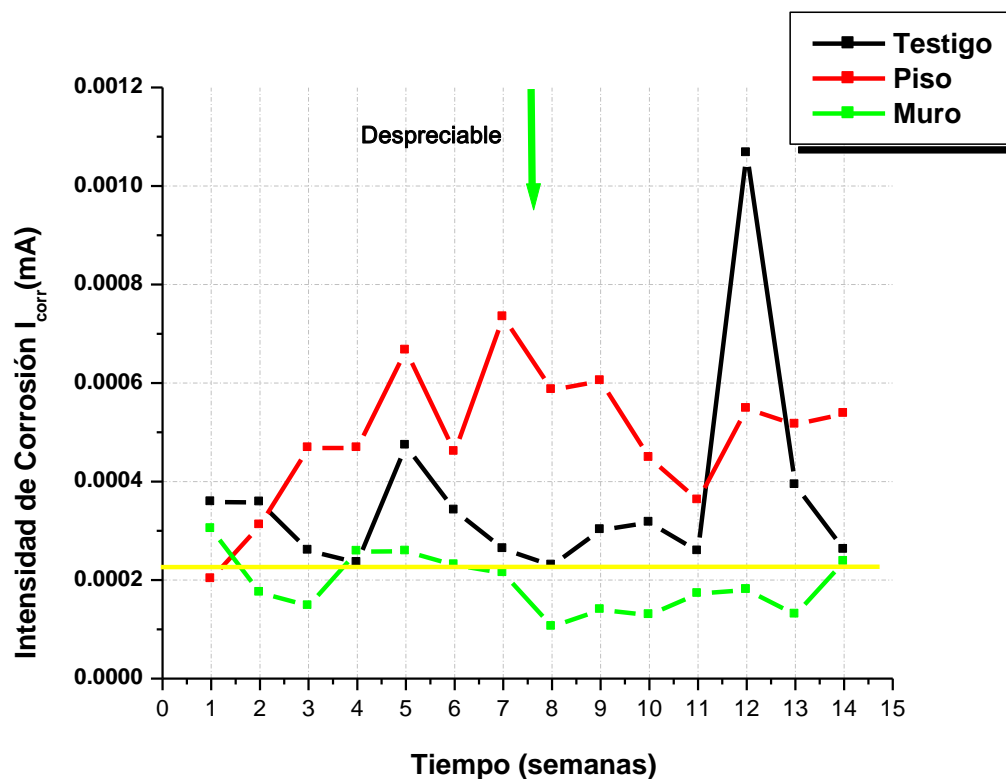
de corrosión moderado, solamente en los primeros días de exposición se presentó un riesgo de daño bajo con valores de velocidad de corrosión de 10^{-4} mm/año.



Gráfica 3. Velocidad de corrosión, después de 216 horas.

En la gráfica 4, se observa que después de 14 semanas la velocidad de corrosión se considera despreciable en cualquiera de los especímenes en estudio. El comportamiento de este tipo de materiales (Cemento) es aceptable.

Al correlacionar los resultados de potenciales y velocidad de corrosión se pudo observar que los potenciales se mantienen en un nivel de incertidumbre y el nivel de riesgo de corrosión es moderado en un inicio y después es despreciable.



Gráfica 4. Velocidad de corrosión, después de 14 semanas.

CONCLUSIONES:

- Los potenciales de corrosión indican que la probabilidad de corrosión esta en incertidumbre.
- La velocidad de corrosión esta en el orden de 10^{-3} mm/año lo que representa un riesgo de daño moderado y despreciable después de 14 semanas de exposición.
- Los especímenes en estudio tuvieron en general un buen comportamiento ante la corrosión.

Agradecimiento.

Los autores agradecen el apoyo a la UANL y al proyecto Promep /103.5/12/3385.(UANL-PTC-586).

REFERENCIAS

1. Andrade C. (1989). "Manual-Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras," Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
2. Barrios D. C (et al) *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 3178 - 3190
3. Keer J. G. (1992). Surface treatments. En "Durability of Concrete Structures- Investigation, repair, protection," Mays G. (Editor), E&F Spon, Londres, Reino Unido, pp. 143-157.
4. ASTM C-876 (ASTM C876-91 (reapproved 1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)
5. DURAR (Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura. CYTED, (1997).
6. Reyes-Díaz P.E, E. B. Maldonado, F. Almeraya C., DM Bastidas, M. Z. Baltazar, J. Chacón N., A. Martínez-Villafañe, JM Bastidas, C. GaonaT., *Int. J. Electrochem. Sci*, 6 (2011) 1892-1905

CORROSION DE CONCRETOS REFORZADOS ALIGERADOS CON MEZCLAS TERNARIAS

E P. Reyes Díaz¹, F. Almeraya Calderón², F.J.Olquin Coca³, F.H. Estupiñán López², J.A. Cabral M², P. Zambrano R², C. Gaona Tiburcio².

¹ Universidad Autónoma de Coahuila.

Facultad de Ingeniería Civil Unidad Torreón, Torreón, Coahuila, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, FIME Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA
Carretera a Salinas Victoria Km. 23. Apocada. Nuevo León. México.

³ Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

RESUMEN

En este trabajo se pretende generar concretos más versátiles, resistentes y más ligeros, el concreto se encuentra en una investigación constante. El acero de refuerzo es otro elemento que está también en estudio para su protección en contra de la corrosión dentro de la estructura del concreto ya que presenta deterioro tanto en estructuras normales como las que se encuentran inmersas en medios salinas.

Los concretos de densidades menores (1,350-1,850 kg/m³) empleando agregados ligeros como la piedra pómez y fibras de polipropileno, materiales re-utilizados de desecho tanto de uso común como industrial, así como la evaluación de la resistencia a la corrosión de concretos reforzados ligeros, elaborados con mezclas que incorporan ceniza volante y escoria de alto horno (mezclas ternarias), los concretos que incluyen este tipo de cementantes, pueden desarrollar propiedades ventajosas y mayores resistencias a las esperadas, así como dar mejor protección a los refuerzos metálicos embebidos.

Palabras Clave: Corrosión, mezclas ternarias, concreto

INTRODUCCION.

En la actualidad, el concreto es el material de construcción más importante y utilizado con mayor frecuencia en las grandes construcciones de complejos industriales, vías de comunicación y edificaciones en todo el mundo.

El inicio del concreto armado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX con la introducción del acero como material de refuerzo al concreto, hecha por Lambot en 1855 en la construcción de barcos de ferrocemento; ya en 1897 Hennebique construyó la primer estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña en el Molino de Weaver [1].

Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constructivos, agregados especiales (los diversos agregados ligeros o pesados), aditivos (plastificantes, micro sílice, ceniza volante) [2].

El incorporar materiales cementantes suplementarios al cemento Pórtland (mezclas ternarias) presenta grandes ventajas, debido a que desarrolla excelentes propiedades mecánicas y características de larga durabilidad [3].

El concreto ligero (liviano) estructural es un concreto similar al concreto de peso normal, excepto que tiene una densidad menor (1350 a 1850 kg/m³) [4]. Se le produce con agregados ligeros o con una combinación de agregados ligeros y normales o a través del procesamiento de otros tipos de materiales, tales como escorias y piedra pómez natural [4] o artificiales y en la actualidad con el uso de materiales de desecho de uso común o industrial

El objetivo de este trabajo es mejorar las propiedades del concreto generando concretos reforzados aligerados sustituyendo cemento Pórtland por ceniza volante y escoria de alto horno; siendo los agentes aligerantes materiales de re uso (piedra pómez del lavado de la mezclilla y polipropileno material de desecho de costales) y realizando mediciones de potenciales y evaluaciones de ruido electroquímico.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. Condiciones Experimentales

2.2.1 Material

La piedra pómez es una roca común de origen volcánico lo suficientemente fuerte y ligera, con pesos específicos reales alrededor de 2.40 kg/dm^3 [5]. En este trabajo se re usó piedra pómez del lavado de la mezclilla.

El polipropileno estructuralmente es un polímero vinílico, pertenece al grupo de los termoplásticos, la densidad, está comprendida entre 0.90 y 0.93 g/cm^3 , es un material fácil de reciclar, tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse, buena dureza superficial y estabilidad dimensional, posee gran resistencia a agentes químicos y presenta poca absorción de agua [6]. Se utilizó material de desecho de costales de polipropileno en donde se deposita azúcar: El costal es deshilado, el ancho de los hilos que se obtiene varía de 2 a 4 mm con un largo de 1.25 cm.

La caliza es una roca sedimentaria, con dureza de 3; la densidad, puede variar de acuerdo a la cantidad de restos fósiles y silicatos que esta contenga, pero generalmente son ligeras 2.71 g/cm^3 . El uso de las rocas calizas es muy extenso, su mayor utilización es en la construcción.

La escoria, se produce de siderúrgica de alto horno, la cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio.

La ceniza volante es el producto sólido y en estado de fina división, procedente de la combustión de carbón pulverizado de centrales térmicas, que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de ellos, en filtros [7]. Es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio, de color gris o marrón [4].

2.2.2 Preparación de Muestras

Se constituyo el diseño de las dosificaciones, Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Dosificaciones elaboradas para especímenes testigos.

Formula	F1	F2	F3	Formula	F4	F5	F6
Material	(%)	(%)	(%)	Material	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	22.5	25	Caliza +10	20	22.5	25
Caliza +50	30	30	30	Caliza +50	30	30	30
Caliza Fina	10	12.5	15	Caliza Fina	10	12.5	15
Cemento	20	20	20	Cemento	20	20	20
Piedra	20	15	10	Polipropileno	20	15	10
Pómez	2.5(+10) 10(+50) 7.5(fina)	2.5(+10) 10(+50) 2.5(fina)	2.5(+10) 5(+50) 2.5(fina)		100	100	100
	100	100	100				

Tabla 2. Dosificaciones elaboradas para especímenes en por ciento de materias primas.

Fórmula	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
Materiales	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Escoria	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Piedra pómez	20	20	20	15	15	15	10	10	10
Fórmula	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24
Materiales	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Escoria	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Polipropileno	20	20	20	15	15	15	10	10	10
Fórmula	F25	F26	F27	F28	F29	F30	F31	F32	F33
Materiales	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Ceniza volante	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Piedra pómez	20	20	20	15	15	15	10	10	10
Fórmula	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40	F41	F42
Materiales	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Ceniza volante	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Polipropileno	20	20	20	15	15	15	10	10	10

Se elaboraron muestras cilíndricas (0.15m de altura y 0.075m de diámetro) incrustando tres varillas de acero de refuerzo metálicos idénticos formando un triángulo. Se estudiaron dos lotes, uno nombrado acero limpio (se sometió a un cepillado con cerdas metálicas) y otro acero pre oxidado (dos ciclos de inmersión completa en agua y

secado al aire libre, sin limpieza posterior), con el objetivo de inducir actividad corrosiva en un menor periodo de tiempo. Los especímenes se sometieron a tiempo de curado normales a 28 días, una vez cubierto este tiempo fueron expuestos a un medio salino

2.2.3 Mediciones electroquímicas

Para realizar las mediciones de potencial de corrosión, se utilizó el electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, se colocó sobre la superficie del hormigón una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-hormigón. Se tomaron lecturas al momento de su inmersión tanto en el curado normal como en el agua salina, y a los 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días. El análisis de las graficas se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación (tabla 3), de la norma ASTM C876 [9].

Tabla 3. Criterios de potencial de corrosión (norma ASTM C876).

Potencial de corrosión (E _{corr}) Cu/CuSO ₄	Criterio
Más positivos que -200 mV	10% de probabilidad de que no exista corrosión
Entre -200 y -350 mV	Incertidumbre
Más negativo que -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

Se generaron series de tiempo para potencial y corriente, con 1024 registros tomando 1 dato por segundo. Se hizo un análisis estadístico de la series, y se obtuvieron los valores de velocidad de corrosión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3, los especímenes de pómez (acero limpio), en curado normal muestran actividad corrosiva moderada baja, no así con los especímenes de pómez(15%)-caliza(65%) que muestra valores de -0,480V y con una variación pronunciada. En el medio salino los especímenes muestran una variación uniforme en aumento en la actividad

En curado normal las muestras de polipropileno en los porcentajes de 20, al momento de inmersión inician con actividad corrosiva moderada baja y en el transcurso del tiempo de inmersión llega a un valor de $-0,108V$, los especímenes de porcentaje 15, inicia con valores de baja corrosividad y conforme transcurren los días aumenta a moderada alta, el porcentaje de 10, se comporta con variación uniforme de moderada corrosividad.

Al momento de inmersión en medio salino los especímenes (20% y 10%) muestran índices bajos, a excepción del espécimen de 15% de potencial de corrosión moderado alto, en el transcurso del curado muestran corrosividad alta, con variación moderada entre los especímenes.

Las muestras de pomez en relación con las de polipropileno (curado normal) muestran corrosividad baja y las de polipropileno moderada.

En el medio salino muestran ambos tipos de especímenes un corrosividad moderada alta.

Los valores de los especímenes en acero per oxidado de pomez muestran entre si variación en su comportamiento en el curado en agua, la muestra de pomez (20%), inicia con un valor de $-0,497V$ y comportándose de manera irregular en el tiempo de curado, manteniendo una corrosividad moderada. La muestra de porcentaje 15, se comporta sin mucha variación de corrosividad baja, no así llegado a $-0,477v$ en el día 28. La muestra de porcentaje 10, tiene variación de una baja actividad corrosiva al momento de la inmersión y en el día 28 llega a un valor de $-0,555V$.

Al momento de la inmersión en medio salino presentaron diferentes valores, en el transcurso del curado los especímenes muestran una variación uniforme entre sí con actividad corrosiva moderada.

Los especímenes de polipropileno en curado en agua, ingresan con valores de actividad corrosiva moderada, las muestras de polipropileno (20%) disminuyen sus valores de corrosividad, las muestras de polipropileno (15%) obtiene valor alto en pocos días de la inmersión $-0,603V$ y llegando al día 28 con un valor de $-0,447V$, en un porcentaje medio entre las anteriores muestras de polipropileno se presenta la muestra de 10%, con un comportamiento de variación moderado en una baja actividad corrosiva.

Los especímenes muestran un comportamiento variado irregular en el medio salino, las muestras con mayor variación fueron los de polipropileno 10%, mostrando valor máximo de -0,833V, con una corrosividad moderada alta.

Tanto en los especímenes de polipropileno como de pómez en curado normal, aun en acero pre oxidado muestran una actividad corrosiva moderada y en tanto en medio salino una corrosividad alta

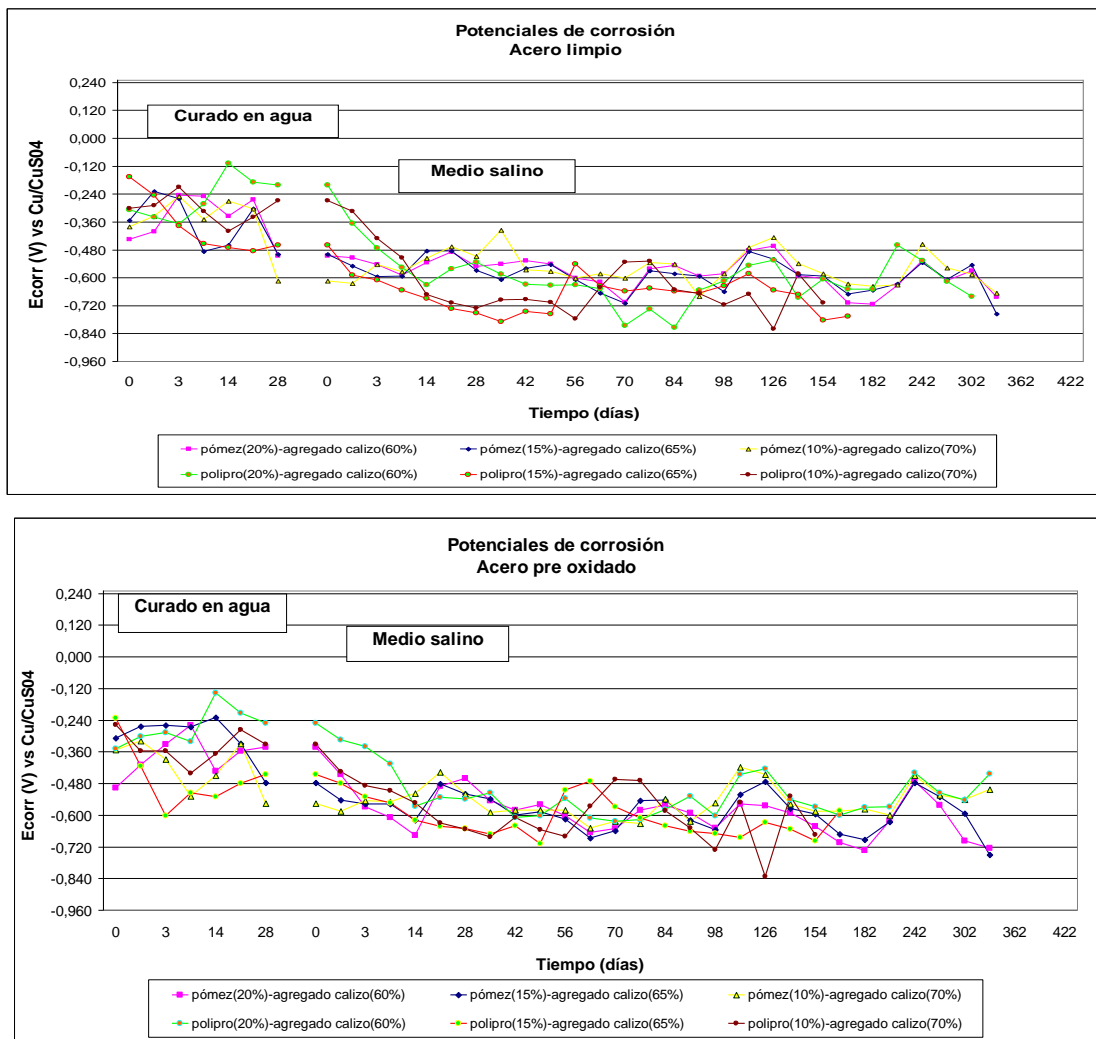
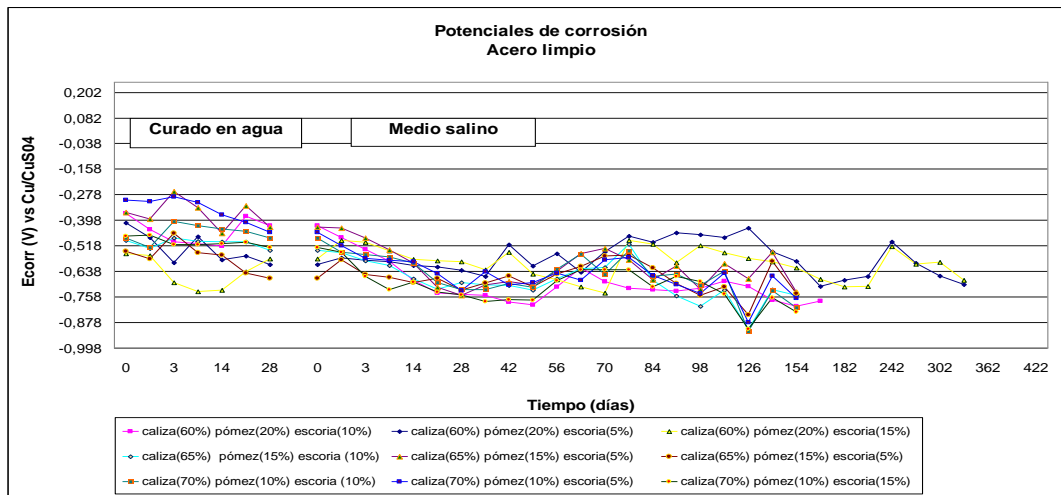


Figura 3. Potenciales de corrosión del espécimen con relación pómez-agregado calizo (testigo).

En la Figura 4. Para el acero limpio, la corrosividad de moderada a alta, no así para caliza (60%) pómez (20%) escoria (15%) que obtiene valores de -0,734V, poca

variación entre especímenes. En el medio salino, corrosividad de moderada a alta, variación uniforme en el día 77, los valores tienden a bajar y a partir de este día se da una pronunciada variación llegando al día 126 con un máximo de -0,920V y un mínimo de -0,433V.

Con variación pronunciada para los especímenes de acero per oxidado, con baja corrosividad al momento de inmersión, caliza(70%) pómez(19%) escoria(5%) con -0,248V el día 21 la muestra de caliza(65%) pómez(15%) escoria (5%) en el día 14 con -0,313V llegando a -0,584V el día 28. Valores de alta corrosividad se presenta caliza(60%) pómez(20%) escoria(10%) al momento de inmersión de -0,470V con un máximo de -0,690V en el día 7, para caliza (60%) pómez(20%) escoria(15%) alta corrosividad obteniendo un valor de -0,785V al día 3 y en disminución al día 28 con -0,597V. Con un comportamiento de moderada corrosividad y poca variación hasta llegar al día 77 en medio salino, con un máximo de -0,860V al día 126, tendiente a moderada corrosividad.



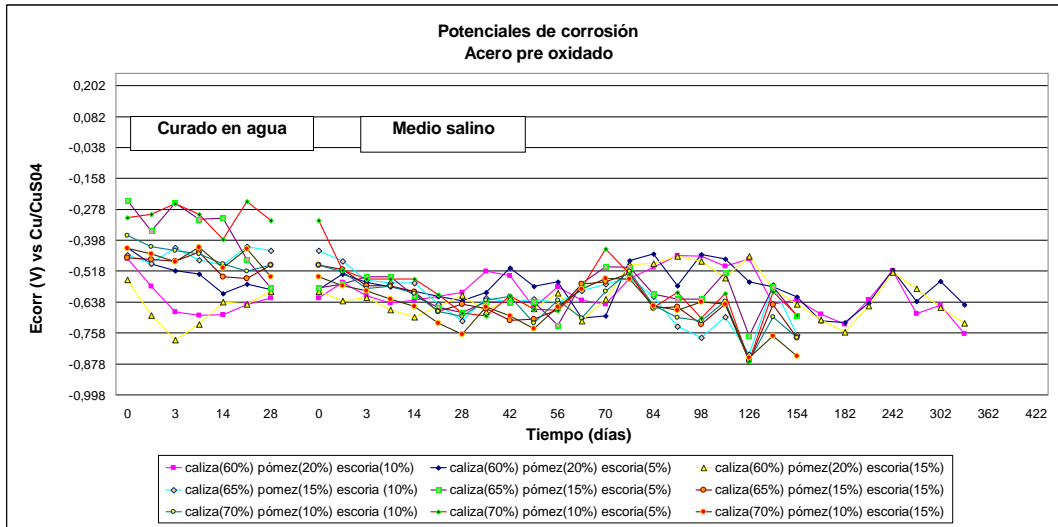
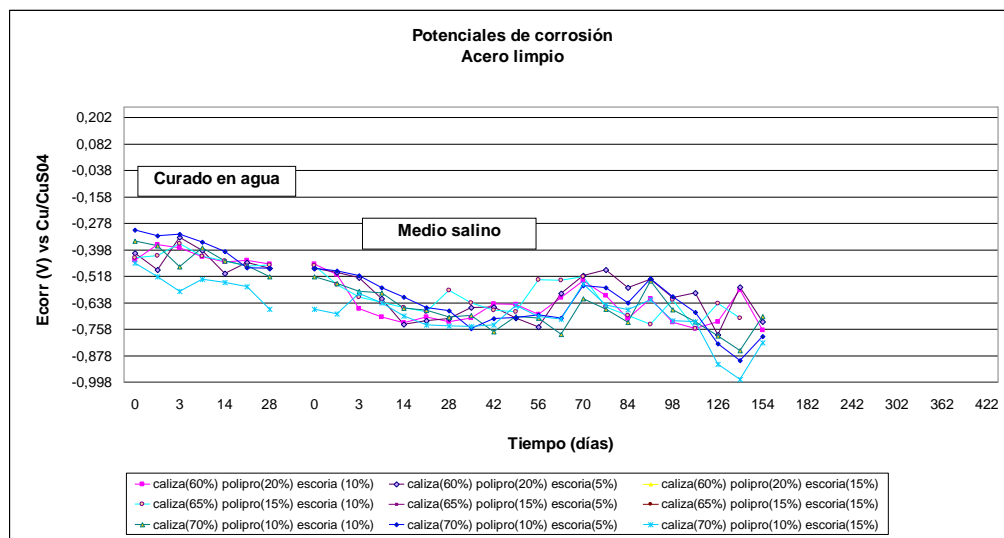


Figura 4. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - pómez -escoria (10, 5, 15%).

En la Figura 5. Los especímenes en acero limpio con variación uniforme entre sí, con actividad de moderada a moderada alta, en caliza (60%) polipropileno-escoria(5%), variación pronunciada con un valor en inmersión de -0,414V y de -0,341V al día 3 y de -0,482V al día 28 y en caliza (70%) polipropileno-escoria(15%) con valores de -0,459V a -0,667V.



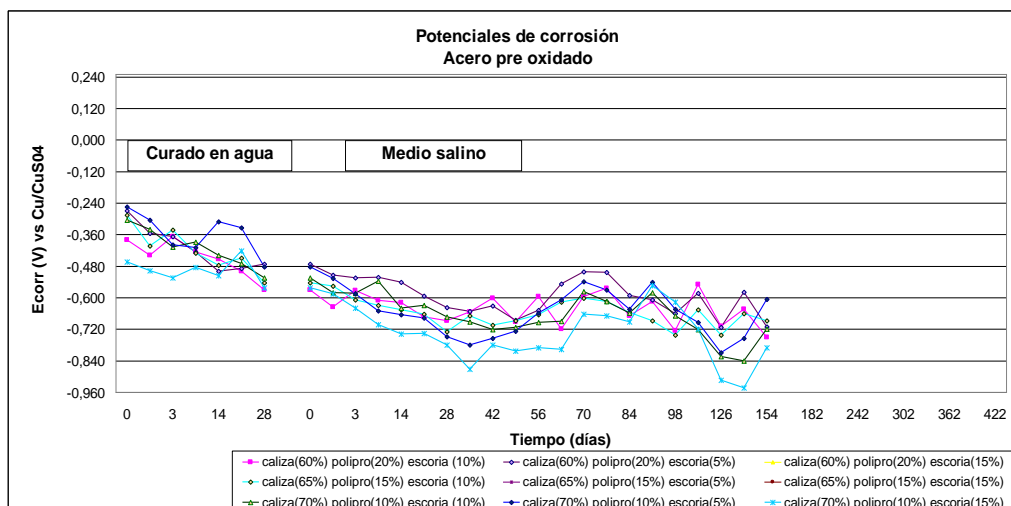


Figura 5. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - polipropileno -escoria (10, 5, 15%).

De variación moderada en medio salino al día 77 en donde se marca una variación de -0,567V a -0,985V en el día 140, actividad corrosiva moderada alta.

Para los especímenes de acero pre oxidado la variación es uniforme de baja a moderada actividad corrosiva, con excepción de caliza(70%) poliprop-escoria(10%), con un valor de -0,253V al momento de inmersión, al día 7 con -0,410V y en caliza(70%) poliprop-escoria (15%) inicia con actividad corrosiva moderada de -0,464V y -0,562V al día 28. Los valores al momento de inmersión al medio salino se encuentran en una actividad corrosiva baja en aumento conforme transcurren los días, variación moderada entre los especímenes llegando a valor de -0,943V

En la Figura 6, en curado normal los especímenes en acero limpio muestran variación pronunciada en las muestras en caliza(60%) en sus tres diferentes porcentajes y mezclas de pómez-ceniza de corrosividad moderada, con valores de -0,351V, -0,378V y -0,417V al momento de inmersión, llegando a un valor de -0,636V al día 3 y al día 28 -0,610V. Se muestra una actividad corrosiva moderada baja.

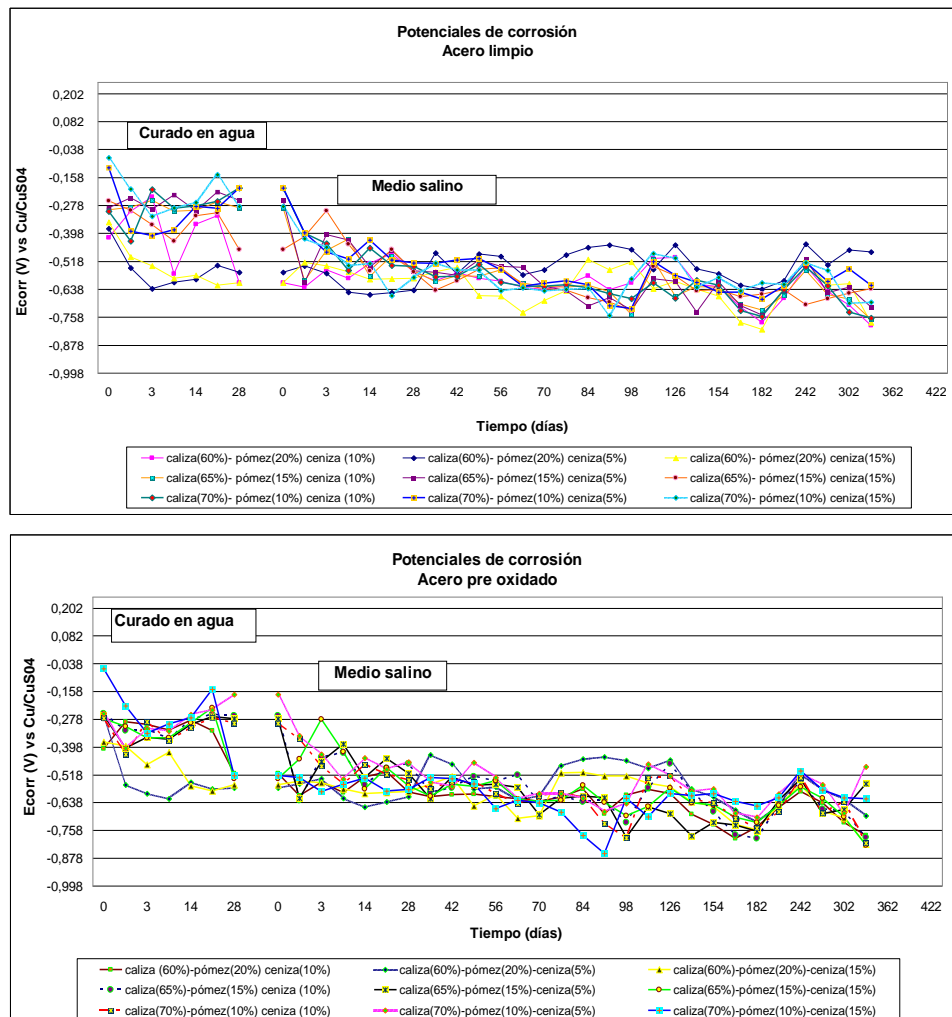


Figura 6. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - pómez - ceniza (10, 5, 15%).

Los especímenes en el medio salino se comportan con variación moderada entre sí, mostrando una actividad corrosiva moderada alta en el transcurso de tiempo de curado con valores de -0,44V a -0,810V.

En similitud con el acero limpio, el comportamiento entre especímenes de acero pre oxidado es de una variación moderada, con excepción de la combinación de caliza (60%)-pómez-ceniza(5%) con valor de inmersión -0,269V llegando al día 7 con -0,621V, de igual comportamiento se encuentra caliza(70%)-pómez-ceniza(15%), con una variación de -0,060V en inmersión, en día 3 -0,339, día 21 -0,150V y día 28 -0,520V,

actividad corrosiva moderada. En medio salino muestran variación moderada entre especímenes en general, llegado el 91 se observa valor de -0,441V en la muestra caliza (60%)-pómez-ceniza(5%) y de -0,858V en caliza .(70%)-pómez-ceniza(5%), actividad corrosiva moderada alta.

La figura 7 muestra las series de tiempo en corriente y potencial para el espécimen pómez-ceniza con refuerzo preoxidado, y se observa baja actividad con una velocidad de corrosión de $3.28E-05$ mm/año.

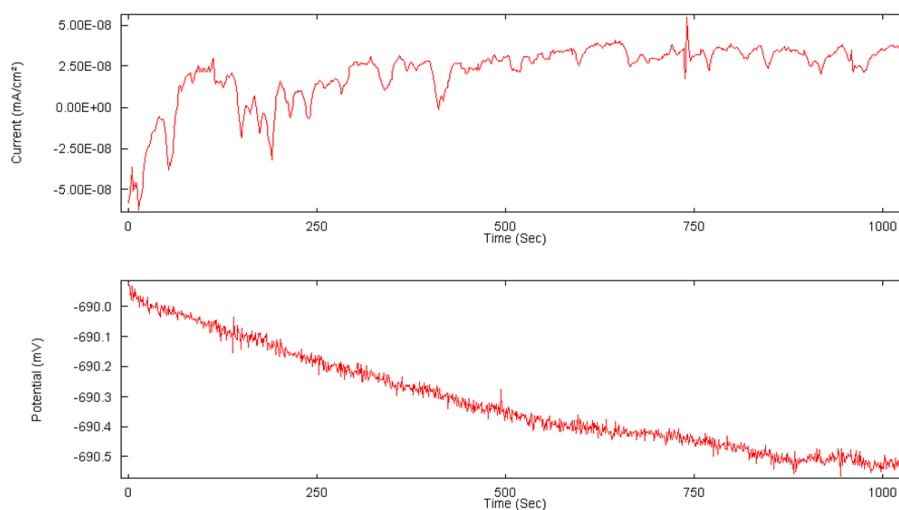


Figura 7. Especímenes elaborados con agregado calizo (60,65,70%) pómez (20,15,10%) –ceniza (10, 5, 15%)

4. CONCLUSIONES

Tras el periodo de curado normal, los especímenes pómez-ceniza muestran potenciales de baja probabilidad de corrosión y/o pasividad para los especímenes con porcentajes bajos de agregado aligerante, tanto para acero limpio como para preoxidado.

En los especímenes elaborados con polipropileno como aligerante, al momento de inmersión en curado normal se tiene baja probabilidad de corrosión, pero conforme pasan los días inicia mayor actividad, alcanzando potenciales que denotan 90% de

probabilidad de corrosión. Estos especímenes en general, desde edades tempranas muestran potenciales de corrosión aún en curado normal, y cuando están inmersos en medio salino tornan con un 90% de probabilidad de que estén sufriendo corrosión activa.

Las mediciones y las series de tiempo de ruido electroquímico han permitido calcular la velocidad de corrosión de los especímenes, y en algunos casos particulares se ha encontrado que es aún baja. Se pretende seguir el monitoreo, complementar el análisis de resultados empleando densidades espectrales, y a largo plazo hacer una inspección microscópica y visual del estado de los refuerzos.

Agradecimiento.

Los autores agradecen el apoyo a la UANL y al proyecto Promep /103.5/12/3385.(UANL-PTC-586).

5. REFERENCIAS

- [1] P. Castro-Borges, M. Castillo, J. Carpio, J. Genescá, P. Helene, W. López, J. Pazini, A. Sanjuán y L. Véleva, *Corrosión en estructuras de concreto armado*, IMCYC, México (2001).
- [2] A. H. Nilson, *Diseño de estructuras de concreto*, Mc. Graw Hill, Colombia, (1999).
- [3] R.E. Núñez, C. Gaona-Tiburcio, J. Uruchurutu, C. P. Barrios, F. Almeraya-Calderón y A. Martínez-Villafañe, *Corrosion Evaluation of Modified Reinforcement Concrete by Electrochemical Noise Techiques, Portugalie Electrochimica*, Acta 23 (2005).
- [4] S. H. Kosmatks, B. Kerkhoff; *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, PCA, (2004).
- [5] A. J. Marulanda, M. Matarija; *Agregados Livianos para Concreto Estructural Ligero*, Sociedad colombiana de Ingenieros, (1979).
- [6] e-Industria. com.
- [7] L. E. S. Valencia, R. S. Correa, *Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (Termopaipa IV) y agua constante*, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, No. 14, 14-19, (Nov. 2004).

- [8] O. Trocónis, L: Uller, I. Alanis, P. Helene, R. Mejías, U. O'reilly, C. Andrade, J. Carpio, I. Díaz, M. Salta. G. Rodríguez, A. Romero y A. Sagues., *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, DURAR, (1997).
- [9] A.M. Neville, *Tecnología del Concreto*, IMCYC, México (1999).

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO RECUBIERTO DE RESINA DE ESTIRENO LÍQUIDA EXPUESTO EN UN MEDIO AMBIENTE NATURAL (CIUDAD DE MÉXICO).

Chávez Ulloa E.¹ Pérez López T.² Sosa Baz Miguel R.² Camacho Chab R. de J.³

¹ Secretaria de la Defensa Nacional, Calz. Mex.-Tac s/n Del. Miguel Hidalgo, México. D. F.

² Universidad Autónoma de Campeche, CICORR Av. Agustín Melgar s/n Col. Buenavista C.P. 24039. San Francisco de Campeche, Camp.

³ Instituto Tecnológico de Campeche, Carretera Campeche-Escárcega, Km 9, Lerma, Camp.

RESUMEN

El trabajo que se presenta, consiste en la exposición de muestras de concreto armado recubierta con una resina de estireno líquida expuesto en un medio ambiente natural como el de la Ciudad de México, a fin de evaluar el proceso de corrosión mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Se llevó a cabo el análisis de datos, utilizando la técnica EIS y se llevó a cabo una comparación con muestras recubiertas de resina y con muestras recubiertas de pintura anticorrosiva.

En un año de exposición, los resultados muestran que las probetas de concreto recubiertas con la resina de estireno líquido, mantienen un avance más lento del proceso de oxidación de las barras de acero en comparación con las muestras recubiertas con pintura anticorrosiva.

PALABRAS CLAVES: Concreto, Resina, Estireno, Carbonatación, Corrosión.

ABSTRACT

The work presented here, involves the exposure of concrete specimens reinforced with steel coated with a styrene resin liquid to a natural environment as the México City, to evaluate corrosion process using the technique of Spectroscopy Electrochemical Impedance (EIS).

Was carried out data analysis, using the EIS technique and took out a comparison with specimens coated with resin and coated with anticorrosive paint samples.

At one year of exposure, the results show that the concrete specimens containing steel coated with the liquid styrene resin, maintaining a slower process in the oxidation process of the steel bars in comparison with concrete specimens containing reinforcing steel with anticorrosive paint.

KEYWORDS: Corrosion, Concrete, Styrene, Resin, Carbonation.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un proceso que ocurre en fase acuosa en el concreto con acero de refuerzo, este fenómeno se observa con frecuencia en concretos de baja calidad.

El daño por corrosión en la estructuras de concreto reforzado ocurre por la ruptura de capa pasiva provocada por el ingreso de CO_2 y de iones cloruro a través de la estructura porosa del concreto ⁽¹⁾.

Cabe mencionar que además de la porosidad inherente del concreto, existen fenómenos físicos como el daño por congelamiento y reacciones químicas, álcali-agregado y ataque por sulfatos que pueden producir agrietamiento en el concreto aumentando así su permeabilidad a los agentes nocivos los cuales rompen la capa pasiva formada en la superficie del acero de acuerdo a diversos mecanismos ⁽²⁻³⁾.

Para evaluar los daños ocasionados por la corrosión existen diversas técnicas electroquímicas de medición que proporcionan esta información, la utilizada en este trabajo es:

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE).

Es una técnica que se basa en el uso de una señal de corriente alterna que es aplicada a un electrodo obteniendo una respuesta correspondiente. El procedimiento más comúnmente empleado es aplicar una pequeña señal de potencial a un electrodo y se mide su respuesta en corriente a diferentes frecuencias. El equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial-tiempo y corriente-tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada, a esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias” ⁽²⁻³⁾.

Por otra parte, la resina de estireno líquida formulada a partir de reciclado de unicele y estirenos posee una alta resistencia a la tracción, se adhiere a la mayoría de los materiales de construcción con superficie porosa. Proporciona reparaciones duraderas, posee excelente resistencia a la compresión, abrasión o al desgaste, así como gran resistencia al intemperismo, salitre, humedad, hongos, etc.

La resina se recomienda como recubrimiento para protección contra humedad para madera, cartón, papel, cerámica, asbesto, metal oxidado, barro, concretos, aplanados, y diferentes materiales de construcción de consistencia porosa ya que crea una delgada película plástica que impermeabiliza contra la humedad, teniendo un terminado brillante.

Su aplicación es sencilla ya que puede realizarse con una brocha, rodillo o inmersión.

En este trabajo se observa el comportamiento de la resina de estireno líquida al emplearla como recubrimiento del acero de refuerzo embebido en el concreto así mismo se efectúa un comparativo contra la pintura anticorrosiva.

Materiales y Métodos.

Se utilizaron materiales de construcción de la región, conocidos como grava (agregado grueso) y arena (agregado fino) previamente lavada, proveniente de un banco de materiales de Tlanepantla, Edo. de Méx. Se empleó cemento Portland Tipo I, de marca comercial.

Para la caracterización de agregados se realizaron las siguientes pruebas: absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría. Se realizaron de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas NMX-C 111⁽⁴⁾.

Para el concreto, a los de 28 días de curado, se midieron los siguientes parámetros: contenido de aire en el concreto fresco compactado (normas NMX-C 157⁽⁵⁾ y ASTM C 231⁽⁶⁾). La absorción y vacíos de acuerdo a la norma ASTM C 642. ⁽⁷⁾; resistencia a la compresión (normas NMX-C 83⁽⁸⁾, NMX-C 159⁽⁹⁾, ASTM C 39⁽¹⁰⁾ y ASTM C 192⁽¹¹⁾).

El proporcionamiento de la mezcla, se realizó siguiendo las recomendaciones establecidas por las Normas NMX-C 159⁽⁹⁾ ACI -211⁽¹²⁾ y ASTM C 1017⁽¹³⁾.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se elaboraron 3 cilindros de concreto simple de 15 cm de altura y 7.5 cm de diámetro para los ensayos de carbonatación y 6 cilindros de concreto con acero de refuerzo con las mismas dimensiones y relación $a/c = 0.5$ (3 con acero de refuerzo recubiertas de resina de estireno líquida y 3 con acero de refuerzo recubiertas de pintura anticorrosiva, cabe mencionar, que se dejó sin recubrimiento una longitud de 5 cm al centro de la barra para su libre exposición). Previo al cálculo de las proporciones empleadas, se realizaron en los agregados pruebas de absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas NMX C-111⁽⁴⁾. La relación a/c empleada para la elaboración de la mezcla, se eligió considerando las características de absorción que presentó el agregado grueso.

El acero de refuerzo que se empleó para construir los cilindros fue de 3/8" de diámetro y una longitud de 20 cm. colocadas como se muestran en la figura 1:

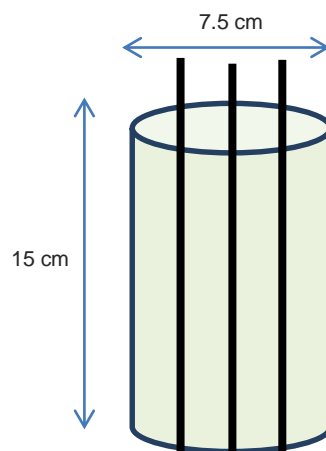


Figura 1 Distribución de las varillas en los cilindros de concreto.

Exposición al Medio Ambiente.

Fueron expuestos al medio ambiente natural de la Ciudad de México (Poptla, D.F.) 3 cilindros de concreto simple de 15 cm de altura y 7.5 cm de diámetro y 6 cilindros de concreto con acero de refuerzo de las mismas dimensiones con relaciones $a/c = 0.5$ (3 con acero de refuerzo recubiertas de resina de estireno líquida y 3 con acero de refuerzo recubiertas de pintura anticorrosiva)

Determinación del Frente de Carbonatación.

Para determinar el avance del frente de carbonatación en el concreto se utilizaron cilindros de concreto simple (15 x 7.5 cm), las cuales fueron expuestas en el medio ambiente natural. Por medio del método de vía húmeda basado en indicadores ácido-base se obtuvo el avance del frente de carbonatación.

Ensayos Electroquímicos.

Con un potenciostato de marca comercial, se hicieron barridos de EIE en un intervalo desde 0.001 a 100 kilohertz. Con una amplitud de onda de 10 mV. Se registró el potencial de media celda (Ecorr) en la misma medición. Las mediciones fueron complementadas con un potenciostato de campo, de marca comercial que registró Ecorr, velocidad de corrosión (icor) y resistividad del concreto (ρ).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Propiedades Físicas:

La Tabla 1 muestra los valores de las propiedades de los concretos después de 28 días para cada relación a/c ensayada. Así mismo, por los valores de contenido de aire, absorción y porosidad, se considera que el concreto presentará una baja permeabilidad a los agentes externos como humedad y gases.

TABLA 1 Propiedades del concreto con relación a/c 0.5 a 28 días.

MEZCLA	Relación $a/c = 0.5$			
	Resistencia $f'c$ (kg/cm ²)	Contenido de aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)
1	306	2.0	3.0	15.1
2	315	2.2	3.5	11.0
3	322	2.5	3.8	17.5
Promedio	314	2.2	3.4	14.5

Condiciones Micro-ambientales.

Las Figuras 2 y 3, muestran los registros de temperatura y humedad relativa durante el periodo Enero 2012- Marzo 2013, proporcionados por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional/ Comisión Nacional del Agua de la Ciudad de México. Los datos indican valores promedio de temperatura y humedad relativa respectivamente. Por otra parte, las Figuras 4 y 5, muestran los valores de precipitación pluvial y velocidad de viento promedio durante el mismo periodo reportado.

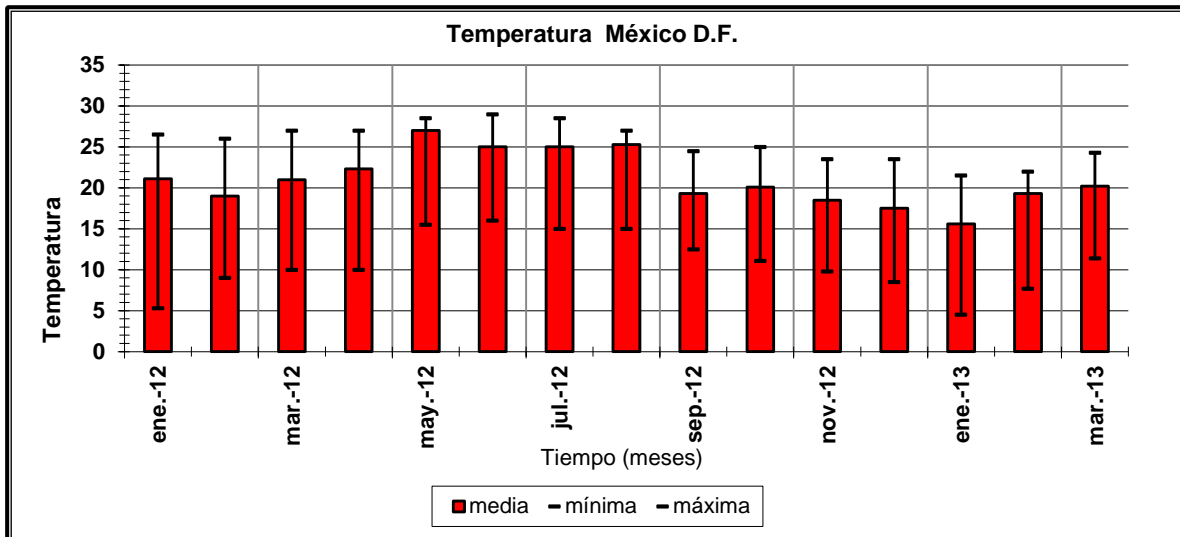


Figura 2 Gráfica de la temperatura registrada en la zona de la delegación Miguel Hidalgo de la Ciudad de México periodo Ene 2012- Mar 2013. Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua del Servicio Meteorológico Nacional.

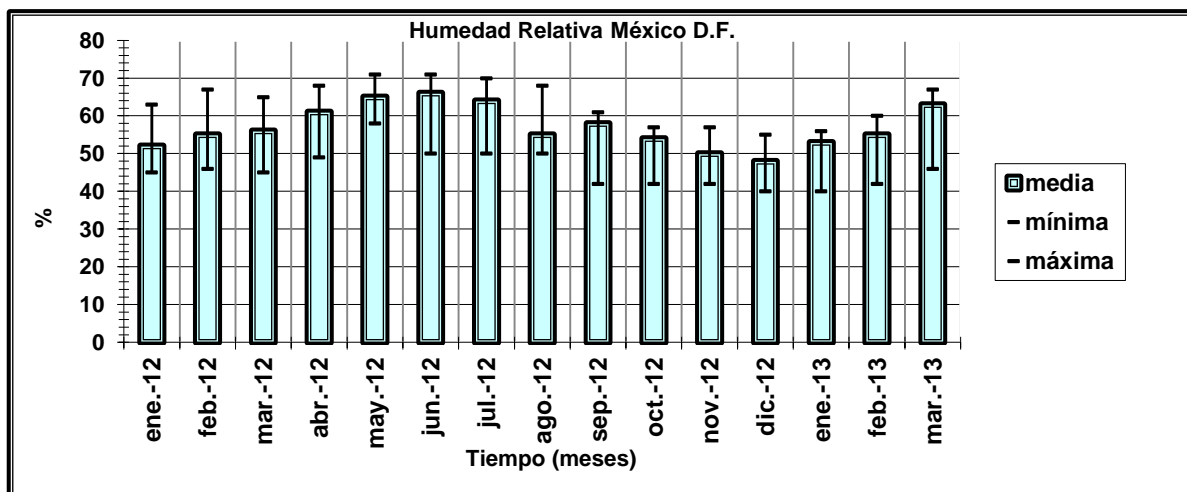


Figura 3 Gráfica de la Humedad Relativa registrada en la zona de la delegación Miguel Hidalgo de la Ciudad de México periodo Ene 2012- Mar 2013. Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua del Servicio Meteorológico Nacional.

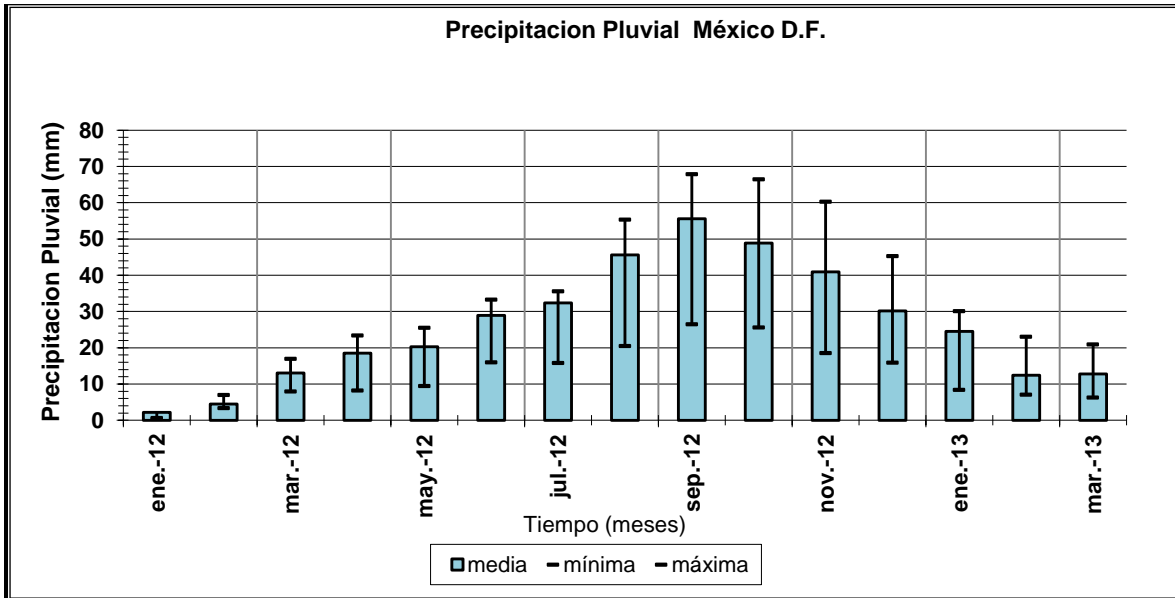


Figura 4 Gráfica de la Precipitación Pluvial registrada en la zona de la delegación Miguel Hidalgo de la Ciudad de México periodo Ene 2012- Mar 2013. Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua del Servicio Meteorológico Nacional.

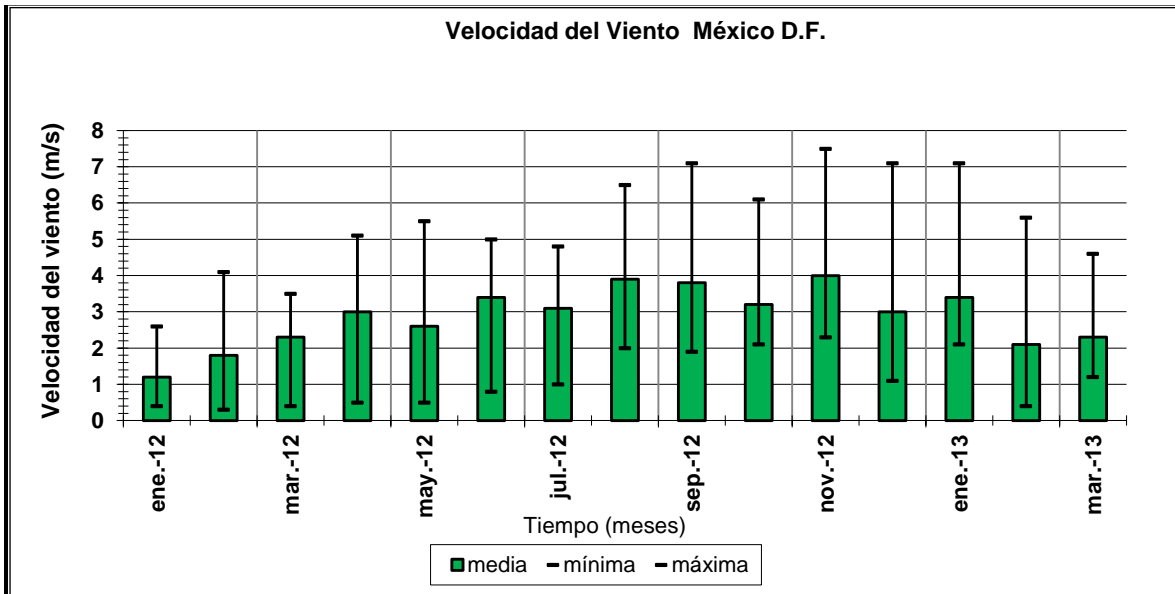


Figura 5 Gráfica de la Velocidad de Viento registrada en la zona de la delegación Miguel Hidalgo de la Ciudad de México periodo Ene 2012- Mar 2013. Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua del Servicio Meteorológico Nacional.

Carbonatación.

El avance de carbonatación que se aprecia en los cilindros expuestos al medio natural es consecuencia de su interacción con el viento. En los cortes efectuados se aprecia una progresión uniforme del frente de carbonatación en los 3 cilindros probablemente debido a los constantes cambios de dirección del viento durante el periodo observado, donde el agua contenida en los poros es retirada por el establecimiento del equilibrio con la humedad relativa atmosférica y su posterior transporte durante el movimiento del viento, originando un secado en la cercanía de la superficie ⁽¹⁴⁾ (ver Figura 6).

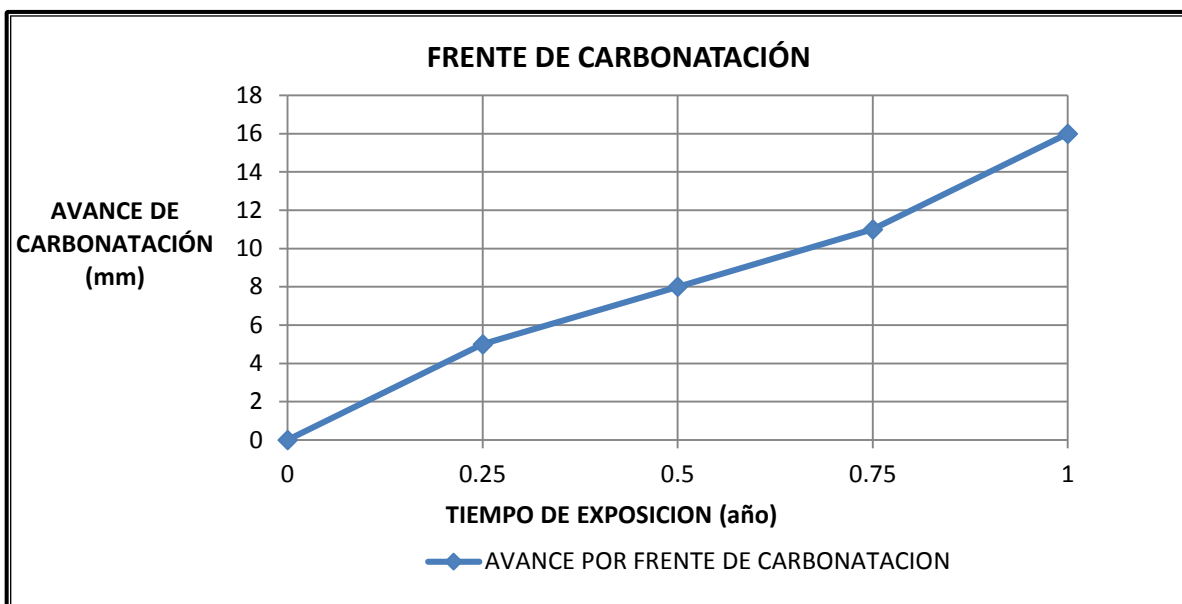


Figura 6 Gráfica del avance por frente de carbonatación que presentan las probetas de concreto durante el periodo Mar. 2012- 2013.

Se puede observar, que el avance del frente por carbonatación en el concreto fue más acelerado al principio y al final, esto puede ser debido a los índices de humedad relativa que se presentaron durante el periodo de exposición de los cilindros de concreto coincidiendo con la temporada de estiaje, así mismo, se puede apreciar en una fase intermedia, una reducción en el avance, debido a la temporada de lluvias (en el gráfico se aprecia un incremento importante al final del periodo de exposición).

Ensayes Electroquímicos:

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE).

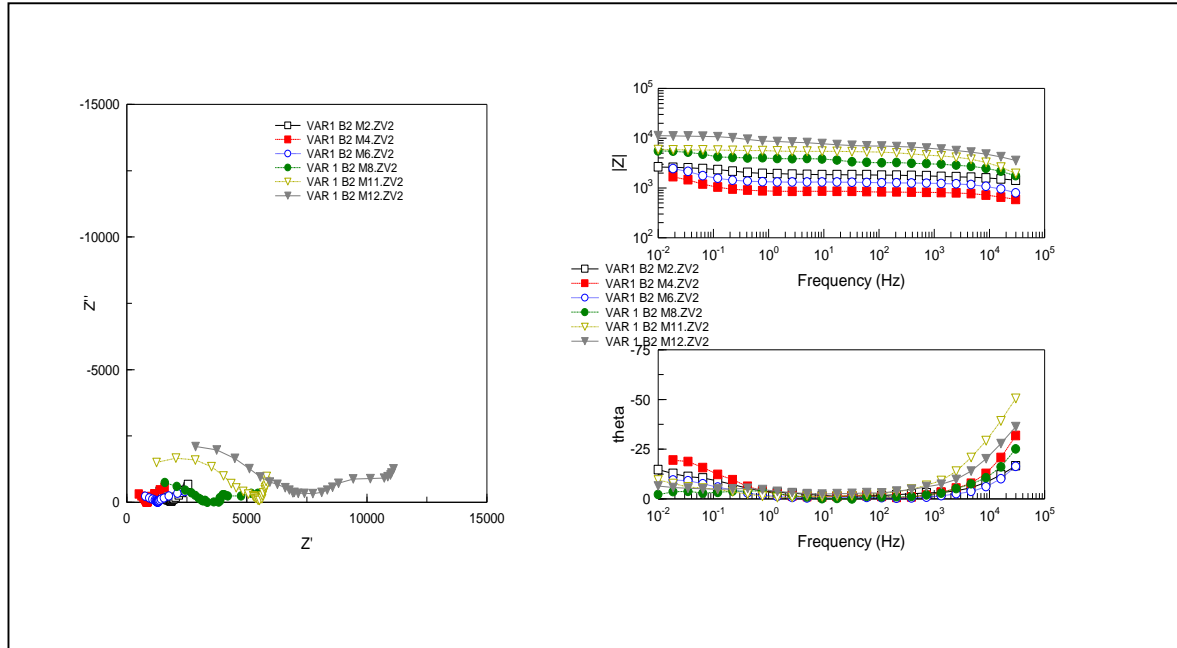


Figura 7 Gráfica de Nyquist y de Bode de probetas con acero de refuerzo recubiertas de pintura anticorrosiva.

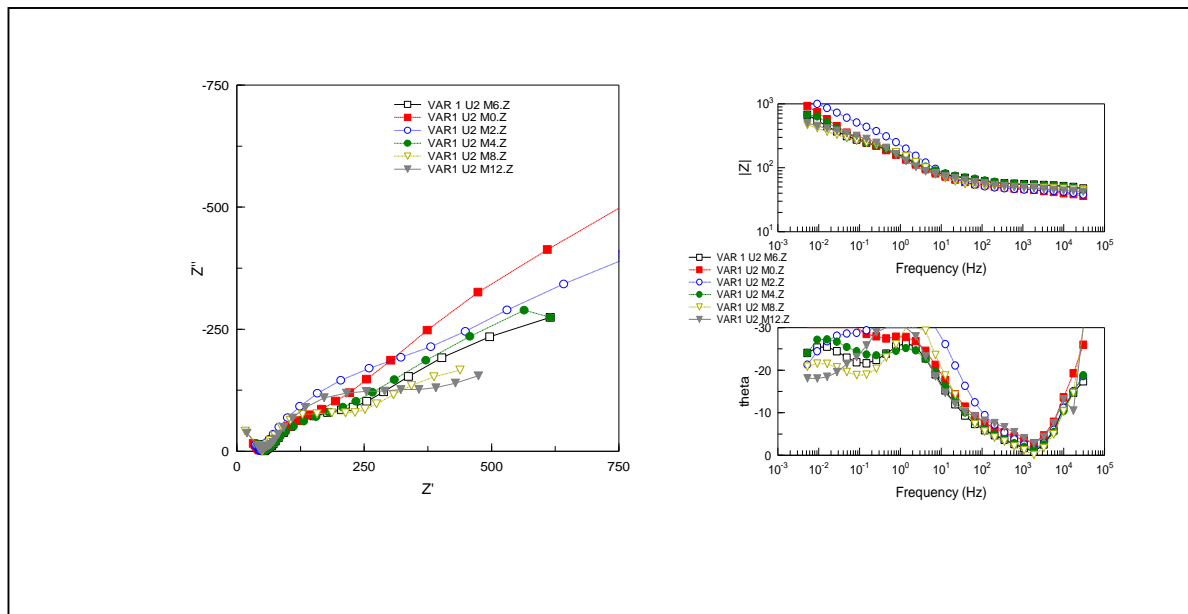


Figura 8 Gráfica de Nyquist y de Bode de probetas con acero de refuerzo recubiertas de resina de estireno líquida.

De la Figura 7 se muestra la información obtenida de la aplicación de la técnica EIE en probetas de concreto con acero de refuerzo recubiertas con pintura anticorrosiva a un año de exposición a la atmósfera, se puede observar que en el gráfico de Nyquist predomina una tendencia hacia el cierre de semicírculo indicio de una activación del proceso de corrosión en el acero de refuerzo. En el diagrama de bode-ángulo de fase se exhiben valores cercanos a 0° prueba de que en la interfase acero-concreto existe una activación del proceso de corrosión.

De la Figura 8 de igual forma se muestran valores obtenidos de la aplicación de la técnica EIE en probetas de concreto con acero de refuerzo recubiertas de resina de estireno líquida a un año de exposición en la atmósfera, se observa en el gráfico de Nyquist la pasivación del acero de refuerzo. En los diagramas de bode-ángulo de fase, se exponen valores cercanos a -20° , lo cual indica que se exhibe un estado pasivo del acero de refuerzo. Los valores de las mediciones indican una varilla en estado pasivo, lo que implicaría que el recubrimiento funciona mejor que la pintura anticorrosiva.

Con el objeto de obtener mayor información acerca del comportamiento del material empleado, se empleó un potenciostato Gcorr para obtener mediciones electroquímicas, obteniendo el siguiente comparativo:

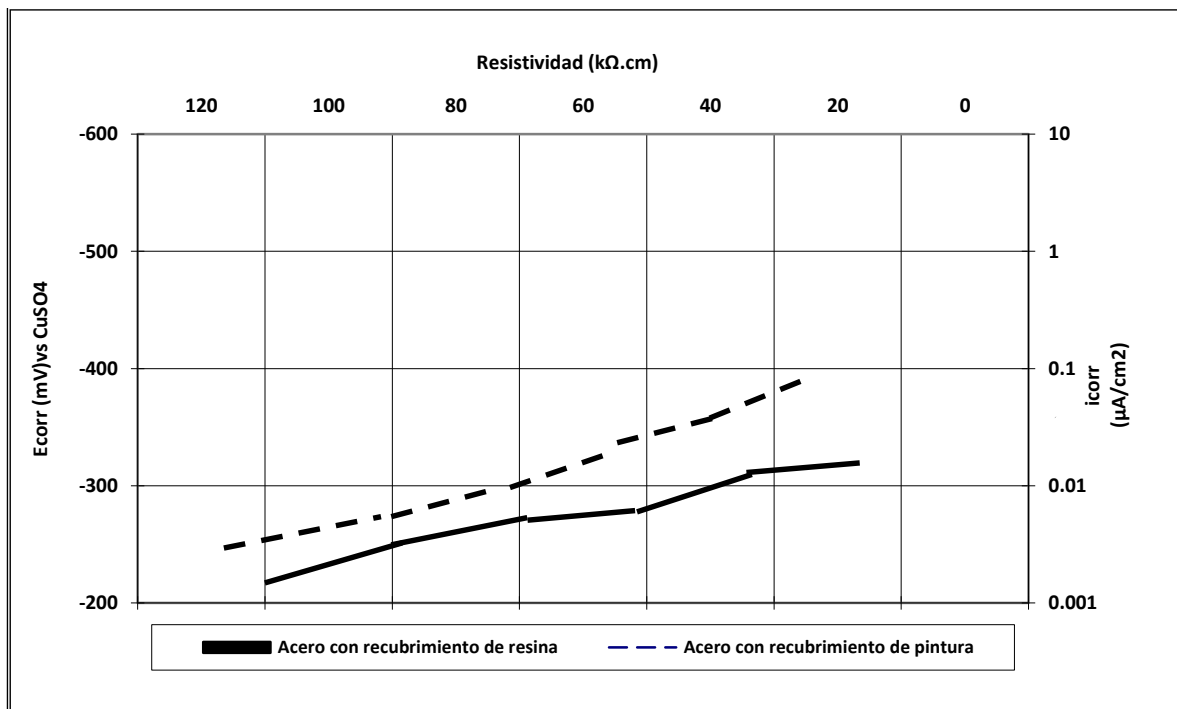


Figura 9 Gráfica comparativa de Ecorr, icorr y resistividad de los materiales empleados.

De la Figura 9 podemos observar que la probeta con acero de refuerzo recubierta de resina de estireno líquida presenta una menor velocidad de corrosión (i_{corr}) en comparación con la probeta con acero de refuerzo recubierta de pintura anticorrosiva, así mismo, se advierte que cuando va incrementando la i_{corr} el potencial de corrosión toma valores superiores a los -400 mv vs ECS y la resistividad disminuye a valores cercanos a 20 k Ω .cm, confirmando que la resistividad del concreto con la humedad relativa del medio ambiente son parámetros fundamentales para la activación del proceso de corrosión.

Otro de los aspectos que se pueden percibir es el avance más dinámico del i_{corr} al principio del proceso coincidiendo con los periodos de mayor avance del frente de carbonatación.

CONCLUSIONES

A partir de los ensayos electroquímicos y realizando una comparación en el desempeño entre ambos materiales objeto de este estudio, se observa que en los registros electroquímicos realizados con el G_{corr} las probetas de concreto con acero de refuerzo recubierta de resina de estireno líquida presentan un estado pasivo, muy probablemente debido a la resistencia de la capa de resina de estireno en la interfase acero-concreto.

El proceso de carbonatación fue un factor fundamental para el deterioro de las probetas de concreto, ya que propicia el entorno adecuado para la activación del acero de refuerzo.

A un año de exposición, la resina de estireno líquida proporciona una mejor protección al acero de refuerzo embebido en el concreto que la pintura anticorrosiva.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fué posible gracias al apoyo del Fondo Nacional de Ciencia Básica SEP-CONACyT a través del proyecto: “Estudio del proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto empleando un recubrimiento tipo polimérico expuesto en un medio ambiente como el Valle de México”, clave CB-2011-00000000169092.

REFERENCIAS

- 1) Thiery, M., Dangla, P., Villain, G., Platret, G.: "A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂-H₂O-ions transfers and chemical reactions", 10DBMC International Conférence On Durability of Building Materials and Components, TT1-58. LYON [France] 17-20 April 2005.
- 2) Trocónis de Rincón O. et al., 2007, Corrosion Science DURACON.
- 3) Juan Genescá LLongueras "Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión". Ciudad universitaria 2002.
- 4) NMX-C 111.- Concreto.- Agregados para concreto hidráulico, 1983.
- 5) NMX-C 157.- Determinación del contenido de aire del concreto, 1983.
- 6) ASTM C 231- Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.- EUA. 1999.
- 7) ASTM C 642.- Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1994.
- 8) NMX- C 83 - Concreto-Resistencia a la compresión, 1983.
- 9) NMX- C159.- Concreto – Elaboración y curado en el laboratorio, 1983.
- 10) ASTM C 39 / C 39M.- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens .- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2001.
- 11) ASTM C 192 / C 192M.- Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.- American Society for Testing and Materials.-EUA.- 2000.
- 12) ACI – 211 1-91 Standard practice for selecting proportion for normal heavyweight and mass concrete, ACI International Farmington Hills, MI. 1997
- 13) ASTM C 1017 / C 1017M.- Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete.- American Society for Testing and Materials- EUA.- 1998.
- 14) E. Chávez Ulloa. "Análisis del proceso de corrosión del concreto reforzado elaborado con agregados calizos expuesto en un medio natural y cámara de carbonatación acelerada" Tesis doctoral, CICORR, UACAM. 2010.

CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN MORTERO MODIFICADO CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Y NANO-SÍLICE.

C.P. Barrios-Durstewitz¹, J.M. Pellegrini¹, R.E. Nuñez-Jaquez¹, F. Almeraya-Calderón², C. Gaona-Tiburcio², A. Martínez-Villñafañe³

1. Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente de Poseidon y Prol. Angel Flores S/N, Ciudad Universitaria, Los Mochis, Sin. México.
2. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, FIME, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA, Carretera a Salinas Victoria Km. 2.3. Apocada. Aeropuerto Internacional del Norte. 66600. Apodaca, Nuevo León. México
3. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV), Integridad y Diseño de Materiales Compuestos/Corrosión, Miguel de Cervantes 120, Chihuahua, México

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la cinética de corrosión, mediante las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal y ruido electroquímico, del acero embebido en un mortero con sustituciones de cemento por ceniza de cascarilla de arroz (0,1 ,5, 10, 15%) y nano-sílice (0.5%) y compararlo con un mortero en el cual únicamente se sustituye cemento por ceniza de cascarilla de arroz e inmersos en una solución NaCl 5% y Na₂SO₄ 5% en peso por un periodo de 60 días.

Palabras clave: Acero, Corrosión, mortero, ceniza de cascarilla de arroz, partículas de nanosilice, RPL, ruido electroquímico.

ABSTRACT

In this work the kinetics of corrosion is evaluated by electrochemical techniques linear polarization resistance and electrochemical noise, embedded in a mortar with cement replacements by rice husk ash (0.1, 5, 10 steel 15%) and nano-silica (0.5%) and compared with a mortar in which only the cement is replaced with rice husk ash and immersed in a NaCl solution 5% Na₂SO₄ 5 weight% over a period of 60 days.

Keywords: Steel, corrosion, mortar, rice husk ash, nano-silica particles, LPR, electrochemical noise.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la resistencia del concreto reforzado, al estar expuesto a ambientes que llevan al deterioro, se provoca una disminución de su vida útil¹. El acero de refuerzo puede ser afectado debido a iones agresivos contenidos o transportados por la solución de poro del concreto hasta la superficie del refuerzo². Un factor determinante en el tiempo de llegada de los iones al refuerzo es su movilidad, además de la permeabilidad y resistividad eléctrica del concreto^{3,4,5}. Éstas últimas dependen a su vez de las propiedades químicas y la estructura de la solución de poro⁶. La causa principal en la degradación del concreto reforzado es la penetración del agua, esta penetra por la red de poros y sirve como medio de conducción para las sustancias nocivas, lo cual define la durabilidad del concreto⁷. Por lo tanto, la durabilidad es una consecuencia directa del estado de la estructura de poro de un concreto (porosidad y distribución del tamaño de poro)⁸.

Con la intención de proveer durabilidad al concreto reforzado, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas, de las cuales destacan: cenizas volantes, cenizas de alto horno, cenizas de bagazo de caña, ceniza de cascarilla de arroz (CCA), entre otras.

Las sustituciones de cemento en el concreto por cenizas, además de mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y microestructurales, disminuye la velocidad de corrosión del refuerzo en ambientes nocivos, contribuyendo al aumento de la durabilidad del concreto. El estudio de las sustituciones o adiciones realizadas en el concreto con cenizas en combinación con NP se ha enfocado a las propiedades mecánicas, físicas y microestructurales, predominando las investigaciones de ceniza volante con diversas NP para esta combinación de adiciones. Las propiedades del concreto son mejoradas con el efecto sinérgico que ejerce la combinación de cenizas y NP al realizar sustituciones del cemento en morteros y concretos.

La sustitución o adición individual de cenizas en los concretos beneficia la cinética de la corrosión, ya que hasta un cierto porcentaje de sustitución del cemento (sustitución límite óptima) disminuye la porosidad de la matriz, aumentando la red de poros si se sobrepasa este porcentaje. El hecho de sustituir o adicionar al cemento con NOS en conjunto de CCA para mejorar la resistencia del concreto reforzado a ambientes corrosivos, de existir tal mejora, sus posibles causas y beneficios será el objetivo principal de esta investigación

El objetivo del presente trabajo es evaluar la cinética de corrosión del acero embebido en un mortero con sustituciones de cemento por ceniza de cascarilla de arroz (0, 1, 5, 10, 15%) y nano-sílice (0.5%) y compararlo con un mortero en el cual únicamente se sustituye cemento por ceniza de cascarilla de arroz e inmersos en una solución NaCl 5% y Na₂SO₄ 5% en peso, mediante las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal y ruido electroquímico.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales.

Para la fabricación de los especímenes de mortero se utilizó cemento portland ordinario (CPO) suministrado por la empresa Grupo Cementos de Chihuahua, Ceniza de cascarilla de arroz (CCA) la cual se obtuvo a partir de residuos industriales de Odisha, India, sometido a un proceso de molienda y tamizado en un tamiz de malla 325, las nano-partículas de sílice (NS) utilizadas se obtuvieron de forma comercial, agua destilada y super-plastificante (SP). Las propiedades físicas de materiales de se presentan en la **Tabla 1** y las propiedades químicas del cemento se presentan en la **Tabla 2**. El agregado fino empleado tiene un módulo de finura de 2,68, con una densidad de masa de 2.645 kg/m³ y una absorción de 4,1%, de acuerdo a la norma ASTM C 33-03⁹.

Tabla 1. Propiedades físicas de los materiales.

Propiedad	CPO	CCA	nSO
Densidad aparente (kg/m ³)	3,071	2,251	-
Área superficial (m ² /g)	20.23	23.82	777.7
Tamaño promedio de partículas (μm)	27.61	29.88	0.015

Tabla 2. Componentes químicos de los materiales en por ciento.

Óxido	CPO	CCA	NS
SiO ₂	20.046	84.375	71.451
SO ₃	2.589	0.080	-
Fe ₂ O ₃	1.976	0.309	-
Al ₂ O ₃	0.294	0.235	N.D.*

*No se detecto

Dosificación de la mezcla de mortero.

Todas con relación agua/cemento de 0.55, relación arena/cemento 2.75 y porcentajes de CCA y NS respecto al peso del cemento según tabla 3.

Tabla 3. Proporción de materiales para mezcla.

Nomenclatura	CPO	CCA	NS
100	100	-	-
99.5	99.5	-	0.5
99	99	1.0	-
95	95	5.0	-
94.5	94.5	5.0	0.5
90	90	10.0	-
89.5	89.5	10.0	0.5
85	85	15.0	-
84.5	84.5	15.0	0.5

Preparación de muestras cilíndricas

El mezclado se realizó mecánicamente en mezcladora de tres velocidades de dimensiones según norma ASTM C305, utilizando superplastificante en diversas proporciones hasta lograr trabajabilidad de las mezclas según norma ASTM-1437, garantizando que la fluidez estuviera en un intervalo de 110 ± 30 %. Se realizó vibrado de las mezclas. La NS se diluyó en el agua destilada antes de la realización de la mezcla y en el caso del uso CCA esta se mezcló en seco con el cemento antes la realización mezclado húmedo hasta lograr una consistencia uniforme. Las probetas fueron fabricadas por triplicado. En la figura 1 se muestran las probetas y sus dimensiones utilizadas en el presente trabajo. El curado se realizó por inmersión en agua destilada durante 28 días.

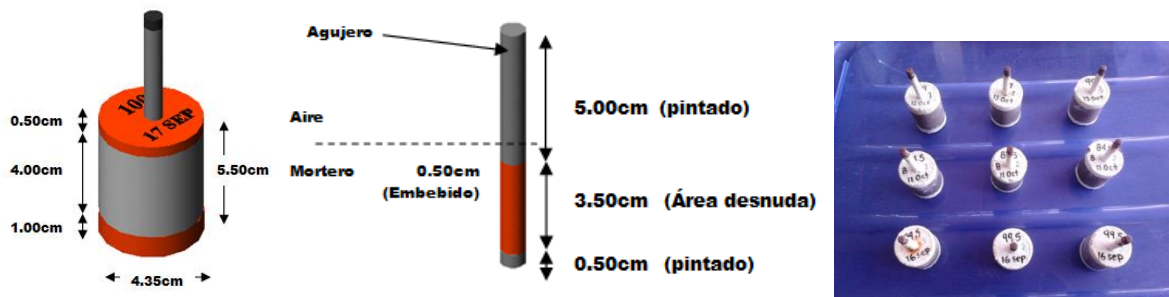


Figura 1.- Geometría de probetas.

Medio de exposición.

Después de los 28 días de curado por inmersión en agua destilada se extrajeron las muestras cilíndricas y se expusieron por inmersión en una solución de sulfato de sodio al 5% y cloruro de sodio al 5% en peso por un periodo de 60 días.

Pruebas electroquímicas.

La determinación de la velocidad de corrosión se realizó por medio de dos técnicas electroquímicas que son Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Ruido Electroquímico (RE). Para llevar a cabo las técnicas se utilizó un equipo Potenciostato-Galvanostato Field Machine 100kHz de un canal, marca ACM Instruments. La celda consistió en un arreglo de tres electrodos, en donde el electrodo de trabajo fue la varilla de acero de refuerzo inmersa en el mismo cilindro de mortero, como contra electrodo una malla de acero inoxidable y un electrodo de calomel como referencia (figura 2).

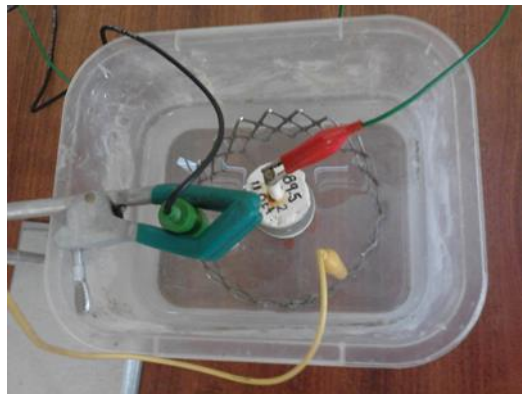


Figura 2.- Celda electroquímica empleada para la determinación de los parámetros cinéticos.

Los parámetros para determinación de la RPL fueron: barrido de polarización de $\pm 20\text{mV}$ a partir del potencial de corrosión (E_{corr}) con una velocidad de barrido de $10\text{mV}/\text{min}$. El cálculo de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se obtuvo a partir de la resistencia de polarización (R_p) mediante la ecuación de Stern and Geary, considerando una constante $B=26\text{mV}$.

Para el caso del ruido electroquímico se midieron las variaciones de potencial y corriente en el tiempo con un tamaño de muestra de 1024 lecturas a una velocidad de lectura de un dato por segundo. Posteriormente se calculó el parámetro de resistencia de ruido (R_n) a partir de la razón entre la desviación estándar de las series de tiempo de potencial entre la de densidad de corriente. En la obtención del parámetro de R_n se consideraron dos casos, el primero considerando las series de tiempo sin ningún tratamiento y en el segundo caso eliminando la tendencia de las series de tiempo. A partir de R_n se calculó la densidad de corriente de corrosión utilizando la ecuación de Stern and Geary.

Además de i_{corr} se midió la resistencia eléctrica del mortero para cada una de las mezclas consideradas al inicio y al final del periodo de exposición al medio agresivo. La resistencia eléctrica se obtuvo mediante espectroscopia de impedancia electroquímica, los parámetros bajo las cuales se realizó la prueba fueron: amplitud de AC de 60mV RMS y un barrido de frecuencia de 100kHz a 100mHz . La resistencia eléctrica se obtuvo del diagrama de Nyquist como se muestra en la figura 3.

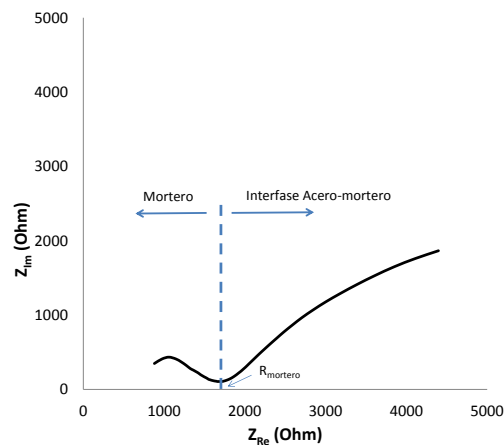


Figura 3. Diagrama de Nyquist para el sistema acero-mortero.

RESULTADOS

Al hacer el análisis de cada una de las probetas en términos de I_{corr} se obtuvo que en promedio, las probetas con un alto porcentaje de sustitución de ceniza de cascarilla de arroz presentaron una mayor resistencia.

En la Figura 4 se hace la comparación de densidad de corriente obtenida para las probetas con ceniza de cascarilla solamente y mediante las dos pruebas de análisis que son R_p y R_n . Se ilustra que las muestras que contienen menor proporción de ceniza de

cascarilla de arroz poseen una densidad más elevada en comparación con las de mayor porcentaje. En base a lo anterior podemos decir que la densidad de corriente es inversamente proporcional a la densidad del material.

Las probetas con adición de nano-sílice muestran resultados con igual tendencia que las probetas que solo contienen ceniza de cascarilla de arroz con diferencia que los valores de densidad de corriente de corrosión son más bajos; por tanto nos damos cuenta que a pesar de esperar mejores resultados de las probetas con adición de nano-sílice, eso no ocurrió, y por tanto es más viable usar solo ceniza para estas proporciones y así incrementar las propiedades en el material analizado (Figura 5).

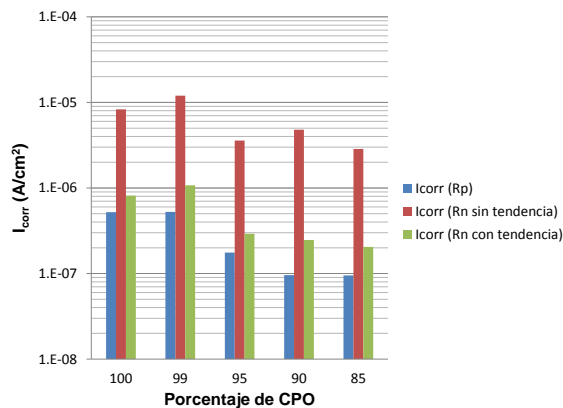


Figura 4. i_{corr} para CPO + (0, 1, 5, 10 y 15%) CCA.

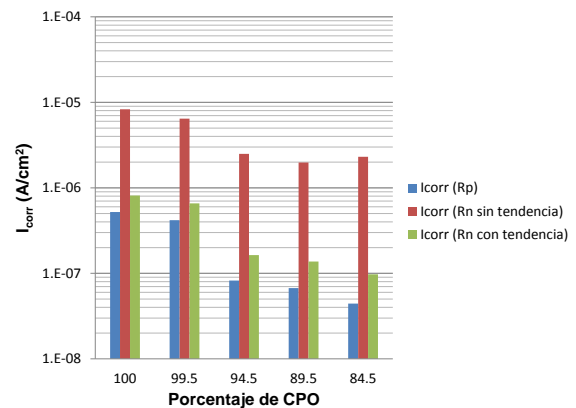


Figura 5. i_{corr} para CPO + (0, 5, 10 y 15%) CCA + (0.5%) NS.

Resistencia Eléctrica.

Con los resultados obtenidos en cuanto a resistencia por el método de impedancia y al hacer la comparación entre las muestras de las diferentes proporciones podemos argumentar lo siguiente: La resistencia inicial de cada una de las muestras es muy similar, pero el valor final obtenido muestra una gran diferencia, en las probetas con 100% de CPO la resistencia disminuyó considerablemente de 5000 a 400Ω. Existe una tendencia de la resistencia final en relación con el contenido de ceniza de cascarilla de arroz, conforme aumentó el porcentaje de ceniza la resistencia final disminuyó menos en comparación con la lectura inicial de resistencia. En las muestras con porcentaje de NS el comportamiento es muy similar comparado con las que contienen solo CCA. En las lecturas iniciales de resistencia se puede observar que las muestras que contienen CCA y NS son mayores que las que presentaron las muestras con solo adición de ceniza, sin embargo en el análisis final las primeras tienen resistencias con cierto grado de tendencia y muy semejantes a los valores mencionados de las muestras con ceniza solo que un poco menores. El resultado esperado en cuanto a resistencia suponía que el valor fuera mayor en proporción del porcentaje de adición. A pesar de que esperábamos que las muestras con ceniza y con nano-sílice experimentaran un alto grado de resistencia, se comportaron de mejor manera las que solo contienen ceniza de cascarilla de arroz. La resistencia eléctrica inicial y final de las probetas con adición de CCA se muestran en la figura 6.

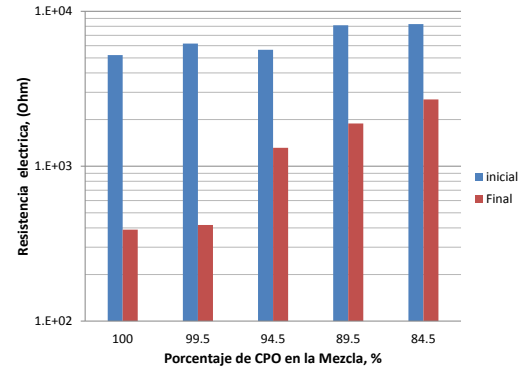
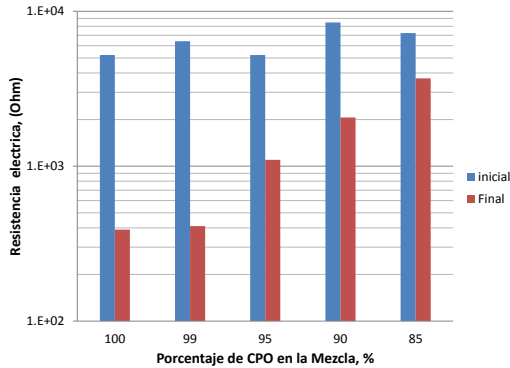


Figura 6.- Resistencia eléctrica de mezclas CPO + (0, 1, 5, 10 y 15%) CCA. Figura 7.- Resistencia eléctrica de mezclas CPO + (0, 5, 10 y 15%) CCA + (0.5%) NS

En la figura 7, al hacerse la comparación de la resistencia eléctrica inicial y final de las probetas podemos notar que los valores son menores que los que contienen CCA, lo que nos indica que la adición de NS fue desfavorable a los resultados esperados.

Densidad del mortero.

La densidad de cada muestra se comportó de una manera muy opuesta a lo esperado, ya que se pretendía que aquéllas que contienen NS fueran más densas, en relación con la muestra de 100% CPO que tiene una densidad de 2.09 g/cm³ todas las demás muestras tienen un valor mayor, pero las que solo contienen ceniza de cascarilla de arroz mostraron un valor de densidad mucho más grande de alrededor de 2.17 g/cm³ en promedio. Se puede decir que conforme aumenta el porcentaje de ceniza en las muestras, éstas aumentan considerablemente su densidad, lo que está íntimamente relacionado con la permeabilidad del mortero y por ende de la cantidad de poros de cada una de las muestras. Es notable que las probetas analizadas presentan mejores resultados conforme aumenta el porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz. Lo que nos hace pensar que la ceniza es mucho mejor sola como aditivo del concreto que en forma combinada con NS. En la figura 8 podemos ver a simple vista que las densidades de las probetas es mayor en aquellas que solo tienen adición de CCA.

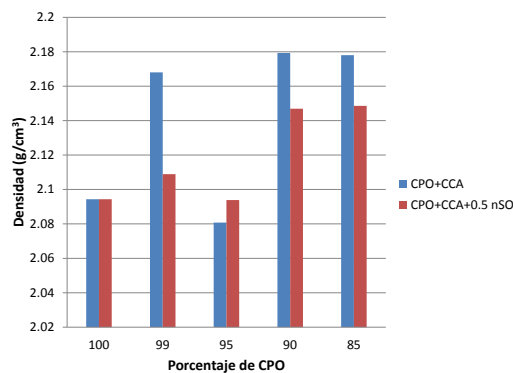


Figura 8. Densidad promedio de mezclas CPO + (0, 1, 5, 10 y 15%) CCA y + (0.5%) NS.

CONCLUSIONES

Después del análisis de los resultados podemos concluir que las probetas con adición de CCA mostraron mejores resultados en todos los aspectos en comparación con aquellas probetas que contienen tanto CCA como NS.

La densidad de las probetas para porcentajes de CCA solamente estuvieron en un valor aproximado de 2.17 gr/cm^3 que al compararse con las muestras que contienen además nano-sílice estas presentaron una densidad menor.

La prueba de impedancia realizada nos permite hacer la comparación entre la resistencia eléctrica al iniciar el estudio así como la final, con lo cual se pudo ver la pérdida de resistencia después de la exposición en el medio. La resistencia inicial fue muy similar en todas las probetas sin embargo la resistencia final fue menor en aquellas que contenían porcentajes de CCA y NS.

El parámetro de i_{corr} nos muestra una medida de la condición de corrosión experimentada por cada una de las probetas. Es importante mencionar que ninguna de ellas, después de 60 días de análisis, mostró daños severos de corrosión, en algunas estuvo un poco elevado pero en general se mantuvo dentro del orden de magnitud.

La apariencia física de los especímenes está un poco deteriorada, en la superficie presentan leves problemas de picaduras y en el peor de los casos agrietamientos, lo que nos dice que a un mayor tiempo de exposición, las probetas hubiesen experimentado un mayor grado de corrosión.

Se esperaba que la nano-sílice reaccionara más fácilmente con el mortero por ser partículas muy pequeñas y mejorara sus propiedades en cuanto a resistencia, aumentando la densidad del material y haciéndolo menos susceptible al medio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa y al CONACYT por el apoyo financiero para la realización de esta investigación mediante los proyectos PROFAPI 2013/020 y CB-183747, respectivamente.

REFERENCIAS

1. C. Byung, J. Soo, J. Bong y J. Seung, Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. Nuclear engineering and design. 212: 221–231, **2002**.
2. R. Muñoz-Ledo y J. Uruchurtu-Chavarín, Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la zona metropolitana de la ciudad de México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental UNAM. 18(1): 27-32, **2002**.
3. S. Erdog-dua, I.L. Kondratovab y T.W. Bremnerc, Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. Cement and Concrete Research. 34: 603–609, **2004**.
4. Stanish, K.D., Hooton, R.D. y Thomas, M.D.A., Testing the chloride penetration resistance of concrete: A literature review. FHWA. DTFH61-97-R-00022: 1-31, **1997**. Disponible en <http://www.tfrc.gov/hnr20/pubs/chlconcrete.pdf>

5. P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong y C. Jaturapitakkul, Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash. *Construction and Building Materials*. 21(7):1492–1499, **2007**.
6. S. Caijun, Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and concrete research*. 34: 537–545, **2004**.
7. L. Hanzic y L. Ilic, Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. *Cement and Concrete Research*. 33(9):1385–1388, **2003**.
8. R. Kumar y B. Bhattacharjee, Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research. *Cement and Concrete Research*. 33(3): 417-424, **2003**.
9. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates, Book of standards, vol. 04.02 (2003).

DETERIORO DE CONCRETOS MODIFICADOS CON MICROSILICE Y CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR EXPUESTOS A IONES CLORURO

A. N. Arballo-Sandoval¹, R. E. Núñez-Jaquez¹, C. P. Barrios-Durstewitz¹

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Unidad Regional Norte. Universidad Autónoma de Sinaloa. Fuente de Poseidón y Pról. Ángel Flores S/N
Los Mochis, Ahome, Sinaloa C.P. 81223, México.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar la velocidad de corrosión en mezclas ternarias de concreto reforzado a las cuales se les reemplazó el 20% en peso de cemento con ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y microsilice (MS). Se elaboraron doce probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura, con una varilla inmersa, tres especímenes sin reemplazo, en 3 especímenes se sustituyó el 5% MS-15% CBCA, en 3 especímenes el 10% MS-10% CBCA y en 3 especímenes el 15% MS-5% CBCA, posteriormente se colocaron en un solución salina al 3,5% en peso, en ciclos de humectación y secado, se realizaron pruebas de resistencia a la polarización e impedancia electroquímica. En los resultados se muestra que los especímenes en los que se sustituyó el 10% de microsilice y el 10% de CBCA presentan las menores velocidades de corrosión y el mejor comportamiento.

Palabras clave: Corrosión, Puzolana, Cloruros, Resistencia a la Polarización, Impedancia Electroquímica.

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the corrosion rate in reinforced concrete with ternary blends, which were replaced 20% by weight of cement with sugarcane bagasse ash (SCBA) and microsilica (MS). Twelve cylindrical specimens of 7.5 cm diameter and 15 cm length were prepared with a rod immersed, three specimens without replacement, 3 specimens were replaced with 5%MS - 15% SCBA, 3 specimens were replaced with 10% MS - 10% SCBA and three specimens were replaced with 15% MS-5% SCBA, then placed all in a 3.5% by weight saline solution, exposed to wetting and drying cycles, and linear polarization resistance and electrochemical impedance spectroscopy test were performed. In the results is show that the specimens in which was replaced 10% microsilica and 10% of SCBA have the lowest corrosion rates and better performance.

Key words: Corrosion, pozzolana, chlorides, linear polarization resistance, electrochemical impedance spectroscopy.

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla en diferentes proporciones de agregados (finos y gruesos) y pasta. La pasta está compuesta por cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando un material semejante a una roca debido a las reacciones químicas generadas entre sus componentes [1]. Por otra parte el concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más utilizados, esto se debe al uso de dos materiales que complementan significativamente sus propiedades: acero y concreto que reunidos en un material mixto, aportan la resistencia a la flexión del primero y la buena resistencia a la compresión del segundo. Sin embargo en los últimos años el deterioro de estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran importancia. La corrosión del acero de refuerzo es conocida como uno de los mayores problemas, por tanto se ha convertido en un importante tema de investigación [2,3].

Por otra parte el cemento Portland genera en la actualidad diversos problemas, entre los que destaca el alto grado de contaminantes que se emiten a la atmosfera en su fabricación (gases de efecto invernadero, especialmente CO_2 y NO_x), así como algunas limitaciones tecnológicas, relacionadas con la durabilidad de los concretos. De ahí la importancia de desarrollar nuevos materiales cementantes que permitan reemplazar en determinadas aplicaciones al cemento Portland, sin perder las propiedades mecánicas del mismo pero mejorando el impacto medioambiental [4]. La industria del cemento, se ha enfocado a la utilización de aglomerantes económicos y eco-eficientes. La producción de cemento Portland genera aproximadamente entre el 7 y 8% de CO_2 mundial (gas de efecto invernadero). Con el propósito de reducir dichas emisiones, se han desarrollado materiales de construcción eco-eficientes, los cuales son una alternativa viable a los cementos convencionales. La principal alternativa sugerida es el uso de materiales puzolánicos que mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto [5].

Los materiales puzolánicos son productos naturales o artificiales, silíceos o sílico aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas. Presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker. Engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se está haciendo alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas [6]. Diversos materiales puzolánicos, son utilizados en sustitución parcial de cemento portland en pastas, morteros o concretos [7]. El uso de puzolanas en morteros y concretos se ha convertido en algo habitual debido a que mejora las propiedades mecánicas y aumenta la durabilidad ante agentes agresivos. Esto se atribuye a dos procesos: a) la formación de productos de hidratación adicionales debidos a la reacción de la puzolana con el hidróxido de calcio y b) la reducción de la permeabilidad por el efecto del llenado de poros con los productos formados por la reacción puzolánica [8] En los últimos años ha

habido un aumento significativo en la producción de concretos compuestos que incorporan cemento portland y dos materiales puzolánicos (concretos ternarios) [9]. Dentro de estos sistemas existen varios estudios en los que se mezclan diferentes materiales o residuos, entre ellos se encuentran: cemento portland (CP)/microsilíce (MS)/ceniza volante (CV); CP/escoria/CV; CP/cverbos en cenizas de residuos/CV; CP/caliza/escoria; CP/escoria/puzolana natural [10].

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Elaboración de especímenes

Se realizaron probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura. A todos los especímenes se les embebió una varilla de acero 1018, 3/8 de pulgada de diámetro, la cual tiene una longitud de 15 cm, fueron limpiadas y en la parte central se encintaron 10 cm, para cubrir el resto con pintura epóxica, posteriormente se retiró la cinta y la parte sin cubrir fue la que quedo expuesta al proceso de corrosión, dentro del concreto ternario. Una vez transcurridos 28 días de curado los especímenes se colocaron en un recipiente que contenía solución salina (3.5% en peso de NaCl), y se monitoreo cada semana la velocidad de corrosión por medio de la técnica de resistencia a la polarización e impedancia electroquímica.

Resistencia a la polarización

El monitoreo de los especímenes se realizó por medio de un potenciostato galvanostato Field Machine marca ACM Instruments, como electrodo de referencia un electrodo de Plata/Cloruro de Plata, la varilla inmersa como electrodo de trabajo y alrededor del espécimen una placa metálica de acero inoxidable como contra electrodo. Se aplicó un barrido de potencial ± 20 mV con respecto al potencial de corrosión y una velocidad de barrido de 10 mV/ minuto. Este monitoreo se realizó cada semana, con los especímenes inmersos en la solución salina. Para el análisis de resultados se utilizó el programa "Analysis" de ACM versión 4.

Espectroscopia de impedancia

El monitoreo de los especímenes se realizó por medio de un potenciostato galvanostato Field Machine marca ACM Instruments, como electrodo de referencia un electrodo de Plata/Cloruro de plata, la varilla inmersa como electrodo de trabajo y alrededor del espécimen una placa metálica de acero inoxidable como contra electrodo. La pruebas de impedancia se realizaron con un rango de frecuencia de 0.1 Hz hasta 100 kHz, la amplitud de 10 mV rms, con 100 puntos de lectura. Para el análisis de resultados se utilizó el programa "Analysis" de ACM versión 4.

Criterios de evaluación:

Para evaluar el grado de deterioro de estructuras de concreto existen varias técnicas una, es determinar el potencial de corrosión contenido en la Norma ASTM-C-876-91, la

cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios para la determinación de la probabilidad de corrosión

E_{corr} vs. SCE (mV)	Probabilidad de Corrosión
> -125	10% que se presente
-125 a -275	Zona incierta
< -275	90% que se presente

A partir de los valores de densidad corriente de corrosión obtenidos con las ecuaciones anteriores, se puede determinar qué tan severo es el nivel de corrosión, de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de i_{corr} en términos de vida útil

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevado
>1	Muy elevado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencial de corrosión

La grafica de la figura 1 presenta los valores de potencial a los 189 días de monitoreo utilizando como electrodo de referencia un electrodo Plata/Cloruro de plata (Ag/AgCl), el rango en dichos valores de potencial fluctúa entre -200 a -700 mV.

Se puede observar según los criterios de evaluación antes dichos que, en general se presenta un 90% de posibilidades de existencia de corrosión. Sin embargo, también se observa que los especímenes denominados como C5S15 (5% CBCA – 15 MS) y C10S10 (10% CBCA y 10% MS), presentan valores de potenciales de corrosión más cercanos a la zona incierta de lo cual podemos decir que dichas mezclas ternarias son las que presentan un mejor desempeño frente a los agentes corrosivos a los que fueron expuesto (Cloruro de sodio, NaCl).

De igual manera se puede observar que según lo predicho los especímenes sin adiciones (MB) presentan el comportamiento más desfavorable ante los agentes corrosivos.

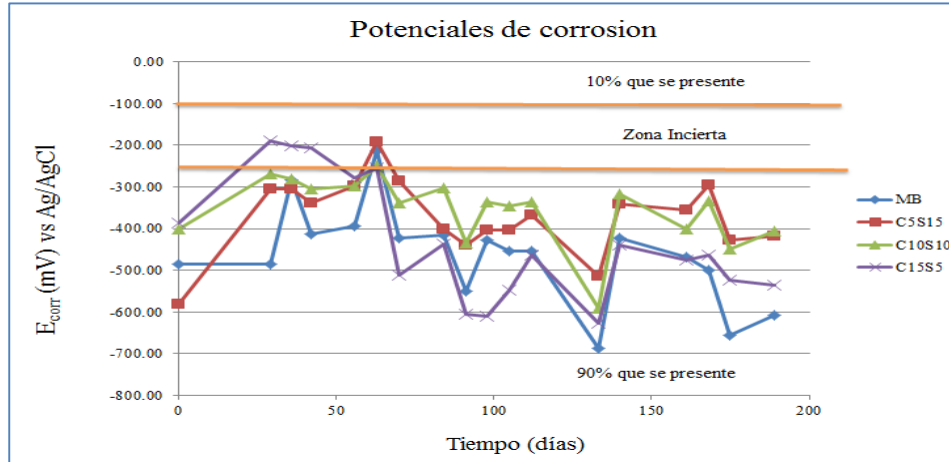


Figura 1. Potenciales de corrosión

Densidad de corrosión

La grafica de la figura 2 presenta los valores de densidad a los 189 días de monitoreo utilizando como electrodo de referencia un electrodo Plata/Cloruro de plata (Ag/AgCl), el rango en dichos valores de densidad fluctúa entre 0.1 a 3.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Se puede observar que al igual que en grafico 2 los especímenes denominados como C5S15 (5% CBCA – 15 MS) y C10S10 (10% CBCA y 10% MS), presentan el mejor comportamiento ya que se encuentran dentro del rango de corrosión moderada, si bien se observa que en un momento ambos pasan a la zona de corrosión elevada, regresan a su comportamiento original, demostrando así que son la mejor opción.

También se corrobora que los especímenes sin adición (MB) presentan una densidad de corrosión más avanzada.

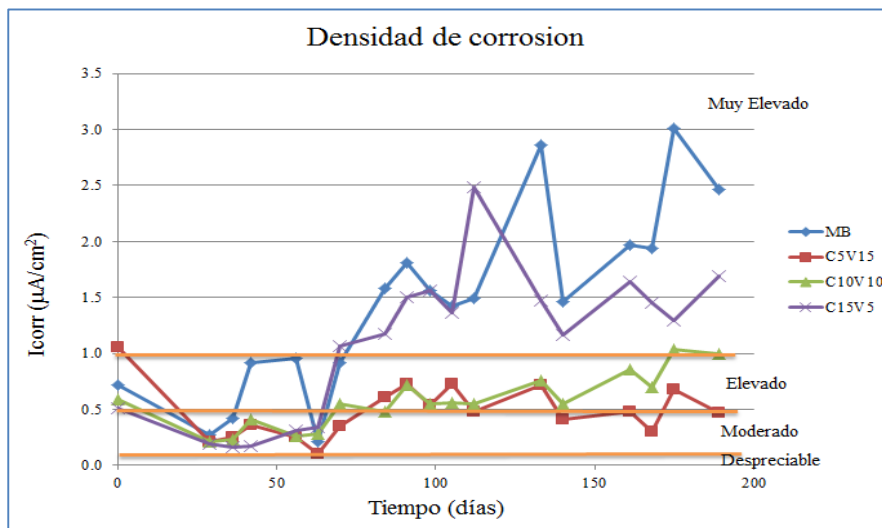


Figura 2. Densidades de corrosión

Impedancia electroquímica

Diagramas de Nyquist

Se puede observar que en los especímenes sin sustitución (MB) se presenta una menor resistencia del electrolito y aquellos con una mayor resistencia son los especímenes con 5% de CBCA y 15% Microsilíce (C5S15). Se observa también que con el paso del tiempo, la resistencia del electrolito en todos los especímenes presenta un aumento.

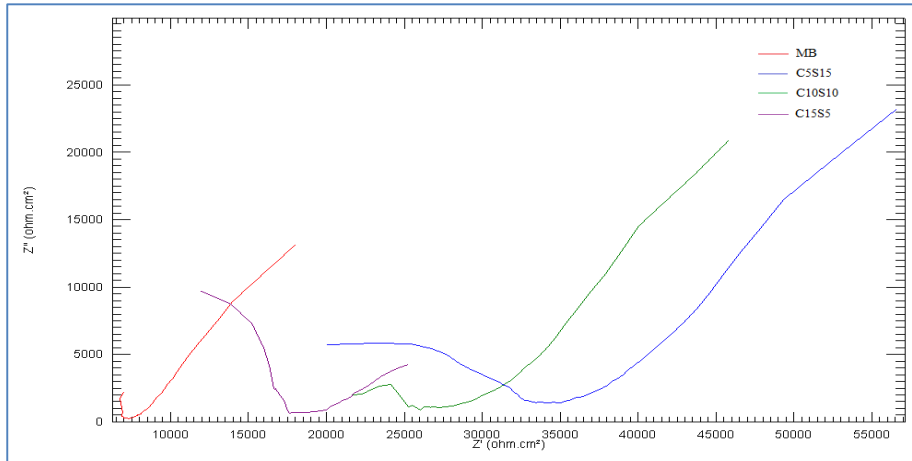


Figura 3. Diagrama de Nyquist para 29 días de curado

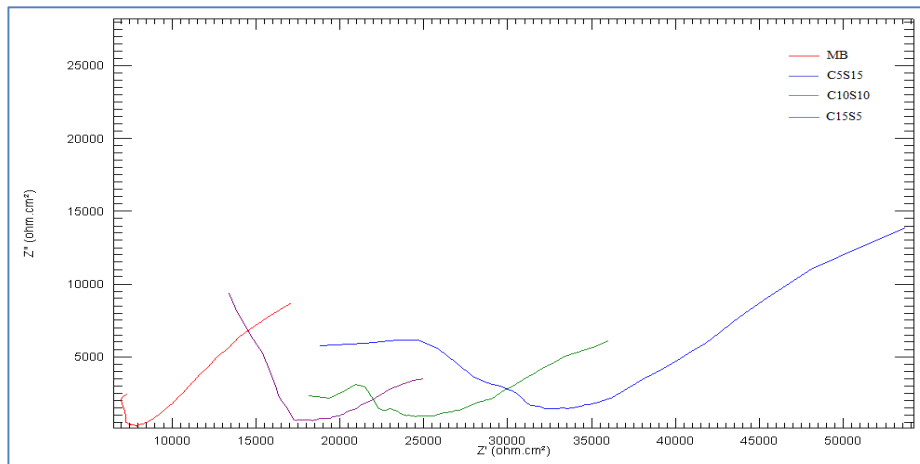


Figura 4. Diagrama de Nyquist para 98 días de curado

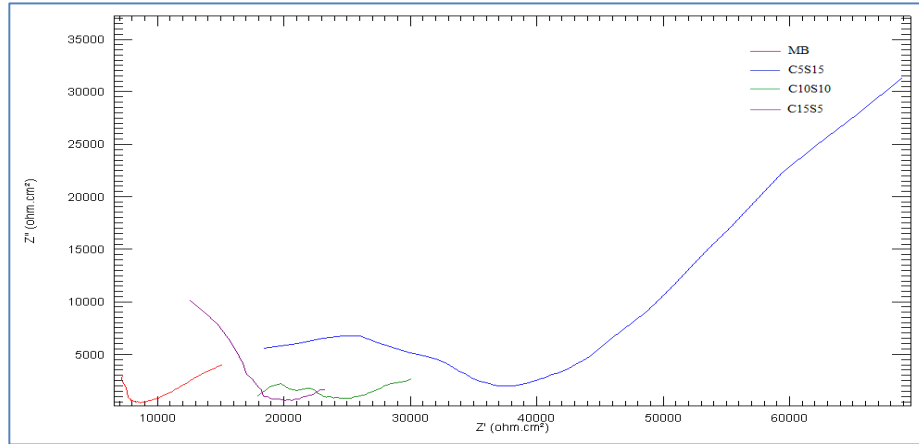


Figura 5. Diagrama de Nyquist para 189 días de curado

Diagramas de Bode

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los diagramas de Bode a) Angulo y b) Impedancia de fase para el espécimen con y sin adición. En el diagrama de Bode de ángulo de fase se aprecia que en todos los casos el ángulo es menos a 45 grados lo que indica un posible proceso capacitivo. En el diagrama de Bode de Impedancia se aprecia un aumento en la resistencia al electrolito con el paso del tiempo, atribuida únicamente al concreto.

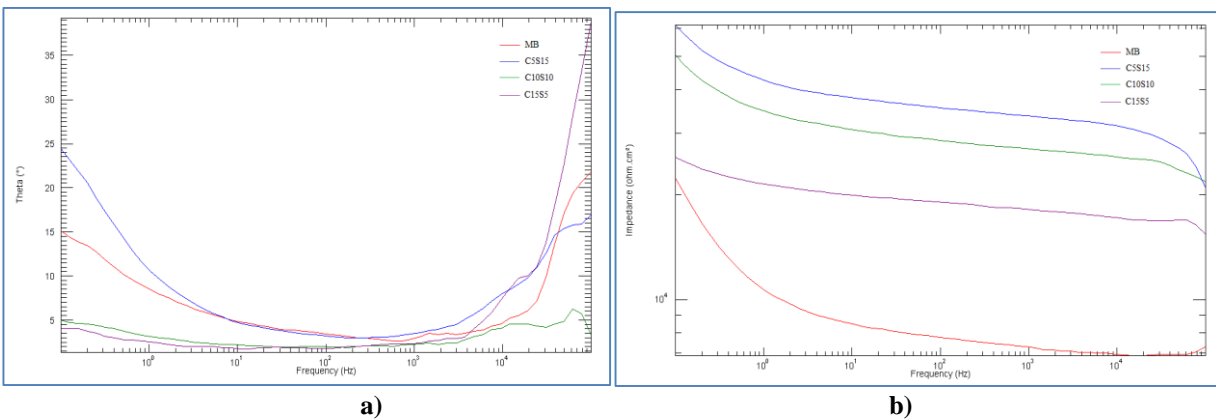


Figura 6. Diagrama de Bode a) Angulo de fase y b) Impedancia para 29 días de curado

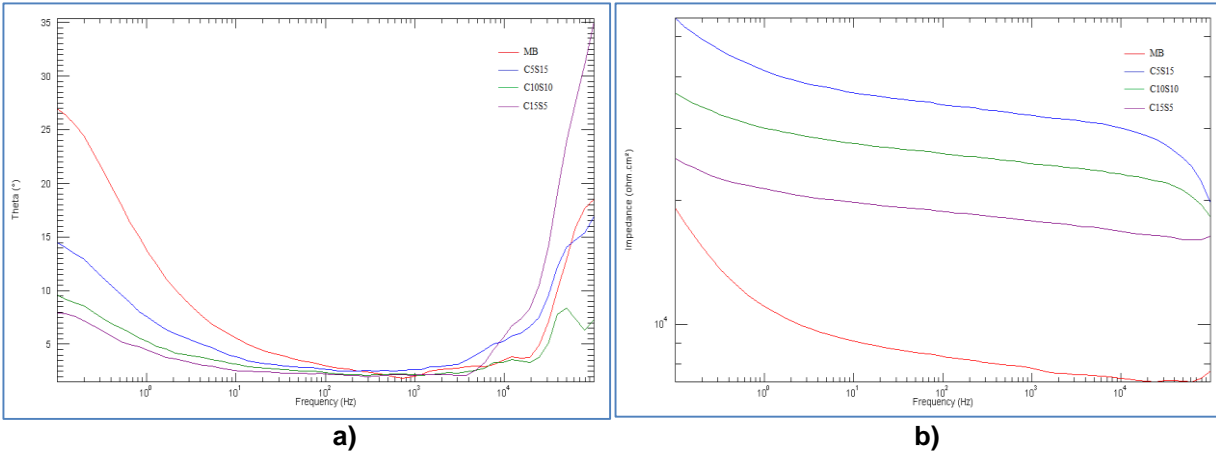


Figura 7. Diagrama de Bode a) Angulo de fase, b) Impedancia para 98 días de curado

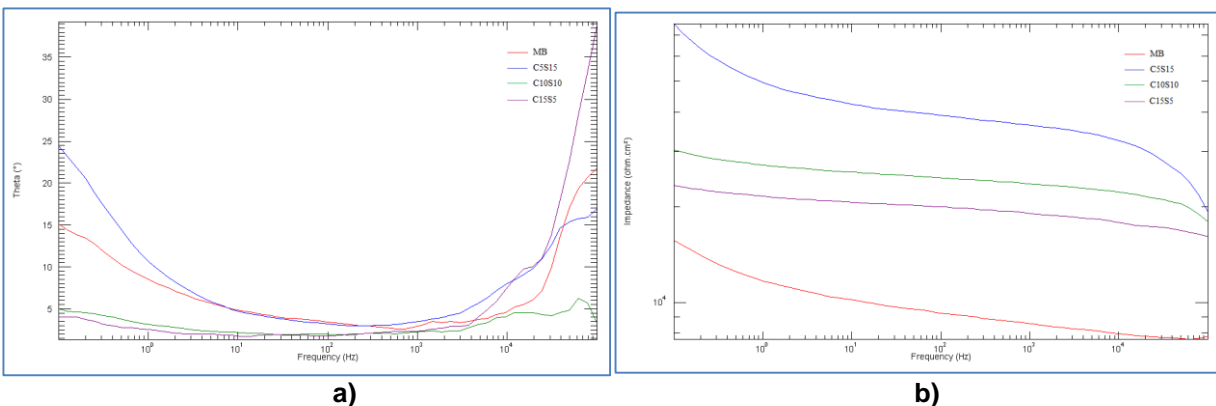


Figura 8. Diagrama de Bode a) Angulo de fase, b) Impedancia para 189 días de curado

CONCLUSIONES

Por lo anterior se puede concluir que los especímenes que presentan un mejor comportamiento son aquellos conocidos como C5S15 (5% CBCA – 15 MS) y C10S10 (10% CBCA y 10% MS), donde el nivel de corrosión varía de moderado a elevado, mientras que aquellos especímenes sin sustitución muestran un nivel de corrosión muy elevado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ingenio Azucarero de Los Mochis, en especial al Ing. Jorge Francisco Parra Pit, por las facilidades prestadas para la donación de la Ceniza de Bagazo de Caña, a Concretos Premezclados de Chihuahua (COPRECHISA), por la donación del cemento portland ordinario y a la Universidad Autónoma de Sinaloa, por medio de la Dirección General de Investigación y Posgrado, por el apoyo económico brindado a través de Proyecto PROFAPI 2013/125 para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] José Luis Chan Yam, Rómel Solís Carcaño y Eric Iván Moreno. *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería. 7(2) 39-46, 2003.
- [2] Angélica del Valle Moreno; Tezozómoc Pérez López; Miguel Martínez Madrid. *El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado*. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 182, 2001.
- [3] P. Antonaci, C.L.E. Bruno, M. Scalerandi y F. Tondolo. *Effects of corrosion on linear and nonlinear elastic properties of reinforced concrete*. Cement and Concrete Research. 51 96-103, 2013.
- [4] C. Pastor, A. Fernandez-Jimenez, T. Vazquez y A. Palomo. *Hidratación del cemento de aluminato de calcio en condiciones de muy elevada alcalinidad*. Materiales de construcción. 59(293) 21-34, 2009.
- [5] Moussa Hamidi, Larbi Kacimi, Martin Cyr y Pierre Clastres. *Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement*. Construction and building materials. 47 1268-1277, 2013.
- [6] Tobon J. I. *Puzolanas en los alrededores de Irra*. Dyna. 129 77-83, 2000.
- [7] Guilherme Chagas Cordeiro, Eduardo de Moraes Reao Fairbairn; Romildo Días Toledo Filho, *Caracterización de ceniza de bagazo de caña de azúcar para empleo como puzolana en materiales cementicios*. Quim. Nova. 32(1) 82-86, 2009.
- [8] J. M. Cruz, J. Paya, L. F. Lalinde, I. C. Fita, *Evaluación de las propiedades eléctricas de morteros de cemento con puzolanas*. Materiales de construcción. 61(301) 7-26, 2011.
- [9] S.K. Antiohos, V.G. Papadakis, E. Chaniotakis y S. Tsimas. *Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes*. Cement and Concrete Research. 37 877-885, 2007.
- [10] Suárez Silgado S. *Tesis: Mezclas binarias y ternarias basada en cenizas volantes. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas*. Universidad Politécnica de Catalunya. 27, 2010

VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE ACERO INMERSO EN MORTERO DE CEMENTO SUSTITUIDO CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA

C. Bernabé¹, W. Martínez¹, J. T. Pérez^{1,2}, E. M. Alonso¹, C. Lara¹, H. L. Chávez¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria Edificio "F", Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

²Área de Materiales, Instituto Mexicano del Transporte, Km 12 Carretera Querétaro-Galindo S/N, Sanfandila, Querétaro, Querétaro, C.P. 76703, México.

RESUMEN

El presente estudio muestra los resultados de la evaluación de la CBC (Ceniza de Bagazo de Caña), como sustituto de CP (Cemento Pórtland), en la elaboración de morteros, como una alternativa para reducir la cantidad de cemento, reutilizando residuos agroindustriales. La CBC fue proporcionada por un ingenio azucarero del municipio de Taretan, Michoacán, México. La CBC se utilizó seca y cribada hasta malla 200 (ASTM 0.074 mm) para elaborar el mortero. Las barras inmersas son de acero grado 60. Los resultados indican que la adición de CBC no resulta conveniente para mitigar el fenómeno de la corrosión, ya que a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución, la velocidad de corrosión también incrementa.

Palabras claves: Mortero, Cenizas, Puzolanas, Corrosión, Resistencia a la Polarización.

ABSTRACT

The present study shows the results of the evaluation of the CBC (ash of sugarcane bagasse), as a substitute for CP (Portland cement), in the preparation of mortars, as an alternative to reduce the amount of cement, reusing agro-industrial waste. The CBC was provided by a sugar mill in the municipality of Taretan, Michoacán, Mexico. CBC dry and sieved to 200 mesh (ASTM 0.074 mm) was used to make mortar. The bars immersed were steel grade 60. The results indicate that the addition of CBC is not suitable to mitigate the phenomenon of corrosion, since to the substitution percentage increases, the corrosion rate also increases.

Keywords: Mortars, Ashes, Corrosion, Pozzolanas, Polarization Resistance

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción basa la mayor parte de sus materiales en el Cemento Portland (CP), pero el CP contribuye con la contaminación atmosférica, por lo tanto las nuevas directrices son buscar materiales alternativos que produzcan el efecto puzolánico en las mezclas, pero que solucionen la problemática de las emisiones de CO₂ atmosférico, la durabilidad y mitiguen la corrosión del acero embebido en el concreto hidráulico (CH). Las fábricas de cemento contribuyen significativamente al cambio climático en todo el mundo y representan alrededor del 5% de los daños antropogénicos ⁽¹⁾, lo cual es preocupante por las repercusiones negativas asociadas al efecto invernadero ^(2; 3). Una alternativa para minimizar el daño al medio ambiente, así como el costo del CH, es el uso de aditivos minerales, tales como polvo de piedra caliza, puzolanas naturales y cenizas volantes, añadiendo estas al CH como ingredientes separados antes o durante el mezclado ⁽⁴⁾. Los desechos agrícolas e industriales de la Industria Azucarera, principalmente las Cenizas de Bagazo de Caña (CBC), y las Cenizas de Paja de Caña (CPC) tienen actividad puzolánica, debido al alto contenido de sílice (SiO₂) presente en estos materiales ^(5; 6).

La evaluación del comportamiento de adición de materiales sustitutos de cemento en la elaboración de morteros y/o concretos y su efecto en la resistencia a la corrosión puede determinarse por medio de técnicas electroquímicas, tales como Resistencia a la polarización Lineal ^(7; 8; 9), Extrapolación de Tafel ^(7; 8; 9) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica ⁽¹⁰⁾. En este trabajo se propone adicionar CBC a los morteros de CP en 3 diferentes proporciones en peso, para analizar mediante técnicas electroquímicas el desempeño frente a corrosión que experimenta el acero grado 60 inmerso en ellos.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Materiales

El cemento utilizado en la fabricación de los especímenes de mortero fue un Cemento Portland Compuesto (CPC) 30R RS ⁽¹¹⁾. El agregado pétreo fue el que pasó la malla ASTM No. 16 y se retuvo en la malla ASTM No. 30. La CBC se obtuvo del ingenio azucarero localizado en el municipio de Taretan, Michoacán, México. El tratamiento al que se sometió la CBC fue de secado y cribado, utilizando las partículas que pasan la malla No. 200 ASTM (0.074 mm) para la elaboración del mortero. La cantidad de CBC usado, como sustitución en peso del cemento, para la fabricación de los diferentes morteros fue de 10%, 20% y 30%.

El agua para la fabricación de los morteros fue agua potable de la llave del laboratorio. Se usó una solución con un contenido de 3.5 % de NaCl en peso para colocar los especímenes y simular un ambiente agresivo por cloruros. Los elementos reforzados fueron construidos con varillas de 7/32" de diámetro, grado 60.

Fabricación de especímenes

Se fabricaron dos tipos de especímenes: cubos de 5cmx5cmx5cm y prismas de 1.5cmx5cmx8cm. Los primeros fueron usados para realizar las pruebas de

caracterización física y mecánica de los morteros estudiados. Los especímenes tipo cubo fueron elaborados en moldes metálicos de acuerdo a procedimiento estándar^(12; 13). Los especímenes prismáticos se elaboraron en moldes de acrílico de 1.5cm x 5cm x 8cm, con perforaciones que permitieran la inclusión de la varilla de acero corrugada grado 60 de 7/32" de diámetro, figura 1.

El mezclado de los materiales de los morteros se realizó mecánicamente en un contenedor de plástico con capacidad de 19 litros. Para el diseño de la mezcla, previo a la elaboración de los especímenes, se realizaron las pruebas para determinar la cantidad de agua necesaria para obtener una fluidez de 110 ± 5 unidades, en los morteros, como se muestra en la Figura 2. La relación a/c obtenida fue de 1.01⁽¹⁴⁾.

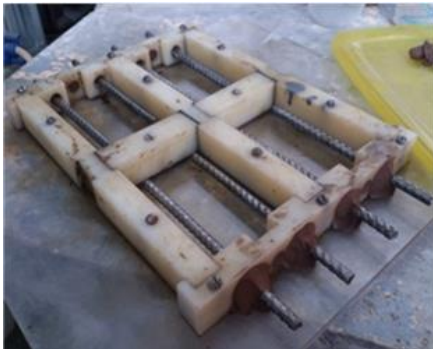


Figura 1. Molde de acrílico con la sujeción de las barras de acero para el colado de probetas. Fotografía de C. Bernabé.



Figura 2. Realización de la prueba de fluidez al mortero. Fotografía de C. Bernabé.

Pruebas físicas y mecánicas

Las pruebas físicas realizadas fueron velocidad de pulso ultrasónico (VPU)⁽¹⁵⁾ y resistividad eléctrica (RE)⁽¹⁶⁾. El equipo empleado para la prueba de VPU fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz, figura 3. Las mediciones de resistencia eléctrica se realizaron con un Resistómetro para suelos. Se garantizó el flujo de corriente utilizando almohadillas de algodón humedecidas, figura 4.



Figura 3. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico en prismas de 4cmx4cmx16cm. Fotografía de C. Bernabé.



Figura 4. Prueba de resistencia eléctrica en prismas de 4cmx4cmx16cm. Fotografía de C. Bernabé.

Las pruebas mecánicas realizadas fueron compresión simple en cubos, flexión en prismas y adherencia sobre losas de concreto. Las pruebas a compresión y flexión se realizaron en una máquina universal, ilustración 5 y 6^(17; 12).



Figura 5 Aplicación de la carga en la prueba a compresión en cubos de 5cm.



Figura 6 Realización de la prueba a flexión en prismas de 4cmx4cmx16cm. Fotografía de C. Bernabé.

La prueba de adherencia se realizó utilizando un equipo con el cual se aplicó la carga, utilizando discos de acero y epóxico para sujetarlos al mortero ⁽¹⁸⁾.

Pruebas Electroquímicas

La técnica electroquímica utilizada para cuantificar la velocidad de corrosión fue la de Resistencia a la Polarización Lineal (R_p) ^(7; 8; 9). Como electrodo de trabajo se utilizó el acero grado 60, como contra electrodo una placa de acero inoxidable con especificación de la norma AISI 316L ⁽¹⁹⁾ mostrada en la Figura 9, y como electrodo de referencia se usó el electrodo de calomel saturado, Figura 8. Los especímenes no se sometieron al proceso de curado, y después de 90 días se realizó la inmersión en la solución de NaCl.



Figura 8. Placa de acero inoxidable AISI 316L, utilizada como contra electrodo. Fotografía de C. Bernabé.

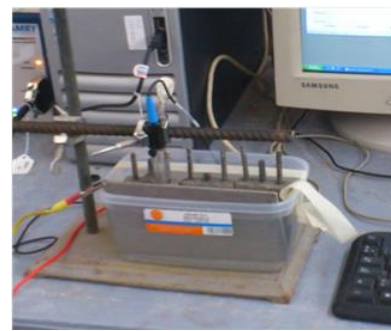


Figura 9. Conformación del sistema electroquímico. Fotografía de C. Bernabé.

Se utilizó un potenciostato, con el cual se procedió conforme a las normas ASTM G3, G5 y G59. Las pruebas se realizaron con las probetas y los electrodos inmersos en la solución de NaCl. El intervalo de la prueba se realizó de -0.02V a +0.02V, con una velocidad de barrido de 0.125 mV/s. Una vez obtenido el valor de R_p , se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) mediante la ecuación de Stern y Geary (1957) ⁽⁹⁾. Se recurrió a utilizar un valor de B de 26 mV, el cual indica un fenómeno de corrosión libre. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década, y para obtener los 26 mV del valor de B, se considera solo el segundo valor ^(20; 21).

RESULTADOS

Análisis de Fluorescencia de rayos X

Los resultados de FRX para el CBC como para el CP se presentan en la Tabla 1. Se puede observar que las concentraciones del óxido de sílice en la CBC están por arriba del 50%, el cual es relativamente bajo comparado con lo reportado por otros autores ⁽²²⁾. La ceniza de CBC se clasifica como clase N según la norma ASTM C618, por resultar de un proceso de calcinación, sin embargo no entra dentro de la clasificación de puzolana ya que la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es menor de 70% ⁽²³⁾.

Tabla 1. Composición química en porcentaje en peso de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por Fluorescencia de rayos X, ASTM E 2465 (24) .

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	MnO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)
CBC	56.62	4.293	0.422	5.488	1.573	0.227	2.013	0.24	2.178	0.244
CPC 30R RS	23.88	4.997	0.217	2.972	0.88	0.096	54.6	1.23	1.666	3.791

Ensayos Físico-Mecánicos

Resistencia a la compresión. Los resultados de la resistencia a la compresión de las mezclas utilizadas se muestran en la Figura 10 a 14, 28, 45, 90 y 180 días después de fabricados los cubos. Estos valores son comparados con los resultados de los cubos de mortero de control en donde no se utilizó CBC (0%). Se puede observar que las resistencias a la compresión aumentan con el tiempo de fraguado, hasta los 45 días. Después de esta fecha, la resistencia se mantiene relativamente constante, incrementando o disminuyendo sin tendencia alguna.

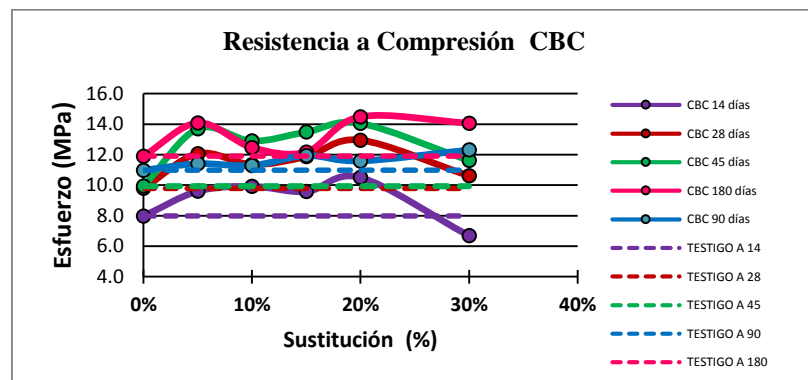


Figura 10. Resultados de la prueba de resistencia a la Compresión en morteros con sustitución de CBC.

Se observa también que la mezcla con un 20% fue la de mejor desempeño a la compresión y la mezcla con un 35% de CBC fue la de menor resistencia mecánica de todas.

Velocidad de pulso ultrasónico. Como se muestra en la Figura 11, los valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de las mezclas con adiciones de CBC fueron

menores que los controles, lo que demuestra que el CBC generaría una menor densidad en el material.

Otro punto interesante que se observó en los resultados obtenidos de VPU es que en un principio, 14 y 28 días, los valores obtenidos en la mezcla control fueron mayores que los obtenidos con las mezclas adicionadas con CBC. Conforme el tiempo fue avanzando, los valores de VPU de las mezclas adicionadas con CBC fueron alcanzando los valores de la mezcla control al grado que a los 180 días, los valores de las mezclas CBC fueron mayores que la mezcla control.

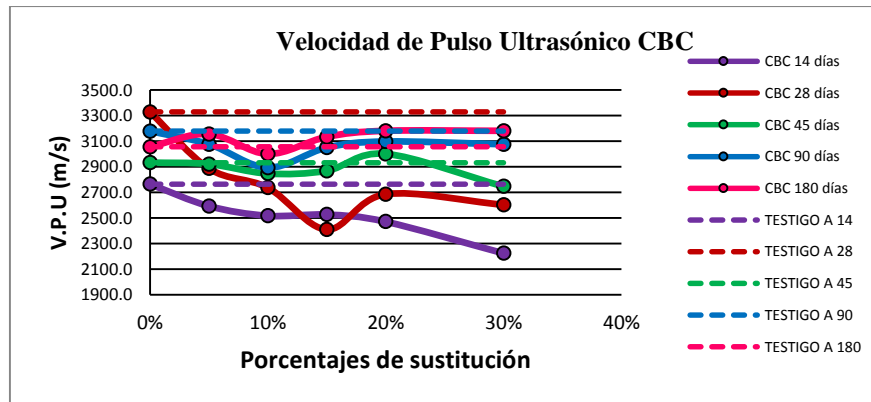


Figura 11. Resultados de la prueba de velocidad de pulso en morteros con sustitución de CBC.

Ensayos electroquímicos

Potencial de Corrosión (E_{corr}). La Figura 12 muestra los valores de potencial de corrosión, (E_{corr}), obtenidos en el monitoreo de los prismas con las varillas de acero embebidas. Se puede observar que estas varillas siempre estuvieron en un intervalo de valores entre -600 y -700 mV (vs ESC), lo cual indica que estuvo activo el acero en todo momento ⁽²⁵⁾.

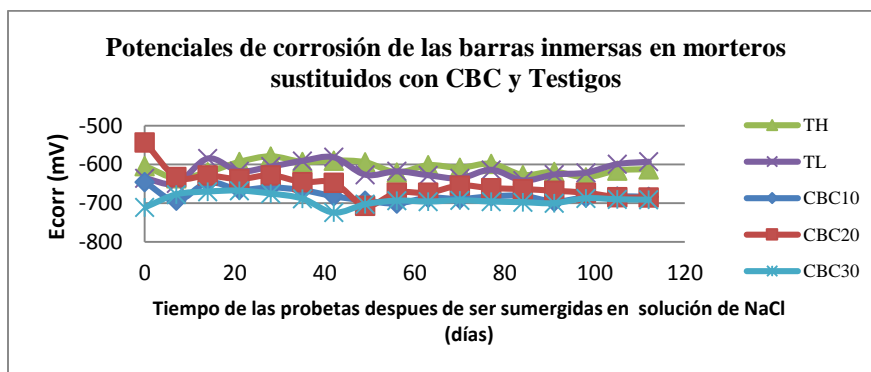


Figura 12. Potenciales de corrosión vs tiempo.

El hecho de que el potencial estuviera tan activo en las tres mezclas mostradas en la Figura 12 (10%, 20% y 30%) no indica la presencia de una velocidad de corrosión elevada.

Densidad de Corriente de Corrosión (i_{corr}). Una clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil es la siguiente, tabla 4 ⁽²⁶⁾:

Tabla 2 Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de Corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5 - 1	Elevada
>1	Muy Elevada

Los valores de densidad de corriente obtenidos se muestran en la figura 13, los cuales ubican los resultados dentro de un nivel de corrosión muy elevado. Sin embargo, los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de 100-200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ⁽²⁶⁾.

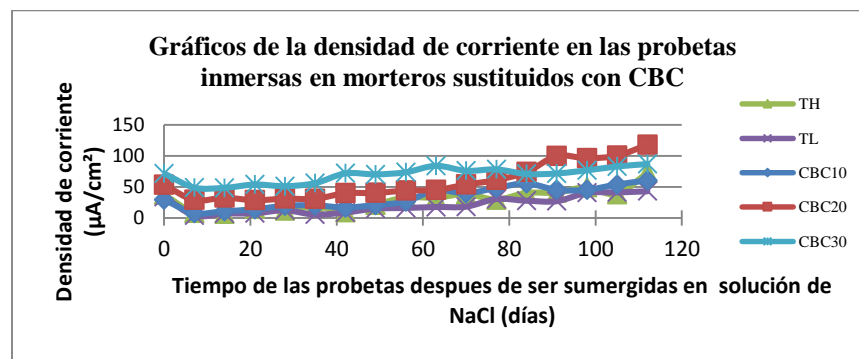


Figura 13. Gráfica de valores de densidad de Corriente de Corrosión (i_{corr}) vs tiempo.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en este trabajo son los obtenidos a edades tempranas, sin embargo, los comportamientos mostrados proporcionan una idea suficientemente clara para afirmar que hasta hoy, los morteros testigos presentan un mejor comportamiento que cualquiera de los morteros con una sustitución. Sin embargo todos los valores, tanto potenciales de corrosión como densidad de corriente, indican un alto nivel de corrosión.

En los morteros con sustituciones de CBC el nivel de corrosión incrementa en función del porcentaje de sustitución de la ceniza, mostrando el valor más desfavorable para la barra de acero inmersa en el mortero con sustitución del 30%.

Los morteros son parte importante de cualquier obra de infraestructura de concreto reforzado, ya que son los materiales empleados para revestimientos, su función es aislar el material de ataque exterior; también cumplen con un función estética.

Los productos derivados de la caña de azúcar son, además de variados, necesarios en los diferentes procesos de producción de alimentos, sin embargo se crean efectos negativos cada vez que ésta se procesa. Una de los efectos más notables es la generación de cenizas, con lo cual en este trabajo se concluye que al utilizarlas como sustitutos de cemento se cumplen dos objetivos: se puede reducir la cantidad de CP utilizado y se pueden utilizar materiales considerados como desechos agroindustriales para la construcción de obras de infraestructura.

Agradecimientos.

Se agradece el soporte de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y de la Secretaría de Educación Pública, PROMEP

Referencias

1. **Chennoufi, L. y Hoagland-Grey, H.** Directrices Para Fábricas de Cemento: Enfoque Para La Reconciliación del Financiamiento de Fábricas de Cemento con Objetivos Referentes al Cambio Climático. *Banco Interamericano de Desarrollo*. 2010. pág. 5.
2. **Escalante, J. I. y Navarro Gómez, A.** Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza. 2011, págs. 156-169.
3. **Ruchansky, A.** Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña como adición mineral al cemento Portland. 2013.
4. **Mustafa, Sahmaran, Ari y ChristianoHeru .** The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. 2006, Vol. 28, págs. 432–440.
5. **Malhorta , S. K.** Cementitious Binders from Agro-Industrial By-products. U.K. : s.n., 1993.
6. **Martirena Hernández , J. F. y Betancourt Rodríguez , J.** Pozzolanic properties of residues of sugar industries (first part). España : s.n., 2000, Vol. 50, págs. 71-72.
7. **ASTM-G3.** Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. 2004.
8. **ASTM-G5.** Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. 2004.
9. **ASTM-G59.** Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. 2003.
10. **ASTM-G106.** Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. 2004.
11. **ASTM-C150.** *Standard Specification for Portland Cement*. 2005.
12. **ASTM-C109.** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). 2002.
13. **NMX-C-061.** Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos. 2010.
14. **NMX-C144.** *ONNCCE Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba*. México : s.n., 2004.
15. **ASTM-C-597.** Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete. 2009.
16. **ASTM-G57.** Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method. 2012.
17. **ASTM-C293.** Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). 2010.
18. **ASTM-C1583.** Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). 2004.
19. **AISI.** American Iron and Steel Institute.
20. **Rodríguez Gómez, F.** Resistencia a la Polarización. [aut. libro] Depto. Ing. Metalúrgica. UNAM : s.n., 2000.

21. **Tres G. y E. Saborio.** Corrosion Rate Evaluation of de Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE- Costa Rica . *Portugaliae Electrochimica Acta.* 2004, págs. 345-360.
22. **Malhorta , S. K.** Cementitious Binders from Agro-Industrial By-products. . *BASIN NEWS.* U.K. : s.n., 1993.
23. **ASTM-C618.** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use In Concrete. 2003.
24. **ASTM-E-2465.** Método de Prueba para el Análisis de Aleaciones de Ni por Espectrometría de Fluorescencia por Rayos X.
25. **ASTM-C876.** Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia : s.n.
26. **CYTED-DURAR.** *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.* SEGUNDA. 1998, pág. 128.

EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE VARILLAS GALVANIZADAS COMO MATERIAL DE REFUERZO EN CONCRETO Y EXPUESTAS EN UN SUELO CONTAMINADO.

O. A Lara Delgado¹, J. L. Ramírez-Reyes², J. M. Malo Tamayo³, G. González Mancera⁴, A. Gutiérrez Franco⁵

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Calzada Adolfo Ruiz Cortines No. 455, Frac. Costa Verde Boca del Río, Veracruz, C.P. 94292, México.
2. Instituto de ingeniería, Universidad Veracruzana, UV, Av. Juan Pablo II S/N, Ciudad Universitaria, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México.
3. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Palmira s/n. Cuernavaca, Morelos, México.
4. UNAM. Depto. de Metalurgia. Ciudad Universitaria, México, D. F., C.P. 04360.
5. Centro de Investigación en micro y nanotecnología, Universidad Veracruzana, Av. Clz. Ruíz Cortines, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México.

RESUMEN

La resistencia del concreto en compatibilidad con el acero en la industria de la construcción, se vio beneficiado en puentes, aeropuertos y edificios. Las causas que afectan la integridad del concreto son: a) *químico* por la acidificación del concreto y b) *electroquímico* sobre el material de refuerzo. Para estudiar la agresividad del O₂ se expusieron varillas desnudas de acero al carbono a diferentes profundidades en el suelo y se midieron los potenciales de corrosividad. Varió la relación agua/cemento (A/C) y el recubrimiento de las varillas, medio de estudio (suelo proveniente de un relleno sanitario), cuatro bloques de concreto (IMPERCEM y CPC-30R). A estas probetas se les realizó monitoreo electroquímico (LPR, EIS), medición de potenciales y la resistividad del suelo. También se realizaron estudios de morfología superficial con el SEM y análisis químico elemental por EDS a las varillas desnudas.

Palabras clave: Agresividad, Corrosión en Concreto, Monitoreo electroquímico, Suelo contaminado.

ABSTRACT

The high resistance of concrete with steel support in the construction industry, benefited bridges, airports and buildings. The causes that affect the integrity of the concrete are a) chemical acidification concrete b) electrochemical on the reinforcement material. To study the aggressiveness of O₂ bare steel rods were exposed to carbon at different depths in the soil corrosivity potentials were measured. He changed the water / cement (A / C) and the coating of the rods, through study (soil from a landfill), four concrete blocks (IMPERCEM and CPC-30R) ratio. These specimens were subjected to electrochemical monitoring (LPR, EIS), measurement of potential and soil resistivity. Studies of surface morphology

by SEM and EDS elemental chemical analysis by the naked rods were also conducted.

Keywords: Aggressiveness, Corrosion concrete, Electrochemical monitoring, Polluted soil.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un problema del cual los metales no se pueden librar puesto que este proceso se efectúa en forma natural y con solo estar cualquier metal en contacto con el medio, dando resultado un cambio físico y químico en la superficie del mismo que anualmente genera gastos considerables en una diversidad de sectores de la sociedad y que están reportadas del 3 al 5% del PIB en países altamente industrializados Otero E. (2001).

Las características del suelo (electrólito) influyen sobre la corrosión en los aspectos de densidad, aireación, composición química y microorganismos Galvele y Royuela (1991), Jones (1996), West (1986) y Chantereau, (1985).

Los mismos componentes directo de fábrica de los cementos pueden hasta cierto punto producir reacciones no benéficas para el acero que conforma el concreto armado o bien desde algunos años a la actualidad esta fabricación ya no es la misma, bajo mismos procesos, estándares, etc. Rosario y Yaconos (2003), Winter y Nilson (1986), Ferguson (1972), Bresler (1981) e IMCYC (1974).

Los daños reportados a torres de alta tensión así como de ductos petroleros es algo que motivó a hacer el estudio, este problema en la actualidad es importante debido a que la protección anticorrosiva no siempre funciona, pues los conceptos establecidos en la normativa aplicada para el seguimiento e inspección de la corrosividad por la agresividad del suelo no cumple con la expectativa, a consecuencia que fue desarrollada para exposición de muestras en consideraciones atmosféricas donde el oxígeno está en su máxima concentración (ASTM-C876), como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Corrosividad de muestras de concreto expuestas a la atmósfera Norma ASTM-C876.

E_{corr} (mV)		Probabilidad de Corrosión	Condición
vs ECS	vs Cu-CuSO₄		
> - 220	> -278	10% que se presente	Pasiva
- 220 a - 270	-278 a -338	zona incierta	Activa o Pasiva
< - 270	< -338	90% que se presente	Activa

Las condiciones soterradas de exposición implican una baja considerable en la cantidad de oxígeno para la reducción catódica del proceso de corrosión, como es el caso de las estructuras de concreto reforzado en las patas metálicas de torres de transmisión enterradas en el suelo Malo y Salinas (2012).

La presente investigación se hizo con el fin de poder evaluar la agresividad del suelo de un relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, sobre muestras de concreto armado, utilizando dos tipos de cemento y varillas galvanizadas y de acero desnudo; sobre todo buscar correlaciones entre la composición química del suelo, la concentración de O₂, la resistividad del suelo, la agresividad a la matriz del concreto y sobre la corrosividad al material de refuerzo.

Para el presente trabajo se tuvo el apoyo de estudios electroquímicos así como de resistividad del suelo para poder hacer una comparación en la velocidad de corrosión.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Se prepararon electrodos con varillas desnudas (VD) y galvanizado en caliente (VGC). Las varillas utilizadas fueron de ½ pulgada y con una longitud de 10 cm y protegiendo ambos extremos con resina epoxica. Para preparar las probetas de concreto se procedió a medir y pesar los materiales agregados de arena, grava, cemento y agua para controlar la relación de agua-cemento deseada, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Cantidades de materiales y agregados para la elaboración 1 Kg de las muestras de concreto.

Identificación	A/C	Cemento	Agua	Arena	Grava
CPC30R A/C1	0.57	0.800	0.460	1.7284	1.252
CPC30R A/C2	0.75	0.950	0.610	2.3045	1.669
IMPERCEM A/C1	0.65	0.770	0.480	1.970	1.600
IMPERCEM A/C2	0.78	1.6025	1.2141	3.7500	4.7492

Para el monitoreo electroquímico se utilizó un potencióstato marca ACM modelo Field Machine, con el cual se aplicaron los métodos electroquímicos de Resistencia de polarización lineal (LPR) y la medición del potencial de corrosión. El seguimiento electroquímico se aplicó desde las primeras 12 horas del proceso de fraguado para cada uno de los concretos armados y después a los (1, 7, 28, 44, 80, 87 y 155 días). Las mediciones de resistividad se hicieron con el método Wenner de 4 puntas utilizando un medidor Mac Miller modelo Nilsson 400.

El estudio se dividió en las siguientes etapas:

- a) Etapa de curado del concreto por los primeros 07 días.
- b) Etapa de exposición de las muestras de concreto en suelos contaminados a nivel laboratorio en condiciones de alta oxigenación, hasta los 28 días de fraguado.
- c) Etapa de exposición de las muestras de concreto en suelos contaminados en campo a 1m de profundidad a partir de los 28 días de fraguado.

Un segundo experimento se desarrolló para la medición de potenciales de corrosión de varillas desnudas que se introdujeron al suelo a diferentes profundidades, éstas para poder evaluar el efecto de la concentración de oxígeno

en el medio sobre el proceso de corrosión en suelos. Además a estos sustratos se les realizaron mediciones electroquímicas de curva de polarización, resistencia a la polarización lineal y los estudios de morfología superficial mismos que se realizaron con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM7000P y la composición química por EDS sobre la superficie de las varillas expuestas.

RESULTADOS

Experimento 1:

Los resultados se muestran en la figura 1(a) con los potenciales de corrosión (E_{corr}) para el cemento CPC30R y en la figura 1(b) para el cemento IMPERCEM. El efecto de la relación A/C se puede observar que para las varillas galvanizadas (VGC) el E_{corr} se mantuvo cercano a los -400 mV para el cemento CPC30R y con poca influencia de la relación A/C, para el IMPERCEM el E_{corr} se mantuvo cercano a los -500 mV y se observó mayor efecto entre la relación A/C, en tanto para las varillas desnudas (VD) el E_{corr} se mantuvo entre -100 y -120 mV entre la relación A/C para el CPC30R y entre los -120 y -160 mV entre ambas A/C para el IMPERCEM. El efecto de la relación A/C se puede interpretar en función de la porosidad que cada tipo de cemento es capaz de producir y que de acuerdo al fabricante el CPC30R genera una matriz con mayor porosidad que en el IMPERCEM, debido a los productos poliméricos que le proveen impermeabilidad. Entonces a mayor A/C más negativo se obtiene el E_{corr} y la diferencia entre el Zn y el Fe se observó ligeramente mayor para el IMPERCEM.

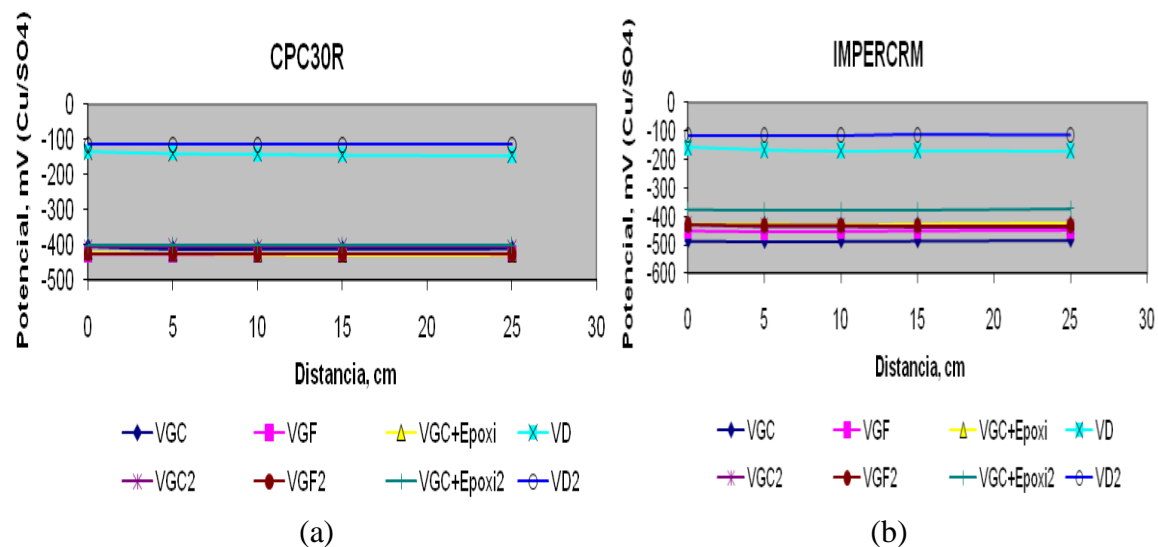


Figura 1. Potenciales de corrosión de las varillas galvanizadas a diferente relación A/C para cada tipo de cemento utilizado.

En la figura 2 se muestran las mediciones de resistividad mostrando variabilidad con el tiempo de exposición tanto para las muestras de concreto como para el suelo contaminado, lo cual se puede atribuir a la cantidad de humectación lo cual depende de las condiciones climáticas. Sin embargo se observó que para el cemento CPC30R la resistividad se incrementó más del doble para la A/C=2, en tanto que para el IMPERCEM la medición se observó muy inestable y alternante sin mostrar claridad en el dominio de la relación A/C. Gósta Wranglen (1985), propuso la correlación de la ecuación 1 para estimar la velocidad de corrosión en micras /año para suelos a pH ≈ 6 y que se muestra a continuación:

$$(\rho + 300) * VC = 40,000 \quad (1)$$

De aquí se puede estimar la velocidad de corrosión correspondiente a cada tipo de concreto, observándose A/C=1 de 2.18 mm/año y A/C=2 de 0.833 mm/año para el CPC30R y A/C=1 de 0.995 mm/año y A/C=2 de 1.32 mm/año, en tanto que para el suelo fue de 0.00407 mm/año.

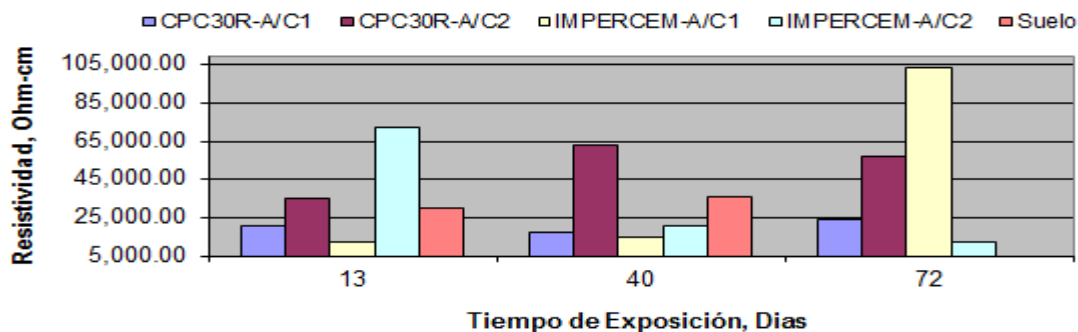


Figura 2. Resistividad de las muestras de concreto y del suelo contaminado.

Las mediciones de corrosividad se hicieron aplicando la técnica LPR para las varillas galvanizadas y desnudas respectivamente y se muestran en la figura 3(a) para el cemento CPC30R y en la figura 3(b) para el cemento IMPERCEM. Para el galvanizado la corrosividad se mantuvo más estable para el cemento CPC30R y en un valor promedio cercano a 0.01 mm/año, en tanto que el IMPERCEM se mantuvo más inestable y en un intervalo entre 0.005 y 0.5 mm/año. Las varillas desnudas mostraron tendencias muy similares con valores entre 0.01 y 0.1 mm/año. Con respecto al efecto de la relación A/C, se observó que la A/C=2 mostró mayor inestabilidad y con mayor corrosividad que la A/C=1 para el CPC30R, en tanto que para el IMPERCEM la tendencia fue de mayor tendencia corrosiva para la A/C=1. Para las varillas desnudas la A/C=1 fue de mayor corrosividad para el CPC30R y para el IMPERCEM no se observó dominancia atribuible a la relación A/C.

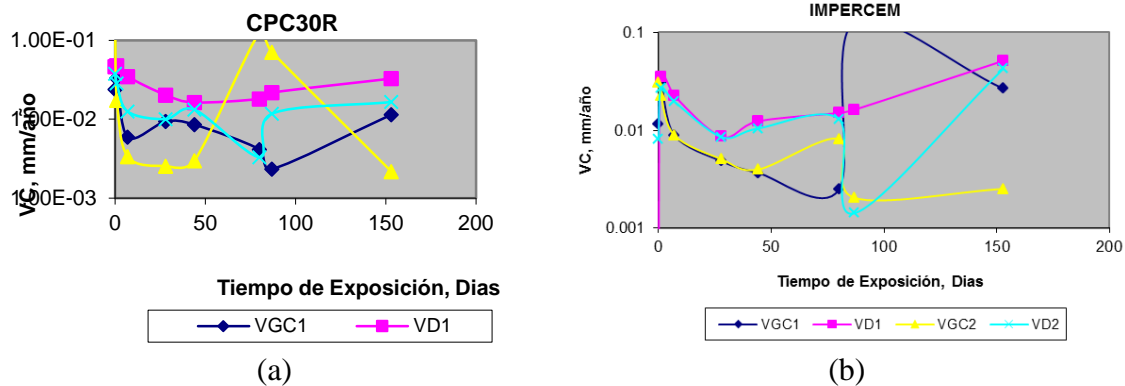


Figura 3. Corrosividad de las varillas galvanizadas y desnudas embebidas en concreto y expuestas en suelo contaminado.

Experimento 2:

Los potenciales de corrosión se muestran en la tabla 3, observándose que a hasta los 70 días de inmersión en el suelo a 25 cm de profundidad el comportamiento es inestable e inconsistente de -310 ± 30 mV, en cambio a 50 cm de profundidad la tendencia fue hacia la zona catódica de -150 mV a partir de los -238 mV iniciales. A 1 m de profundidad el E_{corr} se mantuvo muy estable, rondando los -305 mV y con poca variación hacia la zona anódica, lo cual indica la limitación de la reducción catódica del O_2 a esa profundidad.

Tabla 3. Potenciales de corrosión de las varillas desnudas en suelo contaminado

Profundidad, cm	12 días	40 días	55 días	64 días	70 días
25	-274	-341	-342	-304	-298
50	-238	-317	-339	-354	-371
100	-316	-314	-314	-298	-295

En la figura 4 se muestran las curvas de polarización que se obtuvieron de las varillas desnudas a diferente profundidad en el suelo contaminado, observándose la limitación del proceso de reducción catódica del oxígeno debido a la baja permeabilidad del suelo para la difusión del mismo e incrementándose el efecto a mayor profundidad. El proceso de corrosión se ve favorecido por la reacción de disolución metálica, la cual no presenta limitación en la zona anódica de la curva.

En la figura 5 se muestran los resultados de la velocidad de corrosión por R_p para las varillas a diferentes tiempos de exposición en el suelo contaminado, observándose como la VC a 25 cm de profundidad tiene un incremento constante con el tiempo, en tanto que a los 50 cm de profundidad la VC tuvo un ligero decremento con el tiempo de exposición. A 1 m de profundidad la VC registró mucho menos actividad, acentuándose el efecto con el tiempo de exposición.

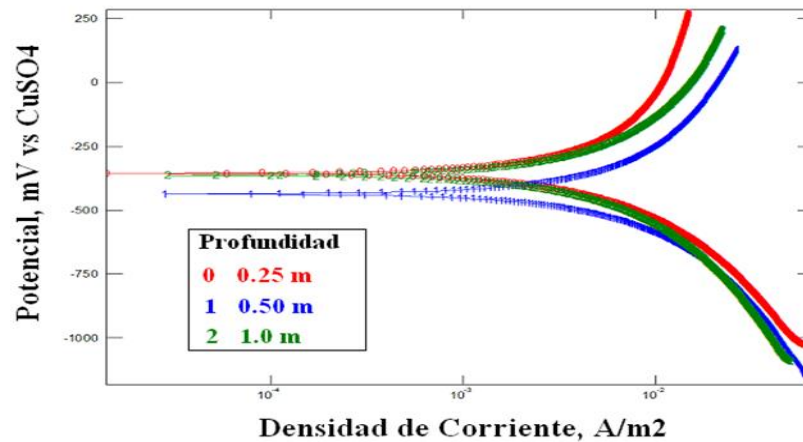


Figura 4. Curvas de polarización de las varillas desnudas expuestas en suelo.

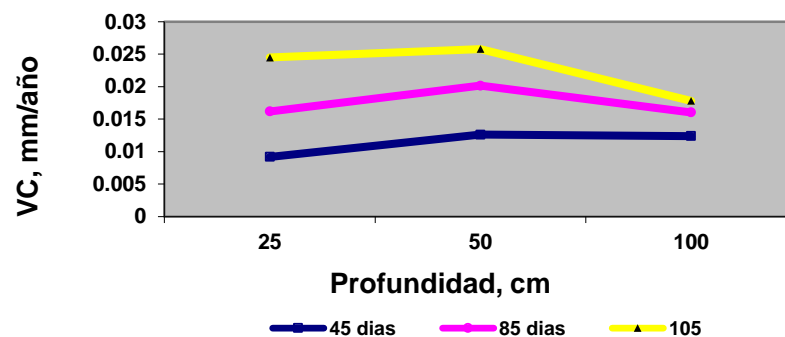


Figura 5. Corrosividad de las varillas desnudas expuestas en suelo y el tiempo de exposición

En la figura 6 se muestran las morfologías de las varillas expuestas a diferentes profundidades y en la tabla 4 la composición química registrada, observándose que en las morfologías no hay una característica predominante en las capas de productos de corrosión formadas, en cambio en la tabla de elementos se registró una mayor cantidad de oxígeno a mayor profundidad, lo cual puede significar que el O_2 está combinado a mayor profundidad, limitando la cantidad del oxígeno disuelto en la proximidad de la superficie metálica. También se detectó una disminución del Ca con la profundidad, lo cual se puede interpretar como un fenómeno de migración hacia la superficie del suelo para reaccionar con el CO_2 de la atmósfera. Los agentes agresivos como Cl y S no presentan significancia para incrementar el proceso de corrosión en el tiempo de evaluación.

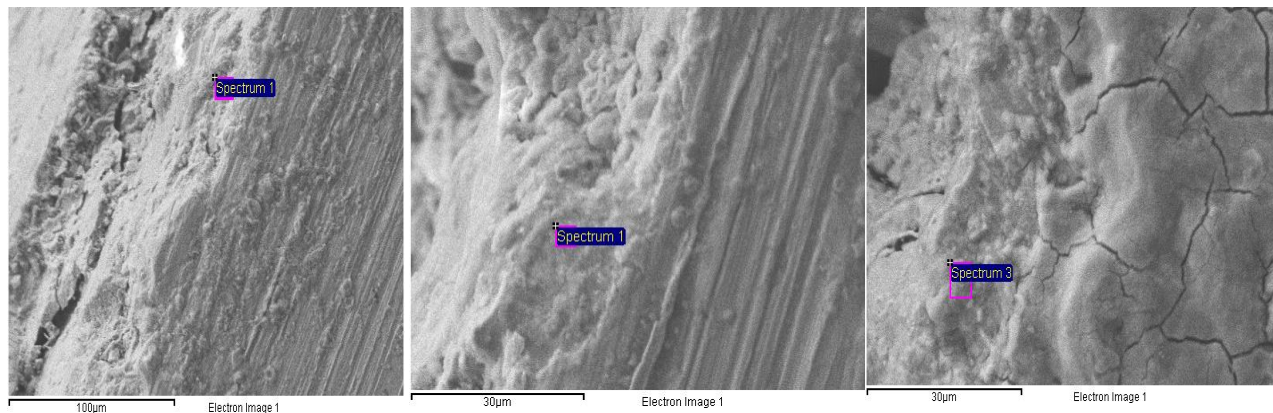


Figura 6. Microfotografías de las varillas expuestas a 0.25, 0.50 y 1 m de profundidad.

Tabla 4. Composición química en % en peso de las varillas desnudas expuestas en suelo.

Profundidad	C	O	Al	Si	Na	Ca	Cl	S	Fe
25 cm	15.06	36.81	0.39	1.2	---	2.50	---	0.26	43.78
50 cm	55.62	40.71	0.65	1.44	1.25	0.97	0.41	0.69	12.28
100 cm	13.92	45.09	0.27	0.87	---	0.58	---	0.24	41.01

DISCUSIÓN

La relación agua-cemento tiene un marcado efecto sobre las propiedades del concreto reforzado, el grado de porosidad del concreto influye en la difusividad y penetración de agentes agresivos mismos que pueden hacer entrar en activación al metal de refuerzo IMCYC (1974). Otro aporte negativo en el grado de porosidad por la relación A/C es que el concreto se hace menos resistente mecánicamente hablando Ferguson (1972). Entonces se puede deducir que el material de refuerzo está o no en un estado de actividad, que puede en cierto momento poner en riesgo la integridad del concreto pues una vez que los productos de corrosión se forman sobre la superficie metálica, estos ejercerán una presión descomunal sobre el concreto que los rodea, tales fuerzas son capaces de provocar grietas que lo fragilizan, perdiendo éste sus propiedades mecánicas Ávila y Genescá (1996).

En un segundo experimento, se demostró que el concreto muestra diferentes mecanismos de corrosión si se expone a la atmósfera o si está soterrado y más todavía si hay agentes contaminantes en contacto con el medio de exposición. Entonces si hay que considerar el efecto que tiene el O₂ disuelto para controlar el proceso de corrosión en condiciones enterradas, requiriendo una normativa para

establecer nuevos límites de corrosividad para el concreto reforzado que pueda ser de utilidad en las diversas aplicaciones en campo Malo y Salinas (2012).

CONCLUSIONES

- Se demostró que la relación de agua/cemento es un factor importante para controlar el grado de porosidad presente en el concreto, afectando su resistencia a la corrosión conforme se incrementa en ambos tipos de cemento.
- Como se esperaba el acero galvanizado presenta una ligera mayor resistencia a la corrosión con respecto al acero desnudo, sin embargo con el tiempo de exposición el acero al carbón tiende a pasivarse y el zinc no, por lo tanto se observa una tendencia hacia valores similares.
- Con los métodos electroquímicos se pudo demostrar que a medida que se avanza al interior del suelo la cantidad de oxígeno disuelto en el mismo disminuye.
- A la cantidad de oxígeno disuelto en el suelo se le puede atribuir un alto grado de dependencia en el control del proceso de corrosión.

AGRADECIMIENTO

A la universidad Veracruzana así como al instituto de ingeniería en especial al cuerpo de anticorrosión por haber brindado apoyo al trabajo al igual que al centro de Micro y nanotecnología (MICRONA).

REFERENCIAS

- Ávila, J. y Genescá, J., “Más allá de la herrumbre”. La ciencia desde México, segunda reimpresión 1996. México.
- Bresler B., “Concreto reforzado en ingeniería”, México D. F, 1981.
- Instituto mexicano del cemento y del concreto, “Reglamento de las construcciones de concreto reforzado”, México 1974.
- Jones, D. A., “Principles and prevention of corrosion”, 2ª ed., EUA, Prentice Hall, 1996.
- Chantereau, J., “Corrosión bacteriana”. 2ª edición. México: Limusa, 1985.
- Ferguson P. M., “Teoría del concreto reforzado” 1972.
- Galvele, J. R. y Royuela J. J., Corrosión y protecciones metálicas, Vol. 1. Consejo superior de investigaciones científicas. Nuevas tendencias. Vol. 15, Madrid, 1991.
- Genescá, J., “Más allá de la herrumbre III. Corrosión y medio ambiente”. Primera edición. México, 1994.
- González J. A., “Control de la corrosión estudio y medida por técnicas electroquímicas”. CSIC, 1989.

- Malo J. M. y Salinas V., Informe IIE "Corrosión en patas de torres de transmisión Cuernavaca, México, 2012.
- Otero H. E., "Corrosión y degradación de materiales", España, 2001.
- Rosario Francia S. y Yacono Llanos, J. C., Materiales: la corrosión, su tradición y alcances. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr* , ene./jun. 2003, vol.6, no.11, p.71-77. ISSN 1561-0888
- West, J. M., "Corrosión y oxidación, Fundamentos". Primera edición. México: LIMUSA, 1986.
- Winter G. y Nilson A. H., "Proyecto de estructuras de hormigón" México 1986.
- Wranglen Gôsta, An introduction to corrosion and Protection of metals, Chapman and Hall, New York, 1985.

CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN CONCRETOS SUSTENTABLES INMERSOS EN SOLUCION AL 3.5% DE NaCl

G. Santiago-Hurtado¹, P. Balderas-Hernández⁴, G. Roa-Morales⁴, C. Gaona-Tiburcio⁵,
F. J. Olguin Coca⁶, A. Borunda-Terrazas⁷, E. González-Viveros³, M. A. Baltazar-Zamora²

¹Universidad Veracruzana, FIME, Doctorado en Ingeniería, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. G. Aguirre Beltrán S/N, Lomas del Estadio, Xalapa, Veracruz, México, CP 91000, miguelbz_75@yahoo.com, mbaltazar@uv.mx

³Facultad de Estadística e Informática - Xalapa, Universidad Veracruzana, Av. Xalapa Esq. M. Avila Camacho, Xalapa, Veracruz, México.

⁴Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Carretera Toluca-Atzacomulco, km 14.5, Unidad El Rosedal, C.P. 50200, Toluca, Estado de México, México.

⁵Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, FIME, UANL

⁶Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo. C. P. 42184

⁷Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C. (CIMA), Chihuahua, Chih., México

RESUMEN

Diversas investigaciones han demostrado que los daños por corrosión de las armaduras se encuentran dentro de las tres primeras causas de deterioro de las estructuras de concreto. Para la presente investigación se realizaron tres mezclas de concreto sustentable, la primera fue elaborada con 100% de cemento CPC 30R, la segunda con 80% de cemento CPC 30R y 20% de humo de sílice y la tercera con 80% de CPC 30R y 20% de fly ash, las mezclas fueron diseñadas de acuerdo al método del ACI 211.1, para una resistencia a la compresión $f'c=300$ kg/cm²; se elaboraron especímenes en los cuales se embebieron barras de acero inoxidable 304 y acero 1018, ambas de 3/8" de diámetro, para evaluar la corrosión electroquímica debida a la exposición a un medio marino simulado, solución al 3.5% de NaCl, los resultados muestran que el mejor desempeño lo presentan los concretos elaborados con un 20% de humo de sílice y reforzados con el acero inoxidable 304 indicando los potenciales de E_{corr} una probabilidad de corrosión del 10% de acuerdo a la norma ASTM C876-09.

Palabras clave: Concreto Sustentables, Corrosión, Medio marino, Fly Ash, Humo de Sílice

ABSTRACT

Research has shown that corrosion damage of the armor are among the three leading causes of deterioration of concrete structures. For this investigation three mixtures of sustainable concrete were made, the first was made with 100% cement CPC 30R, the second with 80% cement CPC 30R and 20% silica fume and the third with 80% CPC 30R and 20% of fly ash, the mixtures were designed according to ACI 211.1 method, for compressive strength $f'c = 300$ kg/cm²; specimens in which stainless steel bar steel 304 and 1018, both 3/8 "diameter were embedded to evaluate the electrochemical corrosion due to exposure to a simulated marine environment, solution 3.5% NaCl were made, the results show that the best performance is found with concrete prepared with 20% of silica fume and reinforced with stainless steel 304 potential E_{corr} indicating a probability of corrosion of 10% according to the ASTM C876-09 standard.

Keywords: Sustainable Concrete, Corrosion, Marine environment, Fly Ash, Silica Fume

INTRODUCCIÓN

Diversas investigaciones han demostrado que los daños por corrosión de las armaduras se encuentran dentro de las tres primeras causas de deterioro de las estructuras de concreto. En México no se disponen de cifras que nos den una idea del problema, sin embargo, posee más de diez mil kilómetros de costas y en ellas hay numerosas obras susceptibles de sufrir daños por corrosión [1-3]. Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio [4].

Los iones cloruro son la principal causa de la corrosión del acero de refuerzo, dichos iones pueden ser aportados por los componentes de la mezcla de concreto (agregados pétreos, cemento, agua, aditivos), o ya sea porque penetren desde el exterior por estar situado el concreto en un medio marino, o porque provengan de las sales de deshielo. Estos iones pueden causar severos daños a las estructuras de concreto reforzado [5-7].

De lo anteriormente mencionado surge la inquietud y la importancia de estudiar el comportamiento electroquímico del acero inoxidable y acero 1018 como aceros de refuerzo, embebidos en concretos elaborados con desechos industriales como sustituto parcial de cemento, buscando una alternativa de concreto reforzado de gran durabilidad en un ambiente contaminado con cloruros y que al mismo tiempo sea un concreto que ayude a la disminución de contaminación ambiental, ya sea por la prolongación de su vida de servicio o por el empleo de productos de desecho como sustituto parcial de alguno de sus compuestos como lo es el cemento.

El objetivo del presente trabajo es determinar la probabilidad y velocidad de corrosión de acero inoxidable y acero 1018 embebidos en concretos elaborados con desechos industriales, y expuesto a solución de cloruro de sodio.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la presente investigación se realizaron tres mezclas de concreto, la primera fue elaborada con 100% de cemento CPC 30R, la segunda con 80% de cemento CPC 30R y 20% de humo de sílice y la tercera con 80% de CPC 30R y 20% de fly ash, todas las mezclas fueron diseñadas de acuerdo al método del ACI 211.1 [8], para una resistencia a la compresión $f'c=300$ kg/cm²; para el arreglo experimental se elaboraron especímenes en los cuales se embebieron dos varillas, una de acero inoxidable y otra de acero 1018, ambas de 3/8" de diámetro, además en el centro se colocó una lámina de acero inoxidable la cual funciona como electrodo auxiliar (figura 1).

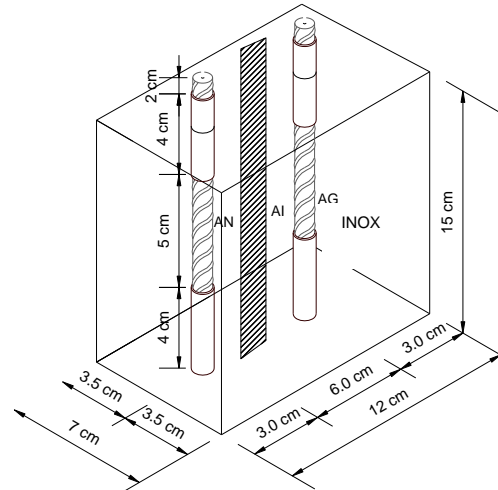


Figura 1. Dimensiones de los especímenes de prueba.

Diseño y proporcionamiento de la Mezcla de Concreto

Como anteriormente se mencionó el método empleado para la elaboración de las mezclas de concreto fue el del ACI 211.1; el cual establece la caracterización física de los agregados pétreos como base del proporcionamiento, la cual se debe realizar como lo establece la Normativa ONNCCE. Teniendo los resultados de dicha caracterización se procede a la determinación de las cantidades necesarias de material para un metro cubico de concreto; en la siguiente tabla se muestran las cantidades empleadas en cada una de las mezclas.

Tabla 1. Dosificación de la mezcla de concreto.

Contenido (Kg/m ³)	Concreto con $f'c=300 \text{ kg/m}^3$		
	Cemento CPC 30R	Humo de silice	Fly ash
Cemento	410	328	328
Sustituto parcial	0	82	82
Agua	205	205	205
Agregado grueso	890	995	995
Agregado fino	838	562	562

Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

En la figura 1, se pueden observar las dimensiones de los especímenes en estudio, y el arreglo de las barras de acero embebidas en él, teniendo la dosificación de los materiales a emplear y el diseño de los especímenes se procede a la elaboración de estos, la cual se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NMX-C-159-2004 [9]. Los especímenes después de ser elaborados se almacenaron durante 24 horas para posteriormente ser sometidos a la etapa de curado, la cual consta de 28 días y se realizó de acuerdo a la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999 [10]. Para su correcta

identificación fue necesario asignarles una nomenclatura en función de los parámetros de diseño, esta se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Nomenclatura de especímenes de prueba.

<i>Nomenclatura empleada</i>		
4AI	4BI	4CI
4AN	4BN	4CN

Significado:

- ❖ El número 4 indica el medio de exposición (solución con 3.5% de NaCl).
- ❖ El segundo término indica el cemento o sustituto parcial empleado en el concreto A (CPC 30R), B (20% de Humo de sílice) y C (20% de Fly Ash).
- ❖ El tercer término indica el refuerzo I (Acero inoxidable), N (Acero 1018).

Terminada la etapa de curado, en función de la nomenclatura asignada, los especímenes son colocados en el medio de exposición correspondiente en el cual se lleva a cabo su evaluación electroquímica, en este caso son sometidos en una solución de 3.5% de NaCl.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Potencial de Corrosión

El monitoreo de potencial de corrosión de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C876-09 [11] así como su interpretación, solo agregando un rango más de acuerdo a la literatura [12], ver tabla 3.

Tabla 3. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

<i>Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO4</i>	<i>Probabilidad de Corrosión</i>
< - 500	Corrosión Severa
< -350	90% de Prob. de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Prob. de Corrosión

La figura 2 muestra el comportamiento de los potenciales de corrosión de los especímenes reforzados con acero inoxidable 304, se puede observar que los tres especímenes reportan un comportamiento que indica un 10% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C 876-09.

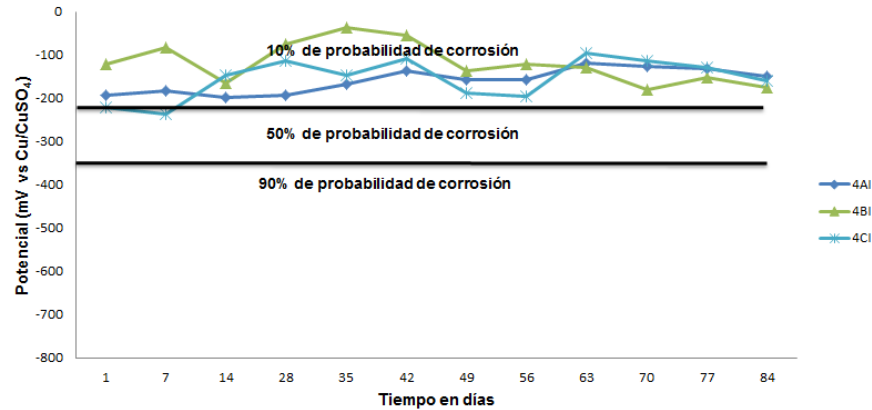


Figura 2. E_{corr} del acero inoxidable 304 en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

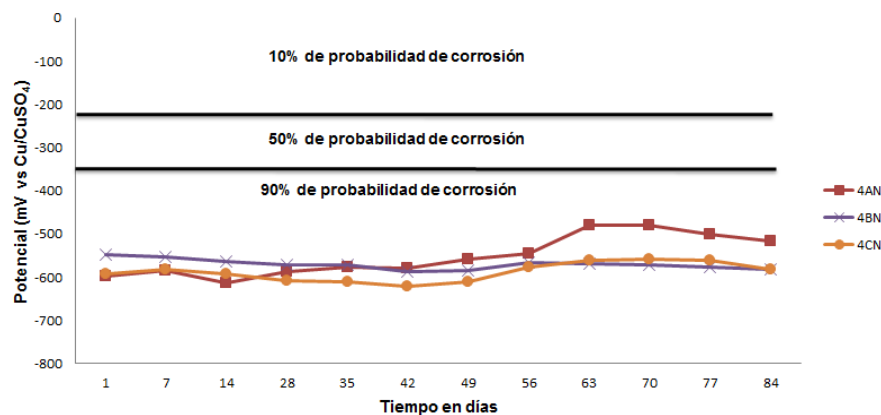


Figura 3. E_{corr} del acero inoxidable en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

En la figura 3 nos permite observar como los especímenes de concreto elaborados con 20% de Humo de Sílice, así como el elaborado con 20% de Fly Ash no reportan ningún beneficio contra la corrosión del acero 1018 embebidos en ellos al ser expuestos en un medio marino simulado, como lo es una solución al 3.5% de NaCl como medio agresivo, presentando los tres especímenes en este tiempo de exposición valores de E_{corr} que indican un 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C876-09 y de acuerdo rango adicional según la literatura sería un nivel de corrosión severa.

La figura 4 nos permite evidenciar la diferencia entre el uso del acero inoxidable 304 y el acero 1018 al ser embebidos en concretos expuestos a un medio marino simulado como el de la presente investigación. Presentando un comportamiento totalmente opuestos para ambos refuerzo, siendo el de mejor desempeño el acero inoxidable 304.

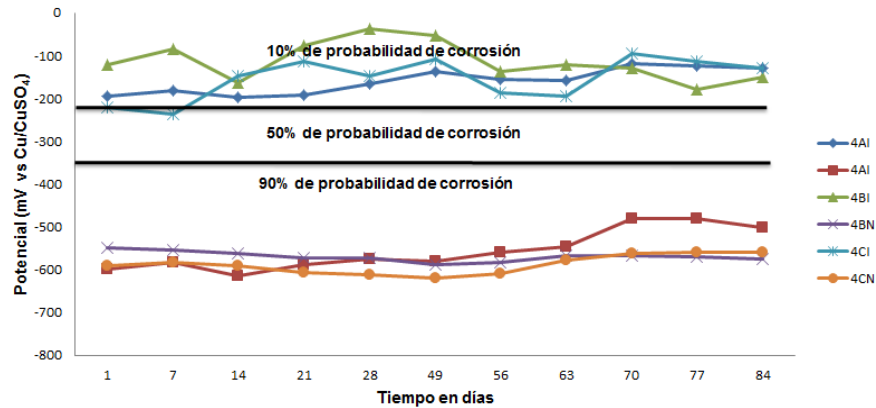


Figura 4. E_{corr} del acero inoxidable y 1018 en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

Cinética de Corrosión mediante LPR

La resistencia de polarización, es una técnica muy utilizada para el monitoreo de la velocidad de corrosión instantánea en planta. El criterio que se empleó para evaluar el nivel de corrosión fue el que propone el Manual de la Red DURAR [13], utilizando un barrido típico con rango de ± 20 mV alrededor del E_{corr} , con velocidad de barrido de 0.1 mV/seg. El criterio empleado indica cuatro niveles de corrosión; que van desde un nivel despreciable hasta un nivel de muy elevada corrosión, los rangos y magnitudes se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Nivel de Corrosión de acuerdo a la I_{corr} . [13]

Velocidad de Corrosión (I_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de Corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5-1	Elevada
> 1	Muy Elevada

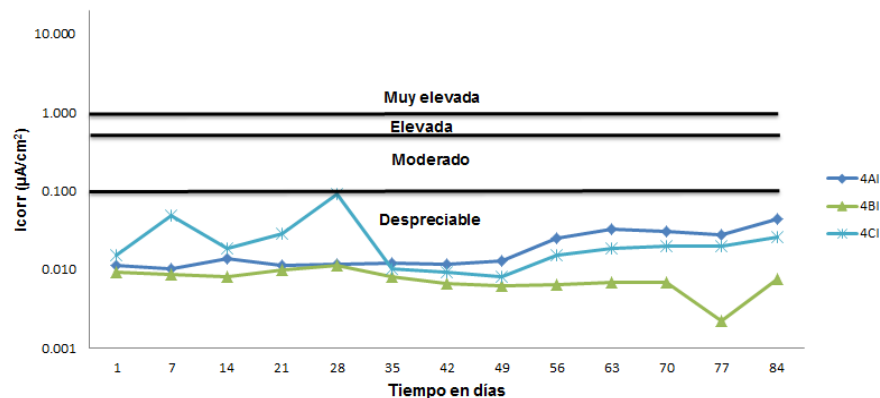


Figura 5. I_{corr} del acero inoxidable en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

Al analizar los resultados de la cinética de corrosión que muestra la figura 5, observamos como los valores de i_{corr} de los tres especímenes indican un nivel de corrosión despreciable, teniendo el mejor desempeño el espécimen elaborado con un 20% de humo de sílice, con valores por debajo de $0.01 \mu A/cm^2$.

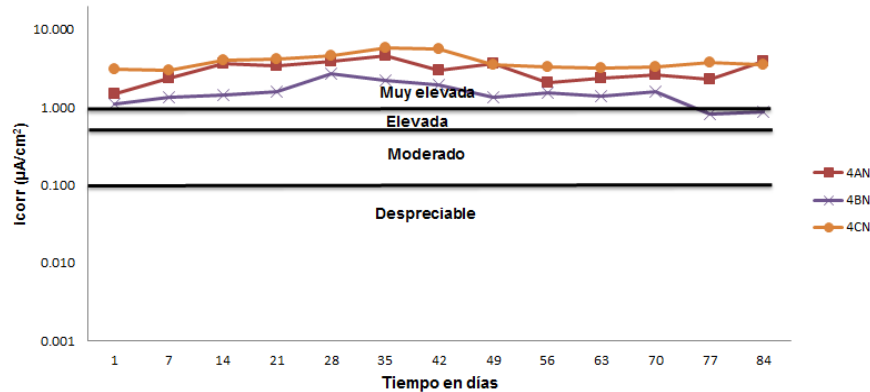


Figura 6. i_{corr} acero 1018 en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

A diferencia de lo presentado por los especímenes con acero inoxidable como refuerzo, en los especímenes con acero 1018 se puede ver el efecto agresivo del medio marino al que estuvieron expuestos y la poca resistencia a dicho medio de los tres concretos, presentando como se observa en la figura 6 un nivel de corrosión muy elevada desde el momento de exposición a dicho medio. espécimen .

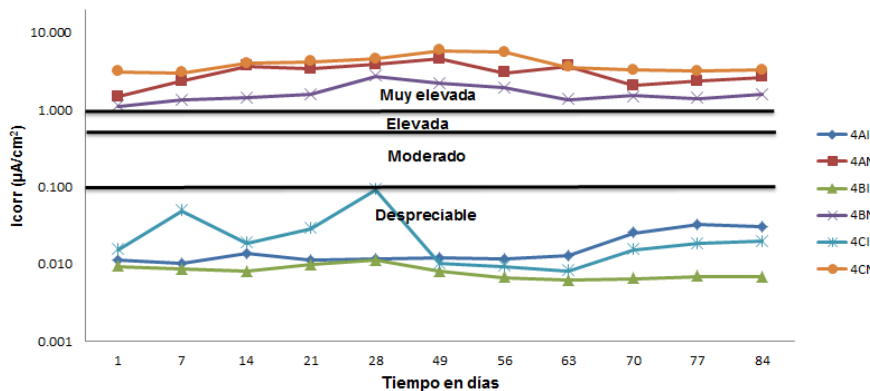


Figura 7. i_{corr} del acero inoxidable y 1018 en especímenes expuestos en solución de 3.5% de NaCl.

Al analizar la figura 7 en donde se comparan todos los especímenes con acero inoxidable y con acero 1018, podemos observar el gran beneficio de utilizar el acero inoxidable 304 como refuerzo, esto al menos hasta este tiempo de exposición, cabe señalar que el espécimen que presenta valores de menor magnitud es el elaborado con el 20% de humo de sílice, concordando con el comportamiento del

CONCLUSIONES

En general se puede observar el excelente desempeño del acero inoxidable en comparación del acero 1018, así también podemos afirmar que ambos aceros se ven favorecidos por el tipo de concreto, siendo el concreto elaborado con 80% de cemento CPC 30R y 20% de humo de sílice el que brinda una mayor protección al acero de refuerzo. Con lo anterior es claro que el humo de sílice a pesar de ser un desecho industrial puede ser empleado como sustituto parcial que en conjunto con el acero inoxidable generan lo que el autor denomina un concreto sustentable, porque su elaboración implican un gran ahorro al sustituir una parte del cemento portland que implica una disminución en materia prima y gran disminución en el consumo de energía que requiere su fabricación, además de que dicho concreto sustentable también incrementa la durabilidad del mismo contribuyendo a incrementar la vida útil de las estructuras.

AGRADECIMIENTOS

G. Santiago Hurtado expresa su agradecimiento a CONACYT de México por la Beca Doctoral otorgada, así también a Asphaltpave S.A. de C.V. por la asistencia técnica.

REFERENCIAS

- [1] M. Maslehuddin y et al., 2007. Construction and Building Materials: “Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion”, Vol. 21, Pag. 1825–1832.
- [2] Dimitri V. Val y et al., 2003, Structural Safety: “Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments”, Vol. 25, Pag. 343–362.
- [3] G. Santiago-Hurtado, M.A. Baltazar-Zamora, A. Galindo D, J.A. Cabral M, F.H. Estupiñan, P. Zambrano Robledo, C. Gaona-Tiburcio, Int. J. Electrochem. Sci., 2013, 8, 8490.
- [4] L. A. Francisco Guzmán, G. Santiago-Hurtado, M.A. Baltazar-Zamora, presented at SMEQ 2012-5th Meeting of the Mexican Section of the ECS, Toluca, Estado de México, México , 11 – 15 de Junio del 2012, pp.
- [5] M.A. Baltazar-Zamora, Tesis Doctoral, CIMAV, Chihuahua, México, 2005.
- [6] A.I.M. Ismail y et al., 2009. Applied Clay Science: “Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel”, Vol. 42, Pag. 356–362.
- [7] Santiago Hurtado G. 2013. “Evaluación de la Corrosión de Concreto Expuesto a un Suelo SP de Ambiente Marino Contaminado con NaCl y MgSO₄”, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana.
- [8] ACI, 2004. Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1, p. 29. Ed. IMCYC, México.
- [9] NMX-C-159-ONNCCE-2004, “Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio”, México.
- [10] NMX-C-403-ONNCCE-1999, “industria de la construcción-concreto hidráulico para uso estructural”, México.
- [11] ASTM C 876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, ASTM Volume 03.02, 2009.
- [12] H. Won-Song and V. Saraswathy, “Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review” International Journal of Electrochemical Science, Vol.2, Pág. 1-28, Rep. de Serbia, 2007.
- [13] Red DURAR, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado, CYTED Program, Rio de Janeiro, (1997).

IMPLEMENTACIÓN DE UNA TÉCNICA QUE SIMULA LA CORROSIÓN POR CARBONATACIÓN PARCIAL DEL CONCRETO REFORZADO

J.O. Rivera-Corral¹, F. Deby², G. Fajardo¹, G. Arliguie²

1. Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.
2. LMDC, UPS, INSA, Université de Toulouse, 135, Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex 4, France.

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental de corrosión acelerada, realizado en laboratorio. La fase de iniciación de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto toma años en aparecer, si ésta es acelerada, los estudios pueden ser enfocados en la cinética de corrosión. La eliminación de ésta fase se llevó a cabo en especímenes fabricados con concreto de relación $a/c=0.65$, usando como refuerzo; acero convencional (AC), acero galvanizado (AG) o acero con tratamiento térmico (ATT), esto en una cámara de carbonatación, a 50% CO_2 , 50% HR y 20°C, hasta su carbonatación total. Después de ello, se colaron especímenes compuestos por dos cilindros concéntricos, en el interior el cilindro previamente carbonatado, en el exterior otro con cuatro varillas embebidas del mismo tipo de acero. Una vez colados se conectó la varilla activa con las varillas pasivas. Así, la prueba simula de manera macro, las micro-celdas de corrosión generadas durante el proceso de corrosión uniforme, esto mediante el aumento de la relación cátodo/ánodo.

Palabras clave: corrosión galvánica, carbonatación, acero convencional, acero galvanizado y acero con tratamiento térmico.

ABSTRACT

An experimental study of accelerated corrosion, conducted in the laboratory was carried out. The initiation phase of corrosion of reinforcing steel embedded in concrete takes years to appear, if it is accelerated, studies can be focused on the kinetics of corrosion. The elimination of this phase was carried in concrete specimens made with $a / c = 0.65$, using as reinforcement; conventional steel (AC), galvanized steel (AG) or heat treated steel (ATT), this in a carbonation chamber, 50% CO_2 , 50% RH and 20 °C until complete carbonation. Thereafter, specimens were cast composed of two concentric cylinders inside the cylinder previously carbonate, on the other outer four rods embedded in the same type of steel. A cast rod once active with passive rods connected. The test simulates the macro, micro-cells corrosion generated during uniform corrosion, that by increasing the cathode/anode connection.

Keywords: corrosion galvanic, carbonatation, conventional steel, galvanized steel and thermo-treated steel.

INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero en concreto se considera como uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad de las obras civiles de un país. La calidad del conjunto, acero-concreto, se debe principalmente a la estabilidad física y química de las fases que forman la pasta del cemento, y del papel de la capa protectora que ejerce el concreto contra el desarrollo de la corrosión del acero de refuerzo [1]. La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de esta capa pasivante. Ésta tiene dos causas principales: La presencia de una cantidad suficiente de cloruros, y la disminución de la alcalinidad del concreto cuando este reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente, principalmente con el dióxido de carbono (CO_2) [2].

En lo que respecta a la carbonatación, este fenómeno en sí no provoca el deterioro del concreto, pero acidifica el pH de la solución de los poros en el concreto [3]. Lo que provoca el rompimiento de la capa pasiva del acero de refuerzo, la corrosión se inicia [4].

Por su parte, la penetración del CO_2 en el recubrimiento del concreto es un proceso complejo, gradientes en el contenido de humedad [5], excesivas tensiones [6], la calidad del recubrimiento del concreto y la ubicación del acero de refuerzo en una estructura, son factores que afectan la progresión de la carbonatación. Consecuentemente, el frente de carbonatación no es uniforme, lo que significa que incluso algunas áreas locales de la estructura, no son afectadas al mismo tiempo. Como el refuerzo está compuesto por una gran cantidad de varillas de acero usualmente unidas, esta situación puede conducir a una macrocelda de corrosión desarrollada entre las diferentes partes de la superficie del acero, creando diferentes potenciales de equilibrio electroquímico. Así, cuando una estructura de concreto reforzado se carbonata parcialmente, en las partes carbonatadas el acero tiene potenciales electroquímicos más negativos, y en las partes no carbonatadas, presenta potenciales más positivos [7]. Dicha circunstancia produce a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la varilla y una cantidad significativa de óxidos, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto que agrietan el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto produciendo manchas en el acabado.

Por otro lado, existen diversos aceros que han sido modificados superficialmente, unos buscando mitigar o prolongar la vida útil de las estructuras reforzadas, y otros disminuir los costos de producción. Entre ellos están, el acero galvanizado (AG) y acero con tratamiento térmico (ATT). Así, en este trabajo se evaluaron mediante la implementación de una técnica de corrosión acelerada estos dos tipos de acero, comparándolos con el acero convencional (AC), el cual es utilizado típicamente en la industria de la construcción.

Este trabajo se realizó implementando una técnica de corrosión acelerada, estudiada primeramente en trabajos de Fortuné [8] y mejorada por S. Muazzam [9]. Con la misma se pretende estudiar la cinética de la corrosión, simulando la carbonatación parcial del concreto reforzado. Si bien, habitualmente se utilizan diferentes técnicas para el estudio

de la corrosión de acero de refuerzo; tales como, técnicas donde se aplica una corriente galvánica al sistema, inmersión-secado de probetas en soluciones de NaCl, exposición en ambientes ricos en CO₂ y NaCl, todas ellas para acelerar el proceso de corrosión y estudiar su cinética. La ventaja de ésta técnica es que ésta refleja el comportamiento natural de la corrosión en varillas de acero embebidas en concreto. En esta técnica se mide la densidad de corriente de corrosión generada por el par galvánico creado por diferencia de potencial entre las varillas de acero activas y pasivas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Para la fabricación de los especímenes se utilizó un cemento tipo II/ B-LL 32.5, cabe aclarar que la selección de este tipo de cemento se basa en las características similares que presenta con el cemento CPO 40 de origen mexicano (NMX –C414-ONNCCE). En la Tabla 1 se muestra la composición química de este cemento. Se utilizaron agregados de origen silico-calcáreos; contando con granulometría predominante de 12 mm para el agregado grueso y 4 mm para el agregado fino.

Como refuerzo del concreto se utilizaron varillas de acero de 14 cm de longitud y 0.95 cm de diámetro con tres diferentes tipos de acero, en primera instancia y de forma comparativa se tomó el AC, el ATT y el AG. Los tres tipos de acero constaron de un recubrimiento superficial de resina epóxica y cinta, dejando 5 cm de longitud expuesta (Fig. 1), la cual estratégicamente sirvió como área de estudio.

Tabla 1. Cemento tipo II/ B-LL 32 (Norma NF-EN 197-I, correspondiente al CPO 40, NMX-C414-ONNCCE)

Composición (%) por peso de cemento							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0.31	1.23	3.56	12.12	3.57	0.44	73.49	2.57

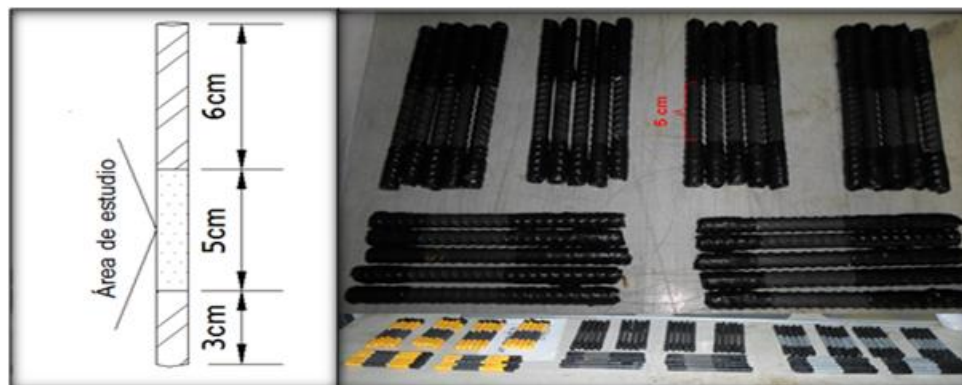


Fig. 1. Preparación de las varillas

Fabricación de especímenes

Los especímenes de concreto fueron fabricados en dos fases. En la primera fase se

fabricaron especímenes cilíndricos de concreto de 6.5 cm de diámetro por 13 cm de longitud. Para ello, las varillas fueron montadas en un espaciador previamente introducido dentro de los moldes cilíndricos. Posteriormente, el concreto fue colado dentro de los moldes dejando embebidas las varillas, después de haber aplicado un vibrado. La forma y dimensiones finales de los especímenes se muestran en la Fig. 2.



Fig. 2. Esquema con dimensiones y especímenes colados.

Condiciones de los especímenes

Después de ser colados los especímenes permanecieron 24h en el cuarto de curado con rocío continuo de agua a 20°C y 95% HR. Posteriormente fueron desmoldados, y regresados para que concluyeran un curado de 7 días. Luego del curado fue necesario aclimatar los especímenes a las condiciones de exposición dentro del laboratorio (65%HR, 27°C) para lograr un equilibrio en la humedad y temperatura entre el exterior y el interior de los poros del concreto, esto antes de la inducción de la carbonatación.

Al final del preacondicionamiento los especímenes fueron colocados dentro de una cámara de carbonatación, a 50% CO₂, 50% HR y se mantuvo a 20°C donde permanecieron hasta lograr una carbonatación total de los mismos. Para dar seguimiento a la profundidad de carbonatación, se colocaron especímenes testigo, los cuales fueron fabricados paralelamente a los especímenes en estudio. Estos especímenes fueron extraídos regularmente de la cámara de carbonatación para el seguimiento de la profundidad de carbonatación del concreto, mediante la aplicación de la prueba colorimétrica con fenolftaleína. En la Fig. 3, se observa un corte transversal de un espécimen testigo el cual no muestra el color típico rosa para concretos no carbonatados, lo cual confirma que el concreto se encontraba totalmente carbonatado.



Fig. 3. Sistema de carbonatación y aspecto típico de un espécimen testigo totalmente carbonatado.

Una vez que los especímenes fueron carbonatados totalmente, se procedió a la segunda fase de la experimentación con el procedimiento que se describe a continuación.

Los especímenes fabricados para esta segunda fase, estuvieron compuestos por dos cilindros concéntricos de concreto con varillas de acero embebidas. Uno en el interior, el cual es un cilindro previamente carbonatado en la fase uno y con la varilla despasivada, el otro, un cilindro exterior (no carbonatado) con cuatro varillas embebidas del mismo tipo de acero, las cuales se encuentran pasivadas. Los moldes utilizados en la fabricación de los especímenes para la prueba de corrosión acelerada, se muestran en la Fig. 4a. En la Fig. 4b se ilustra el acomodo del espécimen carbonatado en la perforación del centro, y en las otras cuatro las varillas pasivadas.

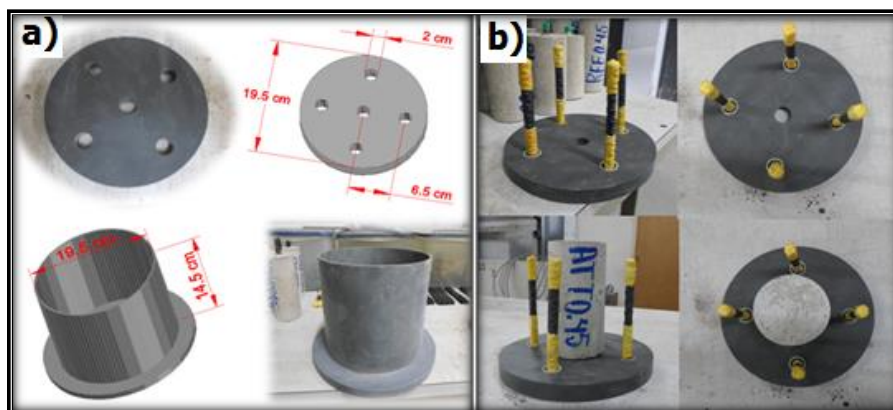


Fig. 4. a) Moldes utilizados para fabricación de especímenes. b) Colocación de varillas y espécimen carbonatado.

Preparación de especímenes y acondicionamiento

El arreglo del montaje del espécimen carbonatado y las varillas de acero, fue introducido en el molde de PVC, (Fig. 5a). Así, se procedió a colar el nuevo concreto, el cual se elaboró siguiendo la misma formulación que se utilizó para los especímenes de la primera fase. Los especímenes obtenidos se muestran en la Fig. 5b.

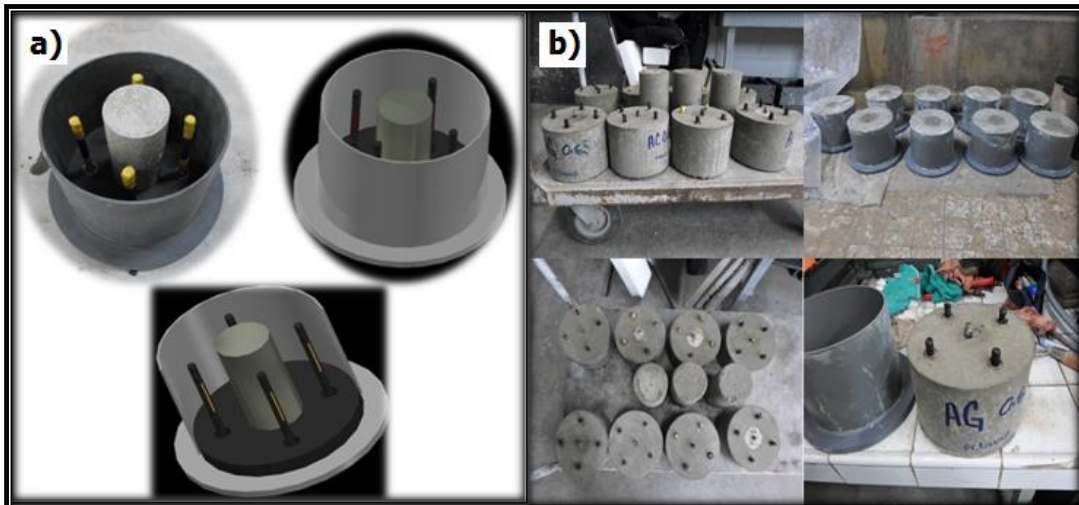


Fig. 5. a) Montaje de espécimen carbonatado y varillas. b) Especímenes colados para ensaye de corrosión acelerado.

Los especímenes fueron utilizados para la prueba acelerada de corrosión galvánica, esto mediante la conexión eléctrica de la varilla central (activada) con las varillas que la rodean (pasivadas). A continuación se muestra de manera esquemática la interacción electroquímica que se suscita, Fig. 6a, y el arreglo utilizado para dicha prueba Fig. 6b.

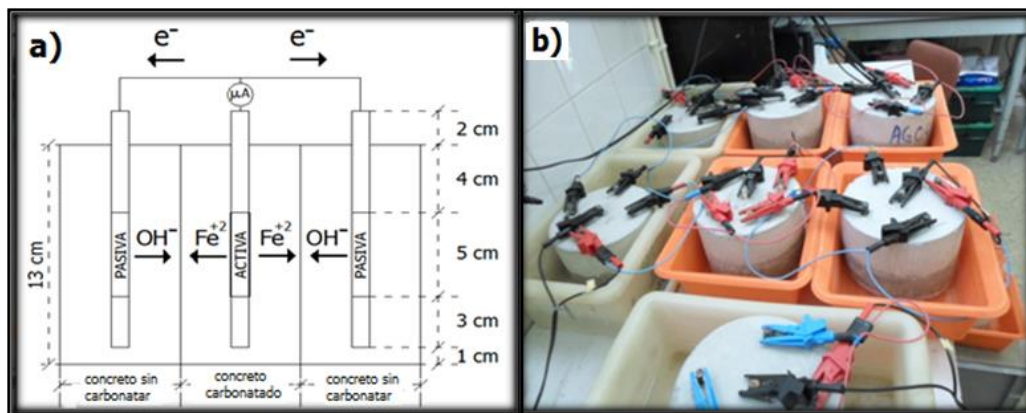


Fig. 6. a) Esquema de conexión de la varilla activa con las pasivadas. b) Ensayo de corrosión galvánica.

Este acoplamiento permite el intercambio natural de electrones entre la varilla activada y las varillas pasivas, resultando en una mutua polarización anódica de la varilla activada (acero en disolución) y la polarización catódica de las varillas pasivas (formación de OH^-). Este intercambio de cargas eléctricas es asociado con la corriente de corrosión de la macrocelda (J_m) que fluye de la varilla activa a las varillas pasivas.

Cada espécimen fue conectado a una resistencia de 1Ω (con variación de $\pm 1\%$) en el circuito, esto entre el ánodo y los cátodos. Se empleó un equipo Yokagawa Mw 100[®], para medir la diferencia de potencial sobre la resistencia y convertirla en la corriente de corrosión de la macrocelda. La resistencia de 1Ω es despreciable con respecto a la resistencia óhmica debida al concreto y, consecuentemente, esto lo hace no influir en el sistema de equilibrio galvánico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización Metalográfica

La Fig. 7, muestra la composición física de los diferentes aceros, destacándose en la fig. 7a, la composición típica de ferrita-perlita, homogéneamente distribuida en toda la sección de la varilla, en las figuras 7b y 7c, se pueden observar las diferentes capas superficiales del ATT y AG. En la fig. 7b, se observa una capa exterior de martensita cuyo espesor promedio fue de 0.16 mm (165 μm) y su núcleo de ferrita-perlita. En la fig. 7c, se observa el espesor de la capa de zinc producto del galvanizado por inmersión practicado sobre este acero, el cual desarrolló un espesor promedio de 0.043 mm (43 μm). En la fig. 7d, se muestra el EDS practicado a la capa de zinc del AG.

En la Fig. 8, se ilustra la variación de microdurezas de las zonas físicas ferrita-perlita y martensita, en asociación con los cambios microestructurales desarrollados en las probetas ensayadas. Los resultados de las incisiones fueron comparados con los valores establecidos en la norma ASTM-E-384. De aquí, podemos clasificar con una dureza media a la periferia del ATT, donde predomina la martensita (incisiones del 1-3), y una dureza baja a partir de de la incisión 4 (bainita), concluyendo con las incisiones 5-8 donde predomina la fase ferrita-perlita, suceso esperado ya que el AC presentó una dureza baja, en el cual predomina una composición física similar.

Comportamiento electroquímico

Los especímenes utilizados en la implementación de esta técnica permanecieron conectados durante 183 días, al término de los cuales fueron recuperados los datos de monitoreo, y los especímenes para sus respectivos análisis. La fig. 9, muestra los resultados de la corriente de corrosión del promedio de tres especímenes por cada tipo de acero.

Los resultados del monitoreo de los diferentes aceros sometidos a corrosión galvánica, muestran un notable aumento de la densidad de corriente de corrosión en el primer mes de ser conectados, comportamiento ya reportado para los aceros AC y AG en concretos carbonatados [10]. Lo anterior es atribuible a la resistencia del concreto que tiende a disminuir a partir de la inmersión del sistema por efecto de la humectación del mismo, lo que incrementa la corriente de corrosión durante los primeros 4 días. Posteriormente, se presentó un ligero descenso en la corriente de corrosión atribuida principalmente a la disminución de la diferencia de potencial entre el ánodo y los cátodos. Este comportamiento electroquímico fue similar para los tres tipos de acero. Hacia el final del periodo de prueba se obtuvieron valores de 2.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el AC, 2.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el ATT y de 4.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el AG. En investigaciones previas realizadas sobre el comportamiento electroquímico del AC y AG expuestos a carbonatación, se han detectado valores de densidad de corriente de corrosión de hasta 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ [11], y de 6.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el AG [12].

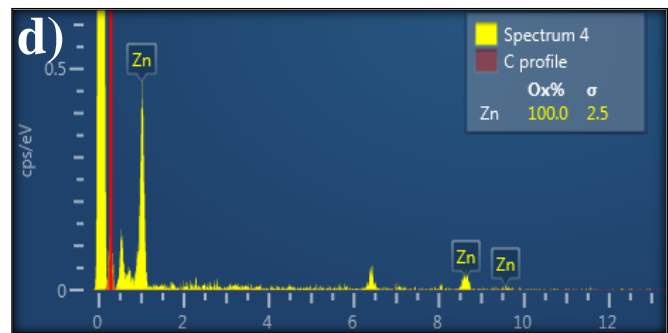
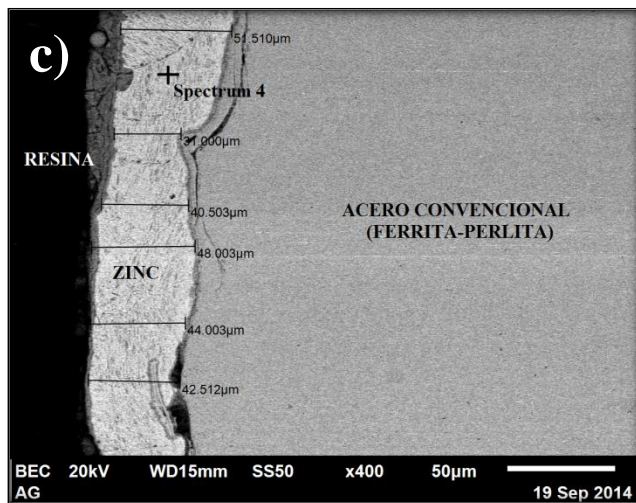
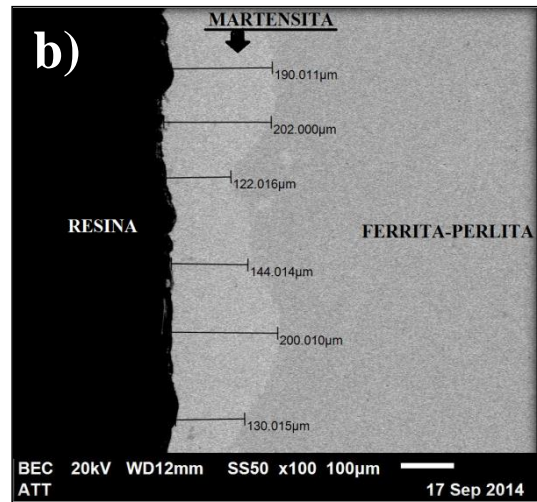
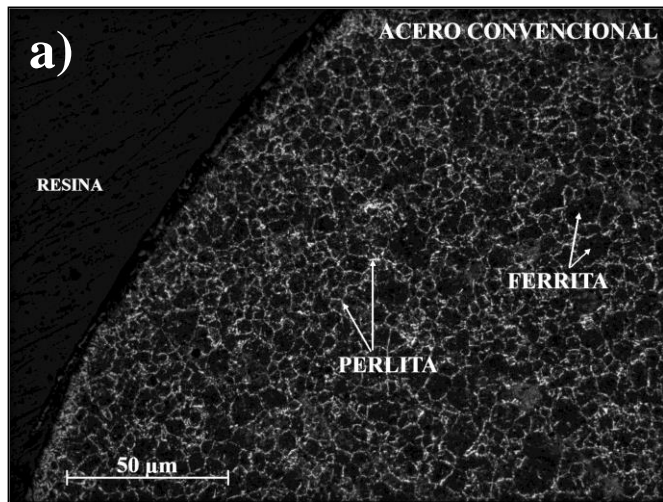


Fig. 7. Caracterización metalográfica, a) AC, b) ATT, c) AG y d) EDS del Zinc del AG.

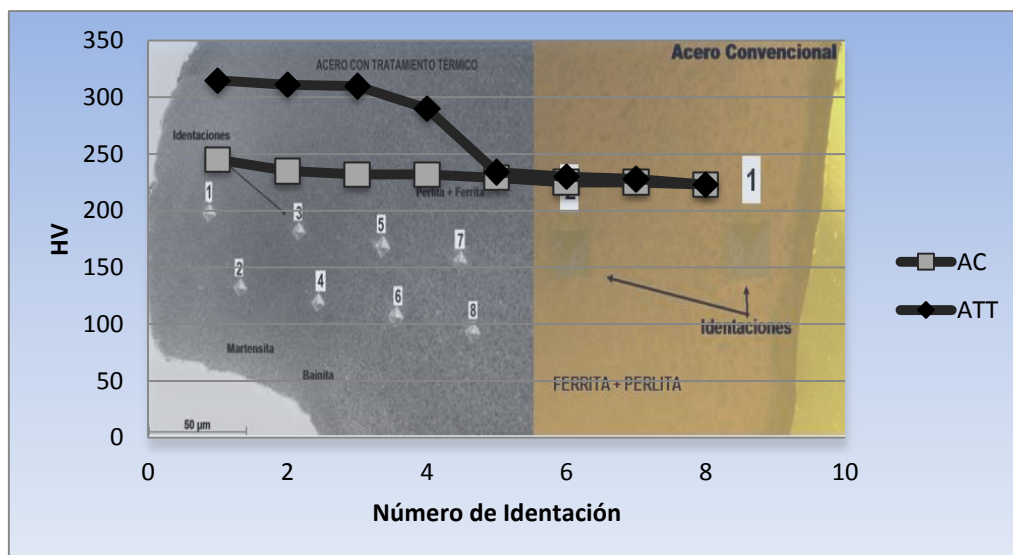


Fig. 8 Comparativa de resultados del ensayo de Microdureza por Vickers entre AC y ATT.

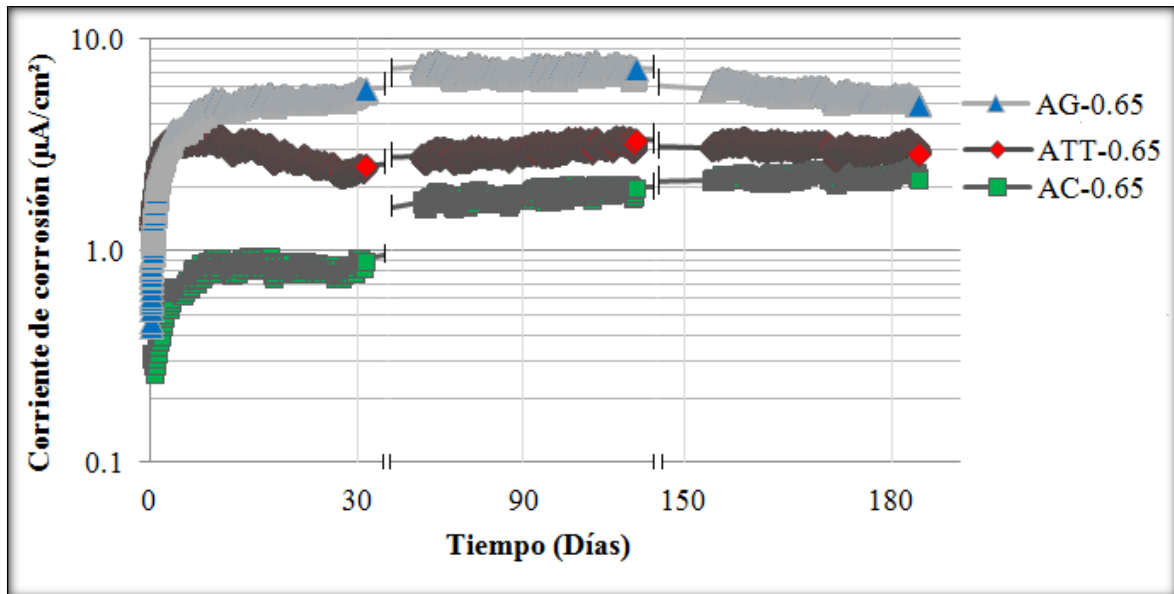


Fig. 9. Comportamiento electroquímico de los aceros.

CONCLUSIONES

La prueba simula de manera macro, las micro-celdas de corrosión generadas durante el proceso de corrosión uniforme por carbonatación, esto mediante el aumento de la relación cátodo/ánodo.

El comportamiento electroquímico de los tres aceros utilizados en este estudio fue similar, por lo que este procedimiento tiene alta reproducibilidad. Las diferencias en los rangos de valores para los diferentes tipos de aceros son atribuibles a la diferencia de la composición superficial de estos.

Este ensayo puede ser útil para la comprensión de la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado, ya que los resultados mostrados de corriente de corrosión galvánica son generados por la corriente de corrosión galvánica natural, o sea, sin la inducción de alguna fuente de alimentación externa en la fase de propagación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los diversos apoyos brindados por las instituciones para la realización de las diversas estancias en el extranjero, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Nuevo León-Instituto de Ingeniería Civil y a L'Université Paul Sabatier-Insa (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions). A la empresa DEACERO por el material donado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fontana and Green, Corrosion engineering, Ed. Mc Graw-Hill, Unid Stated of American (1986).
2. G. Roventi et al, 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, 2014, vol. 65. Pp. 76-84.
3. D.O. McPolin, P.A.M. Basheer, A.E. Long, K.T.V. Grattan, T. Sun. “New test method to obtain pH profiles due to carbonation of concretes containing supplementary cementitious materials [J]”. J .Mater. Civil Eng., 2007, 19: 936-946
4. P.U. Qi, et al, “Electrochemical behavior of steel bar in electrolytes influence of pH value and cations”, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. DOI 10.1007/s11595-011-0376-0. Dec. 2011.
5. G.K. Glass, C.L. Page, N.R. Short, “Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars”, Corrosion Science, vol. 32 (1991), pp. 1283-1299.
6. A. Castel, R. Francois and G. Arliguie, “Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete members”, cement and concrete research, vol. 29 (1999) 561-565.
7. Nasser, A. Clément, S. Laurens, A. Castel, “Influence of steel–concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete”. Corrosion Science, vol. 52 (2010), pp. 2878–2890.
8. I.V. Fortuné, “Sensibilité de la technique d’émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton”, Tesis Doctoral, Université Paul Sabatier, (2009), pp. 86.
9. S. Muazzam, “Corrosion of steel in concrete: Development of an accelerated test by carbonatation and galvanic coupling”, Tesis Doctoral, Université Paul Sabatier, (2013), pps. 42-51.
10. K. Tuutti, “Corrosion of steel in concrte”, Report CBI, Swedich Cement and concrete Reserch Institute, 1982.
11. Ngoc Tro Vu, “Contribution a l’étude de la corrosion par carbonatation du béton armé”, Tesis Doctoral, Université Paul Sabatier, (2009), pps. 31-40.
12. C. Andrade y C. Alonso, “Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site”, Construction and Bulding Materials, Vol. 10 (1996), No. 5, pp. 315-328.
13. G. Roventi et al., “ Corrosion resitance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete : effect of wet-dry cycles in tap water and in chloride solution on the pasivating layer”, Cement and Concrete Research, vol. 65 (2014), pp. 76-84.



VI CONGRESO NACIONAL ALCONPAT

Facultad de Ingeniería Civil - UANL

Esta Memoria Digital contiene los artículos presentados en el VI CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT.

Los temas versan acerca de los materiales avanzados y su uso en la construcción, especialmente aplicados al concreto armado, además de la prevención, la preservación y el remedio de los daños que la exposición al medio ambiente puede afectar, acortando la durabilidad.

Agradecemos el apoyo de nuestros patrocinadores:



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Visión
2020
UANL

"Educación de clase mundial,
un compromiso social"

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción
Delegación Nuevo León