



Alconpat México

# MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MEXICO

Año 2022 | número 1 | ISSN: En trámite

## EDITORES:

Pedro Castro Borges

Elia Mercedes Alonso Guzmán

Tezozomoc Pérez López

X Congreso Nacional Alconpat México  
realizado del 08 al 10 de noviembre de 2022  
Telchac, Yucatán, México



ALCONPAT INTERNACIONAL

# MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MEXICO

---

**Editorial:** Alconpat México  
**Editores:** Pedro Castro Borges (principal)  
Elia Mercedes Alonso Guzmán  
Tezozomoc Pérez López


**PUBLICACIÓN ELECTRONICA**  
**ISSN: [EN TRÁMITE]**

---



## X CONGRESO NACIONAL DE **ALCONPAT** **MÉXICO**

**DEL 08 AL 10 DE NOVIEMBRE EN TELCHAC, YUCATÁN**



Compilación de trabajos presentados dentro del X CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MÉXICO (XCNAM), realizado del 08 al 10 de noviembre de 2022 en Telchac, Yucatán, México.

---

## Cintillo Legal

**MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MEXICO, Año: 2022, No.1**, es una Publicación bianual editada por ASOCIACION LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGIA Y RECUPERACION DE LA CONSTRUCCION - DELEGACION MEXICO ALCONPAT - MEXICO, Calle 21 Núm. 310D, Colonia Roma, 97218 Mérida, Yucatán, México.

Sitio web: <https://mx.alconpat.org>

Correo electrónico: [alconpatmex@gmail.com](mailto:alconpatmex@gmail.com)

**Editor Responsable:** Pedro Castro Borges.

Reserva de Derechos uso exclusivo No. 04-2024-070513370900-203, ISSN EN TRÁMITE, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, calle Puebla 143, Col Roma, Delegación Cuauhtémoc. C.P. 06700.

Responsable de la última actualización de este número: Pedro Castro Borges.

Fecha de la última modificación 15 de julio de 2024.

---

## Publicación Oficial de Alconpat México

---

**Primera Edición:** noviembre 2022

---

## Derechos Reservados © 2022

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de la presente publicación, siempre y cuando se otorgue el debido crédito a los autores y a la publicación, incluyendo la dirección electrónica de la publicación.

---

## Con el apoyo de:

- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
  - Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
  - Centro de Investigaciones en Corrosión - Universidad Autónoma de Campeche
  - Universidad Politécnica de Tapachula
  - Alconpat Internacional
-

**Agradecimientos:**

A todos los participantes, conferencistas, y patrocinadores que hicieron posible este congreso.

---

**Contacto para Solicitudes de Permisos y Reproducciones:**

Correo Electrónico: [alconpatmex@gmail.com](mailto:alconpatmex@gmail.com)

**Diseño y Diagramación:**

- Elizabeth Sabido Maldonado
- Alexia Xiomara Zozaya Ortiz

**Distribución:**

Difusiones periódicas con Difusión digital

Sitio de descarga: [mx.alconpat.org](http://mx.alconpat.org)

---



**Alconpat México**

**Para más información, visite nuestro sitio web:**

<https://mx.alconpat.org>

## Junta Directiva de Alconpat México 2020 - 2022

**Presidente:**

Dr. Tezozomoc Pérez López

**Presidente de Honor:**

Dr. Francisco Alonso Farrera

**Vicepresidente:**

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

**Secretario:**

Dra. Josefa de los Ángeles Paat Estrella

**Tesorero:**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

**Vocales:**

- Ing. Miguel García Domínguez
- Dra. Rebeca Visairo Méndez
- Dr. José Manuel Mendoza Rangel
- Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel
- Dr. Wilfrido Martínez Molina
- Dra. Dulce María Cruz Moreno
- Dr. Julio Roberto Betancourt Chávez

---

## Comité Organizador de XCNAM

**Presidente del Comité Organizador:**

Dr. Pedro Castro Borges, Cinvestav, Unidad Mérida

**Presidente del Comité Científ**

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, UMSNH

**Coordinador del Concurso de Posters para Estudiantes:**

Dr. Alejandro Durán Herrera, FICUANL

**Asesor**

Dr. Tezozomoc Pérez López, CICORR-UACAM

**Miembros del Comité Organizador:**

- Ing. Alfredo Vázquez Pérez
- M.I. Midori Lizette Córdova Quintal
- Dra. Josefa de los Ángeles Paat Estrella
- Ing. Nadine Esther Chuc Echeverría
- Ing. Renán Canto Jairala
- Ing. Mildred Sofía Hernández Cih
- Ing. Teresa Esther Ramírez Ortegón
- Dr. Jorge Alberto Briceño Mena
- Dr. Ángel Adrián Bacelis Jiménez
- Dra. Montserrat Soria Castro

## Comité Científico

### Presidente:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, UMSNH

### Miembros nacionales:

- Dra. Cecilia Olague Caballero, UACH
- Dr. Facundo Mauricio Almeraya Calderón, UANL-FIME-CIIIA
- Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, ITESM Querétaro
- Dr. Luis Alfonso Maldonado López, Cinvestav, Unidad Mérida
- Dr. Demetrio Nieves Mendoza, Universidad Veracruzana,
- Dr. Erick Edgar Maldonado Bandala, Universidad Veracruzana
- Dr. José Castañeda Ávila, UACH
- Dr. Carlos Barrios Durstewitz, UAS
- Dr. Gerardo Fajardo San Miguel, FIC-UANL
- Dr. Francisco Javier Olguín Coca, UAEH
- Dr. Francisco Alonso Farrera, UNACH
- Dr. Tezozomoc Pérez López, CICORR-UACAM
- Dra. Josefa Paat Estrella, CICORR-UACAM
- Dr. Mauricio Arreola Sánchez, UMSNH
- Dr. Jorge Borrego, UMSNH
- Dra. Ruth Grajeda Rosado
- Dr. Jorge Alberto Briceño Mena, Universidad Politécnica de Tapachula
- Dra. Dulce Cruz Moreno, SECODISA
- Dr. Joel Moreno Herrera, FIUADY
- Dr. José A. Guzmán Torres
- Dr. Francisco René Vázquez Leal
- Dra. Montserrat Soria Castro, Cinvestav, Unidad Mérida y UNITA
- Dr. Ángel Adrián Bacelis Jiménez, Cinvestav, Unidad Mérida, CICORR-UACAM
- Dr. Pedro Montes García, CIIDIR del IPN, Oaxaca
- Dr. Prisciliano de Jesús Cano Barita, CIIDIR del IPN, Oaxaca
- Dr. José Ángel Ortiz Lozano, UAA
- Dr. José Iván Escalante García, Cinvestav, Unidad Saltillo
- Dr. Alejandro Durán Herrera, FIC-UANL
- Dr. José Manuel Mendoza Rangel, FIC-UANL

- Dr. César Juárez Alvarado, FIC-UANL
- Dr. Pedro Castro Borges, Cinvestav, Unidad Mérida
- Dr. Wilfrido Martínez Molina, UMSNH
- Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, IMT
- Dr. Ángel Cárdenas, UASLP
- Dr. Waltter López González, Industria 55

### Miembros internacionales:

- MSc. Alberto Hernández Oroza, Oficina del Historiador de la Habana, Cuba
- Dra. Ana Luisa Rodríguez Quezada, Universidad de Olguín, Cuba
- Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro, Universidad de Pernambuco, Brasil
- Dra. Carmen Andrade Perdrix, CIMNE, España
- Dr. Fernando Branco, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal
- Dra. Oladis Troconis, Centro de Estudios de Corrosión de la Universidad de Zulia, Venezuela
- Dr. Pedro Garcés Terradillos, Universidad de Alicante, España
- Ing. Raúl Husni, Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Dra. Verónica Ávila Ayón, Universidad Laica Eloy Alfaro de Guayaquil, Ecuador
- Dra. Margareth Dugarte, Universidad Uninorte, Colombia
- Arq. Margita Kliewer Voth, Universidad de Asunción, Paraguay
- Dra. Valentina Millano, Centro de Estudios de Corrosión de la Universidad de Zulia, Venezuela
- Dra. Alondra Chamorro, Universidad de Santiago, Chile
- Dra. Inés Flores Barbosa, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal
- Dra. Patricia Martínez, Universidad de Valparaíso, Chile
- Dr. Paulo Helene, PhD Ingeniería, Brasil

- Dr. Enio José Pazini Figueiredo, Universidad Federal de Goiás, Brasil
  - Dr. Yuri Villagrán, Instituto VITO, Bélgica
  - MSc. Angélica Ayala Piola, Universidad de Asunción, Paraguay
  - Dr. Adriá Sánchez Calvillo, España
  - Dra. Elizabeth Contreras Marín, España
  - Dr. Edisson Hernández, Nicaragua
- 

## **Comité de Desarrollo Tecnológico y Diseño Digital**

### **Miembros:**

Lic. Hannia Najera Verdugo, Universidad Politécnica de Tapachula  
Dr. Jorge Alberto Briceño Mena, Universidad Politécnica de Tapachula  
Dr. Edwin René Hoil Canul, Universidad Politécnica de Tapachula  
Ing. Natanael de Jesús León Chan, Alconpat Internacional  
MSc. Alexia Xiomara Zozaya Ortiz, Alconpat Internacional  
Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Alconpat Internacional

---

**viii**



**INTRODUCCIÓN**

**ix**



**AGRADECIMIENTOS**

**S1**



**SECCIÓN 01  
CONTROL DE CALIDAD DE LAS  
CONSTRUCCIONES**

**S2**



**SECCIÓN 02  
PATOLOGÍA DE LAS  
CONSTRUCCIONES**

**S3**



**SECCIÓN 03  
RECUPERACIÓN DE LAS  
CONSTRUCCIONES**

# ÍNDICE GENERAL



## MEMORIAS DEL CONGRESO

viii

Alconpat México fue creada en abril del año 2002. Fue la primera delegación de Alconpat Internacional. Desde aquella época, y en cada año par, se ha llevado a cabo el Congreso Nacional de Alconpat México, que de cariño es llamado el Pre-Compat. Desde aquel entonces, numerosas delegaciones nacionales se han creado año con año. En esta ocasión el comité organizador quiso hacer una celebración académica por los primeros 20 años. Esto implicó darle al congreso una imagen mística que incluye la presentación de una obra alusiva del famoso pintor Guido Farina y que engalana este libro de memorias.



La obra consiste en una mano que evoca el mando de las diferentes directivas bajo la tutela del consejo fundador ilustrado con los nombres de las personas de éste en la forma de un halo. La mano sostiene una brújula que indica el camino de nuestra asociación, donde se encuentra el logo de Alconpat México y un Katun maya que representa el número 20, alusivo al 20 aniversario. Estamos muy contentos de compartir contigo ésta celebración académica.



PAINTER  
GUIDOFARINA PAINTER. COPYRIGHT ©2022 GUIDOFARINA CERTIFIED @GUIDOFARINA.ART

Atentamente,

Pedro Castro Borges,  
Elia Mercedes Alonso Guzmán,  
Tezozomoc Pérez López.

INTRODUCCIÓN



## MEMORIAS DEL CONGRESO

ix

Los agradecimientos expresados por los Editores de estas memorias están dedicados a todos los que intervinieron en la organización del evento completo (X Congreso Nacional de Alconpat México, XX Aniversario de Alconpat México y I Reunión presencial plenaria de la Red PREVECCII).

El equipo de organización del X Congreso Nacional de Alconpat México ha sido parte fundamental en el evento, por lo que los Editores extienden un merecido reconocimiento a quienes se debe el éxito del congreso, la celebración de los 20 años y demás actividades realizadas. Todos ellos dedicaron ad-honorem su tiempo extra, sin menoscabo de sus actividades profesionales remuneradas. Muchos de ellos jóvenes académicos MSc o Dres que no solo participaron con una organización eficiente, sino que también dieron el ejemplo pagando su propia cuota de inscripción. Ellos son, en orden alfabético por primer nombre:

Adolfo López Sánchez  
 Alexia Xiomara Zozaya Ortiz  
 Ángel Adrián Bacelis Jiménez  
 Edwin René Hoil Canul  
 Gloria Ivonne Hernández Bolio  
 Hannia Ahtziri Najera Verdugo  
 Jorge Alberto Briceño Mena  
 José Luis Cabellos Quiróz  
 María Elizabeth Sabido Maldonado  
 Mariné Guadalupe Matey Farfán  
 Mercedes Guadalupe Balancán Zapata  
 Midori Lizette Córdova Quintal  
 Montserrat Soria Castro  
 Nadine Esther Chuc Echeverria  
 Natanael de Jesús León Chan

Los Editores del este libro de memorias agradecen también a los autores y revisores de los trabajos su tiempo y dedicación.

Muy importante, reconocer al equipo de auspiciadores y patrocinadores, sin quienes no hubiese sido posible este gran evento. Particularmente, agradecer el patrocinio de Sika y Holcim, que como miembros Grafenos hicieron posibles nuestras mejores actividades sociales, al igual que a Guido Farina, quien con dos obras magistrales engalanó el XCNAM y a la Red PREVECCII.

AGRADECIMIENTOS



# CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES

DOI: <https://doi.org/10.21041/memoriasdecongresoXCNAM2022-CC>

**S1**

*Sección 1*

## MEMORIAS DEL CONGRESO

X

# CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

Análisis numérico de la estimación del esfuerzo a compresión simple basado en la resistencia a tensión indirecta empleando aprendizaje profundo. <i>J. A. Guzmán, F. J. Domínguez, R. Román, H. Arias, G. Tinoco (CC-722-MX)</i>	1
Estudio comparativo de diferentes cañones urbanos, para eficientizar el comportamiento térmico del entorno construido, variando geometría, envolvente y orientación como técnica de mitigación para la Isla de Calor Urbano, mediante software de simulación. <i>R. M. Grajeda-Rosado (CC-732-MX)</i>	11
Estudio experimental para la reducción del rebase del oleaje (overtopping) en rompeolas convencionales. <i>J. Ramirez, V. Román, R. Mompremier (CC-742-MX)</i>	22
Efecto del reemplazo de cemento Portland por ceniza de bagazo de caña en la trabajabilidad de compositos - Un minireview. <i>A. Alfonso Olivera, V. A. Franco Luján, P. Montes García (CC-743-MX)</i>	34
Análisis FEM-DEM de una viga simplemente apoyada utilizando Kratos Multiphysics. <i>H. Arias-Rojas, R. Román-Gutierrez, F. J. Dominguez-Mota, J. A. Guzmán-Torres, G. Tinoco-Guerrero (CC-R745-MX)</i>	46
Evaluación de patrones térmicos en una ciudad histórica de clima cálido templado <i>I. Tapia, R. Grajeda, M. Mondragón, S. Aguello, J. Borrego, E. Alonso, A. Sánchez (CC-754-MX)</i>	58
Análisis termográfico de los envolventes edificatorios en un centro histórico de clima templado. <i>P. Cano, R. Grajeda, M. Mondragon, J. Saucedo, I. Tapia, W. Martinez, C. Lara (CC-R755-MX)</i>	69
Evaluación del comportamiento higrotérmico en cañones urbanos históricos en relación con la orientación en un clima templado. <i>J. Saucedo, R. Grajeda, M. Mondragon, H. Chavez, P. Cano, E. Chavez, A. Sanchez (CC-757-MX)</i>	82
Monitoreo térmico en cañones urbanos con clima templado y diferentes relaciones de aspecto en zona histórica de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. <i>F. Lagunes, R. Grajeda, M. Mondragón, M. Santos, W. Martínez, H. Chávez, S. Aguello (CC-R761-MX)</i>	91

INDICE



## MEMORIAS DEL CONGRESO

# CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

xi

Comportamiento físico-mecánico del material fino en mezclas asfálticas densas elaboradas en caliente. <i>M. Arreola Mauleón, M. A. Mondragón Ornelas, E. M. Alonso Guzmán, H. L. Chávez García, M. A. Villanueva Guzmán, W. Martínez Molina, J. A. Borrego Pérez (CC-R764-MX)</i>	102
Evaluación de la reactividad y mejoramiento del comportamiento de bases estabilizadas con asfalto espumado y adiciones filler de aportación ante susceptibilidad a la humedad. <i>M. A. Villanueva Guzmán, H. L. Chávez García, W. Martínez Molina, A. Tellez Correa, E. M. Alonso Guzmán, M. Arreola Sánchez, R. M. Grajeda Rosado (CC-769-MX)</i>	109
Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas <i>F. Hernández, H. L. Chávez, C. Bernabe, W. Molina, E. Mercedes, C. Lara (CC-771-MX)</i>	121
Análisis del comportamiento térmico en áreas verdes, de acuerdo con tipo de pavimentos y vegetación para clima templado húmedo. <i>M. Santos, R. Grajeda, M. Mondragón, F. Lagunes, E. Alonso, W. Martínez, R. Silva (CC-773-MX)</i>	134
Análisis de propiedades mecánicas y electroquímicas en concreto con fibra de coco durante su curado. <i>J. Cabanillas, T. Pérez, J. Gonzalez (CC-781-MX)</i>	147
Evaluación de la resistividad eléctrica y compresión simple en concreto hidráulico con sustitución de ceniza de bagazo de caña a edades tardías. <i>Y. G. Rojas Olayo, J. A. Velázquez Pérez, W. Martínez Molina, H. L. Chávez García, E. M. Alonso Guzmán, S. Zapata Giraldo, M. Arreola Sánchez, D. García Romero (CC-791-MX)</i>	158
Comportamiento mecánico de arcillas estabilizadas con cementantes y mucilago de nopal. <i>J. A. Velázquez Perez, H. L. Chávez García, L. A. Molina Gonzalez, R. Ruiz Ruiz, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, M. A. Navarrete Seras (CC-796-MX)</i>	165
Efecto de la sílice obtenida en planta geotérmica de Los Azufres sobre mezclas de mortero a edades tardías. <i>L. González Luna, H. Chávez García, F. Hernández Cisneros, E. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, J. Guerrero Jerónimo, R. Grajeda Rosado (CC-833-MX)</i>	172

INDICE



## MEMORIAS DEL CONGRESO

# CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

xii

Activador alcalino a base de ceniza volante en cementos alcalinos base  
desecho de vidrio y cemento Portland.

*Rodríguez Morales, J. I. Escalante-García (CC-845-MX)*

180

INDICE





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-722-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. CC - 1 - 10



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## **Análisis numérico de la estimación del esfuerzo a compresión simple basado en la resistencia a tensión indirecta empleando aprendizaje profundo**

J. A. Guzmán<sup>1\*</sup>, F. J. Domínguez<sup>2</sup>, R. Román<sup>3</sup>, H. Arias<sup>4</sup>, G. Tinoco<sup>5</sup>

\*Autor de Contacto: [jose.alberto.guzman@umich.mx](mailto:jose.alberto.guzman@umich.mx)

<sup>1</sup>Ciencias Básicas y Matemáticas, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, México.

<sup>2</sup>Ciencias Básicas y Matemáticas, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, México.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH, Morelia, México.

<sup>4</sup>Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, México.

<sup>5</sup>AULA-CIMNE, UMSNH, Morelia, México.

### **RESUMEN**

En la actualidad existen diferentes métodos para calcular el esfuerzo a compresión simple del concreto basado en la estimación de diferentes parámetros. Estas estimaciones, se realizan a través de formulaciones basadas en estudios estadísticos que permiten la caracterización y formulación de expresiones algebraicas. Sin embargo, estas expresiones suelen no ser generalizadas y al ser implementadas en condiciones normales denotan baja o nula adaptación a datos convencionales. En esta investigación, se presenta la arquitectura de una red neuronal profunda que permite estimar el esfuerzo a compresión simple del concreto a través del uso de datos de la resistencia a tensión indirecta. El desempeño de la red neuronal presenta resultados satisfactorios y sobresalientes (90% en precisión).

**Palabras clave:** materiales; concreto; compresión simple; evaluación; aprendizaje profundo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más empleados en el sector de la construcción. Este material está diseñado principalmente para resistir esfuerzos mecánicos, dinámicos y estáticos (Guzmán Torres, 2020). Algunos de los parámetros mecánicos que son considerados para medir la calidad del concreto en función de la resistencia son el esfuerzo a compresión simple, la resistencia a la tensión indirecta, y el módulo de ruptura (Guzmán Torres et al, 2021). Generalmente estos parámetros son medidos en laboratorio, sin embargo, en campo, la obtención de estos parámetros no es una práctica común. Si hablamos del parámetro más común a ser medido, tanto en laboratorio, como en campo, es la resistencia a compresión simple a través de la elaboración de cilindros de concreto. La resistencia a compresión simple nos proporciona la capacidad de respuesta de un elemento ante esfuerzos de compresión. Este parámetro ha sido considerado como un parámetro estandarte para medir la calidad de un concreto (Guzmán Torres et al., 2021). Sin embargo, la resistencia a compresión simple solo nos ayuda a conocer la capacidad de carga de un concreto en elementos confinados trabajando a compresión. Desafortunadamente, no todos los elementos de concreto se encuentran en estado confinado. Por lo tanto, es necesario conocer parámetros que brinden mayor información del desempeño de la estructura, como lo es la resistencia a la tensión indirecta o la resistencia a la flexión.

Una de las principales limitantes para obtener el esfuerzo de tensión indirecta del concreto es que no se cuenta con el equipo adecuado para hacer estas pruebas en campo, ya que generalmente se necesita instrumentación especial para realizar dicha prueba. Como consecuencia, esta prueba se realiza con frecuencia en laboratorio, pero esto requiere de una mayor cantidad de muestras de concreto obtenidas en campo, lo que puede llevar a elevar costos en los estudios que sean pertinentes. Por tal razón, es necesario conocer la relación que existe entre pruebas cruciales en el concreto, como lo es el esfuerzo a compresión simple y la resistencia a la tensión indirecta, pues con un mejor entendimiento de la relación que existe entre el esfuerzo de compresión simple y la tensión indirecta es posible realizar diseños estructurales con mayor grado de certidumbre (Chhorn et al., 2018).

Numerosas investigaciones se han desarrollado para tratar de encontrar una relación consistente y confiable entre el esfuerzo de compresión simple y la resistencia a la tensión indirecta. Una de las conclusiones generales, en las que todas las investigaciones concuerdan, es que a medida que el esfuerzo a compresión simple incrementa, la resistencia a tensión indirecta disminuye.

El objetivo de esta investigación es realizar una comparativa del desempeño de algunos de los modelos propuestos en el estado del arte para obtener el esfuerzo a compresión simple contra un enfoque actual, la inteligencia artificial. La inteligencia artificial contiene diversos campos de estudio, como lo son Machine Learning (ML), Deep Learning (DL), Computer Vision (CV), y procesamiento de lenguaje, entre otros (Elgendy, M., 2020). En este trabajo se realiza el diseño de un modelo que se considera dentro de él campo de especialización de inteligencia artificial, el Deep Learning. Se efectuó para el efecto el diseño de una red neuronal artificial profunda (DNN). Esta red toma como parámetro de entrada el esfuerzo a la tensión indirecta y predice el esfuerzo a compresión simple. Finalmente, el modelo propuesto se compara contra 8 ecuaciones propuestas en el estado del arte, a fin de observar el desempeño de cada uno de los modelos. Esto con el objetivo de poder discernir si la inteligencia artificial es capaz de resolver este problema de manera robusta, adaptativa, y flexible con el menor coste computacional.

Todos los modelos evaluados en esta investigación son probados en un conjunto de datos que contiene valores de compresión simple y valores de tensión indirecta de 3 mezclas de concreto diferentes. Cada mezcla de concreto contiene características particulares, como lo son los tipos de agregados pétreos, variación en las relaciones agua-cemento y resistencias de diseño.



## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Características de las mezclas de concreto

Las mezclas de concreto fueron elaboradas con agregados pétreos de la zona de la región de Morelia, Michoacán. Sus características de diseño pueden ser apreciadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados pétreos empleados en las mezclas de concreto.

Tipo de agregados	Propiedades físicas	Agregados triturados	Agregados volcánicos
Agregados pétreos finos (arenas)	% Absorción	-	2.68
	Densidad (g/ml)	-	2.46
	Gravedad específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	-	1.49
	% Humedad superficial	-	0.17
Agregados pétreos gruesos (gravas)	% Absorción	3.15	-
	Densidad (g/ml)	2.84	-
	Gravedad específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.68	-
	% Humedad superficial	1.93	-

En esta investigación se incluyen los resultados de esfuerzos de compresión simple y esfuerzos de tensión indirecta, ambos obtenidos de pruebas realizadas a tres mezclas de concreto bajo condiciones de laboratorio. Las características de diseño de las mezclas empleadas en esta investigación se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de diseño de las mezclas de concreto empleadas en la presente investigación.

Material	Unidades	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III
Cemento	-	CEM II 40R CPC	CEM III 30R CPC	CEM II 30R CPC
Grava	Tamaño máx (mm)	19.05	19.01	19.04
Grava	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )	1446	1438	1442
Agua	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )	205	205	205
Aire	% Aire incluido	2	2	2
Concreto	MPa	35	25	30
Relación agua/cemento	-	0.4116	0.4119	0.4432
Revenimiento	Cm	8	12	10
Aditivo	-	Fluidificante	Nopal	-

### 2.2 Conjunto de datos

Inicialmente, el conjunto de datos empleado para generar el modelo propuesto en esta investigación cuenta con 140 resultados por cada mezcla, es decir, un total de 420 muestras. En cada mezcla se tienen 70 elementos de concreto probados a compresión simple, y 70 elementos probados a tensión

indirecta. Sin embargo, 75 muestras obtenidas de las 3 mezclas analizadas -25 por cada mezcla- se reservan para el análisis y las respectivas validaciones finales. Todos los datos son mezclados aleatoriamente previo al proceso de entrenamiento de la DNN con la intención de agregar ruido a la validación de los datos.

El conjunto total de datos se divide en 2 partes, entrenamiento y prueba. Las proporciones elegidas para el conjunto de entrenamiento es del 80% y para el conjunto de prueba es del 20%. Adicionalmente, dentro del conjunto de entrenamiento se elige un 10% para el conjunto de validación. Este último conjunto tendrá la función de ir validando las predicciones realizadas en el proceso de entrenamiento, mientras que el conjunto de prueba mostrará la robustez del modelo, con datos que la DNN nunca ha visto. Para complementar el proceso de validación y comparación de los modelos enlistados en este artículo se dejaron 75 muestras para ser validadas y contrastadas por los modelos establecidos en el estado del arte y el generado en esta investigación.

### 2.3 Ecuaciones gobernantes en el estado del arte

Existen numerosas ecuaciones que pretenden establecer una relación entre el esfuerzo de compresión simple y el esfuerzo de tensión. Organismos institucionales e investigadores alrededor del mundo han realizado propuestas de ecuaciones para establecer una relación entre dichas pruebas. Las ecuaciones analizadas en este estudio están descritas en (1)-(8).

$$f_{sp} = 0.56 * f_c^{0.5} \quad (1)$$

$$f_{sp} = 0.34 * f_c^{0.735} \quad (2)$$

$$f_{sp} = 0.272 * f_c^{0.71} \quad (3)$$

$$f_{sp} = 0.294 * f_c^{0.69} \quad (4)$$

$$f_{sp} = 0.106 * f_c^{0.948} \quad (5)$$

$$f_{sp} = 0.3 * f_c^{2/3} \quad (6)$$

$$f_{sp} = 0.313 * f_c^{0.667} \quad (7)$$

$$f_{sp} = 0.466 * f_c^{0.66} \quad (8)$$

donde,  $f_{sp}$  hace referencia al esfuerzo a tensión indirecta, y la variable  $f_c$  se refiere al esfuerzo de compresión simple. La ecuación (1) fue propuesta por el ACI (ACI Committee, 318,1999) en el año de 1999, la ecuación (2) por Carneiro and Barcellos en 1953 (Carneiro et al.,1953), (3) por Carino and Lew en 1982 (Carino, Lew, 1982), (4) por Oluokun et al. en 1991 (Oluokun et al.,1991), (5) por Selim en 2008 (Selim, 2008), (6) por CEB-FIP Model Code for Concrete Structure en 1990 (CEB-FIP,1990), (7) por Raphael en 1984 (J.M., 1984) y (8) por Gardner et al. en 1988 (Gardner et al., 1988).

### 2.4 Red neuronal artificial profunda

El esquema de una red neuronal artificial se puede entender como un apilamiento de capas que van interconectadas una contra, con una capa para recibir los parámetros de entrada, y otra para almacenar la salida. A cada capa se le asigna el valor de una variable  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ . El término  $a$  proviene de la palabra axión. Los axiones se indican para el número de capas contenidas en la

red neuronal. Cada vector se conoce como vector de activación y es igual en tamaño al número de neuronas que componen la capa anterior. El Vector  $a_0$  se representa por la siguiente expresión,

$$a_0 = \begin{pmatrix} a_0(0) \\ a_0(1) \\ \vdots \\ a_0(m) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Los pesos que se generan en cada conexión se asocian con la variable  $w$ . Estos pesos corresponden a los valores de los pesos que definen la entrada de una neurona.  $w$  se conoce como una matriz que se extiende al orden del número de neuronas entre las capas que se encuentran. Esta definición se puede generalizar por expresión (10).

$$[w_{mn}] = \begin{bmatrix} w_{00} & \cdots & w_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m0} & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Además, se realiza la suma de una neurona en cada capa conocida la cual se identifica como el sesgo. Esta variable permite regular el umbral del comportamiento de la neurona y viene dada por el vector correspondiente a la expresión (11).

$$b_0 = \begin{pmatrix} b_0 w b_0(0) \\ b_0 w b_0(1) \\ \vdots \\ b_0 w b_0(m) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Cada neurona recibe la suma de los productos realizados entre los pesos y los datos de entrada. Este producto está relacionado con el proceso de sinapsis. Así, es posible generalizar la ecuación de una red neuronal como:

$$\sum_{i=0}^n f(w_i a_i + b). \quad (12)$$

Y, para este estudio puede ser reescrita como

$$k_n = \sum_{i=0}^1 f(w_i a_i + b_n) \quad (13)$$

donde  $a_i$  corresponde al vector de entrada,  $k_n$  es la salida o el resultado final del modelo,  $w_i$  es la matriz de pesos,  $b$  es el vector de sesgo y  $f$  representa la función de activación. La neurona artificial se considera como una función lineal con una matriz de peso adaptable. Todas las capas ocultas operan con funciones de activación ReLU, la capa final opera de igual forma con una función de activación ReLU.

## 2.5 Arquitectura de la red neuronal profunda

La arquitectura de la DNN se compone de una capa de entrada, con una sola neurona, 5 capas ocultas con 200 neuronas en cada capa, y una capa de salida con una sola neurona. La Figura 1 muestra el diagrama de la estructura de la red neuronal propuesta por los autores.

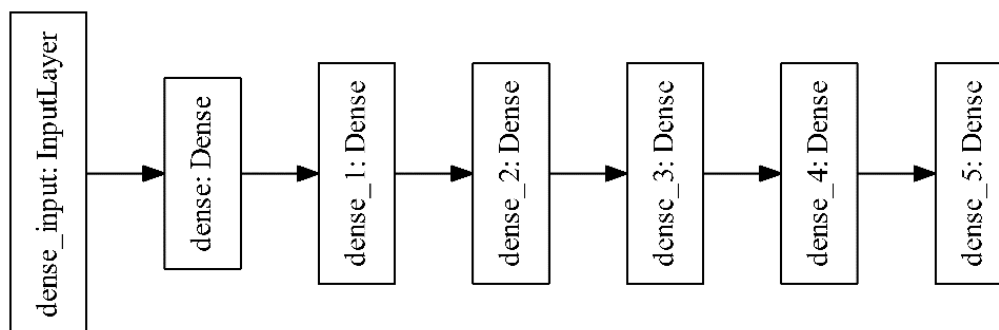


Figura 1. Diagrama de la DNN, donde se aprecia una capa de entrada, 5 capas ocultas y una capa de salida.

La red neuronal opera con un optimizador Adam, el cual está configurado con un parámetro de rango de aprendizaje igual a 0.0000001. La función de pérdida para evaluar el error en el entrenamiento del modelo es el MSE (mean square error) también conocido como el error cuadrático medio, el cual está dado por la siguiente ecuación.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{predicted})^2 \quad (14)$$

### 3. RESULTADOS

Inicialmente se presentan resultados estadísticos del conjunto de datos analizados, los cuales se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadística descriptiva del conjunto de datos analizados

	Elementos a compresión	Elementos a tensión
<b>Cantidad de datos</b>	495.000000	495.000000
<b>Media aritmética</b>	42.275823	3.073996
<b>Desviación estándar</b>	7.925736	0.828937
<b>Valor mínimo</b>	28.142400	1.969968
<b>25%</b>	34.961579	2.444685
<b>50%</b>	41.388836	2.819485
<b>75%</b>	50.397428	3.557928
<b>Valor máximo</b>	55.643098	5.235856

A partir de la Tabla 3, se observa que la desviación estándar en las pruebas de compresión simple es mayor a la presentada en la prueba de tensión indirecta. Por lo tanto, se concluye que los resultados en esa prueba pueden contener valores atípicos o también conocidos como outliers, los cuales deberán ser analizados con mayor detalle en un trabajo futuro.

Todos los modelos se probaron en un conjunto de 75 muestras para contrastar los valores predichos por las ecuaciones de la sección 2.3. La Figura 2 muestra la comparación entre los valores predichos por cada ecuación y los valores actuales del conjunto de datos. El comportamiento ideal en este tipo de representaciones es la orientación de los datos en diagonal, formando un ángulo de 45° con respecto a la horizontal.

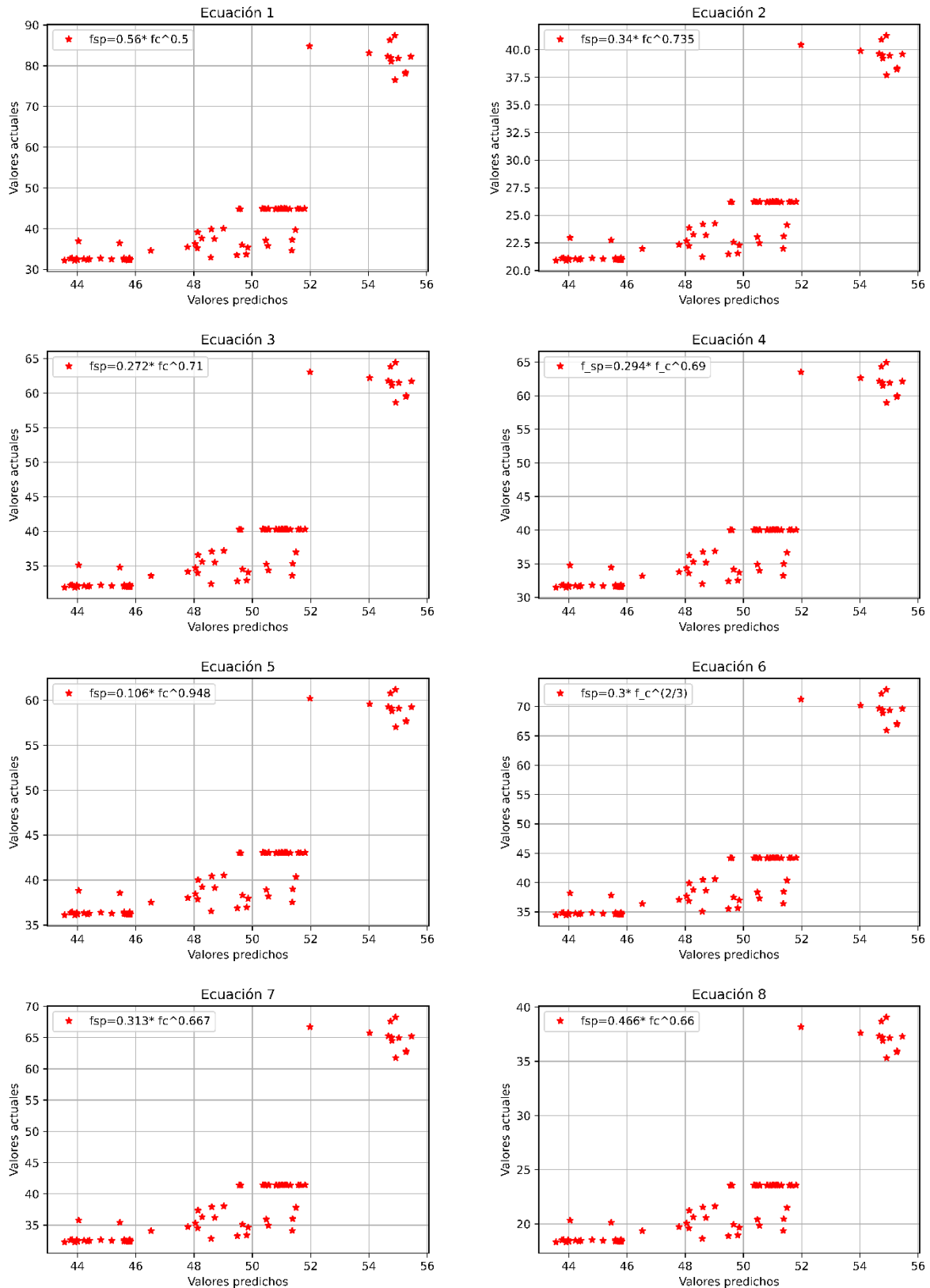


Figura 2. Resultados de la comparación entre los valores predichos y los valores actuales de cada una de las ecuaciones establecidas en la sección 2.3.

A partir de la Figura 2, se observa que las tendencias son similares, ya que las ecuaciones contienen el mismo patrón de funcionalidad, un coeficiente de punto flotante que multiplica al esfuerzo de compresión simple elevado a un orden menor de 1.0.

En la Figura 3, se detalla el comportamiento de la DNN, en donde se puede apreciar que los datos tienen un mejor ajuste entre los valores predichos y los actuales. Esta afirmación, puede comprobarse numéricamente en la Tabla 4, que corresponde a los valores del coeficiente de determinación  $R^2$  de cada una de las ecuaciones analizadas en esta investigación.

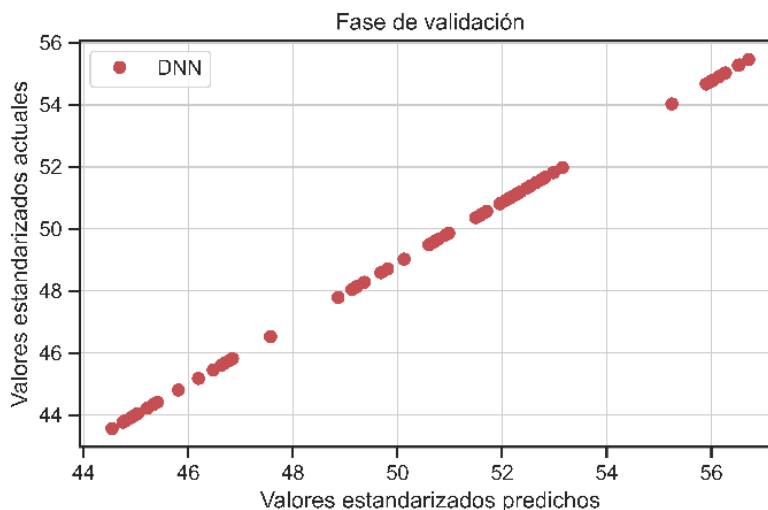


Figura 3. Resultados de la comparación entre los valores predichos y los valores actuales de la red neuronal profunda.

Tabla 4. Valores del coeficiente de determinación para cada uno de los modelos evaluados.

No. De Ecuación o modelo	Coefficiente de determinación $R^2$ en %
Ecuación (1)	-17.29412595
Ecuación (2)	-45.34710695
Ecuación (3)	-10.86052391
Ecuación (4)	-11.51633344
Ecuación (5)	-5.04237851
Ecuación (6)	-8.43317575
Ecuación (7)	-10.49771275
Ecuación (8)	-55.90728182
DNN	90.15129292

Es posible apreciar de la Tabla 4 que el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  tiene el mejor comportamiento para la DNN. Este valor se considera ideal cuando se alcanza el valor del 100% positivo. En el caso de las ecuaciones (1)-(8) se aprecia que el valor de ajuste no es un valor cercano a un entero positivo superior de 60, lo cual hubiese indicado un ajuste medianamente aceptable dado la variabilidad del conjunto de validación.

A fin de observar y evaluar el desempeño del algoritmo de la DNN, se muestra en la Figura 4 la gráfica del error contrastada con el número de épocas en las cuales se entrenó el modelo.

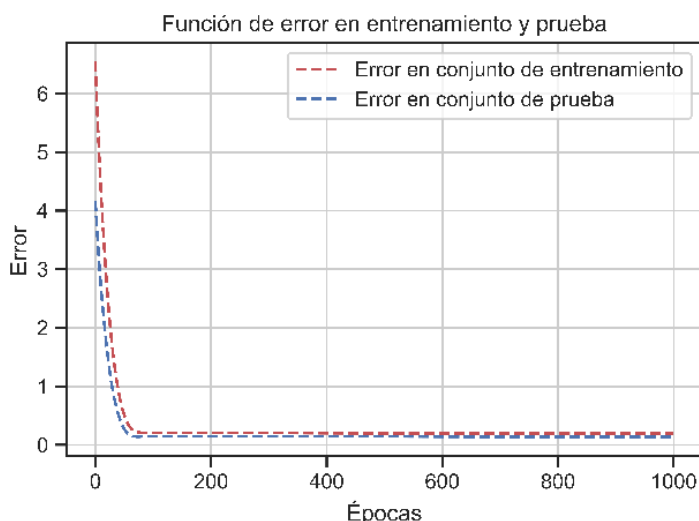


Figura 4. Disminución del error en el desempeño del entrenamiento de la DNN.

La DNN se entrenó por un total de 100 épocas en donde se aprecia que hay una convergencia entre el conjunto de entrenamiento y el conjunto de prueba, este modelo fue el utilizado para realizar la validación del conjunto de 75 elementos.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de los modelos establecidos en el estado del arte, es posible apreciar que muy difícilmente ecuaciones estáticas van a poder representar el comportamiento de un concreto con condiciones particulares. Las ecuaciones propuestas para predecir el esfuerzo a compresión simple basándose solamente en el esfuerzo de tensión solamente se comportan de manera adecuada con el conjunto de datos utilizado para su formulación. Sin embargo, este enfoque denota ausencia de robustez, flexibilidad y adaptación a los datos. Las ecuaciones existentes son ecuaciones fijas, las cuales no generalizan datos que puedan salirse de cierta tendencia. Por el contrario, el modelo propuesto en esta investigación contempla la parte de adaptabilidad de los datos, proporcionando un modelo no estático, sino más bien, dinámico.

La DNN mostró un desempeño superior, alcanzando un valor de  $R^2 = 0.9015$ , valor que queda por encima de los valores de  $R^2$  de los modelos que se emplearon para contrastar en este estudio. El conjunto de validación realmente era un conjunto de datos robusto y variable con la intención de realmente poner a prueba la robustez de las ecuaciones y la DNN. La DNN mostró una capacidad interesante de adaptación al nuevo conjunto de datos, escenario que no pudo concretarse en las ecuaciones existentes en el estado del arte.

Con los análisis realizados en esta investigación se concluye que no es posible establecer ecuaciones estáticas que generalicen el comportamiento de los materiales; por el contrario, debemos incursionar e insertar modelos adaptativos, flexibles y robustos que sean capaces de generalizar los patrones que existen dentro de los datos. Las redes neuronales artificiales, al día de hoy, han demostrado ser capaces de lograr esta difícil tarea con un coste computacional relativo al éxito que brindan.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al AULA-CIMNE Morelia, por el financiamiento de la presente investigación.

## 6. REFERENCIAS

- Guzmán Torres, J. A. (2020). “*Análisis de sensibilidad y ciencia de datos de un concreto de alta durabilidad y alto desempeño en infraestructura*”, PhD Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 23.
- Guzmán-Torres, J. A., Domínguez-Mota, F. J., Alonso-Guzmán, E. M., Martínez-Molina, W., & Ruiz, G. T. (2021). *A review of concrete performance employing a starch as addition using several regression techniques*. *Advanced Materials Research*, 1160, 1-14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1160.1>
- Guzmán-Torres, J. A., Domínguez-Mota, F. J., Tinoco-Guerrero, G., Alonso-Guzmán, E. M., & Martínez-Molina, W. (2021). *Predicting the Compressive Strength Based in NDT Using Deep Learning*. Special Publication, 350, 90-102. <https://doi.org/10.14359/51734315>
- Chhorn, C., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2018). *Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.09.002>
- Elgendy, M. (2020), “*Deep learning for vision systems*”, Simon and Schuster, p. 6.
- ACI Committee 318, (1999). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary, 318R-99*, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Carneiro, F.L.L., Barcellos, A., (1953), *Tensile Strength of Concrete*, RILEM Bulletin No. 13, Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Paris.
- Carino, N.J., Lew, H.S., (1982), *Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete*, *ACI Journal Proceedings*, 79 (3), 214e219.
- Oluokun, F.A., Burdette, E.G., Deatherage, J.H., (1991), *Splitting tensile strength and compressive strength relationships at early ages*, *ACI Materials Journal*, 88 (2), 115e121.
- Selim, P., (2008). *Experimental investigation of tensile behavior of high strength concrete*, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 15 (6), 467e472.
- CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, (1990). *Evaluation of the Time Dependent Behaviour of Concrete*. Bulletin d'Information No. 199, Comité Européen du Béton/Fédération Internationale de la Précontrainte, Lausanne.
- Raphael, J.M., (1984), *Tensile strength of concrete*, *Journal of the American Concrete Institute*, 81 (2), 158e165.
- Gardner, N.J., Sau, P.L., Cheung, M.S., (1988), *Strength development and durability of concretes cast and cured at 0 C*, *ACI Materials Journal*, 85 (6), 529e536.





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-732-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. CC – 11 – 21



Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## **Estudio comparativo de diferentes cañones urbanos, para eficientizar el comportamiento térmico del entorno construido, variando geometría, envolvente y orientación como técnica de mitigación para la Isla de Calor Urbano, mediante software de simulación de dinámica de fluidos**

R. M. Grajeda-Rosado<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [lgrajeda@uv.mx](mailto:lgrajeda@uv.mx)

<sup>1</sup> Programa Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, México

### **RESUMEN**

El objetivo principal de este estudio está ligado a la comprensión del comportamiento térmico en entornos urbanos a microescala, posteriormente a la revisión documental, se realiza un estudio comparativo de perfiles térmicos de varios cañones urbanos modificando geometría y envolvente, con datos obtenidos del software Ansys de dinámica de fluidos. Aunque se idealiza el espacio, la información amplía el conocimiento para el diseño y ordenamiento de las ciudades de acuerdo con los modelos de radiación y turbulencia. Concluyendo que es posible la reducción de 1°C de temperatura y estabilizar el comportamiento de las líneas térmicas, gracias al sombreado y convección del viento a velocidad de 1.2 m/s a nivel dosel como una técnica de mitigación para la Isla de Calor Urbano.

**Palabras clave:** Isla de Calor Urbano; perfil térmico; mitigación; simulación

## 1. INTRODUCCIÓN

Para el Siglo XXI, las ciudades se han convertido en el centro del desarrollo cultural y económico de la humanidad, es por tanto que la planeación urbana debe asegurar una correcta interacción de su infraestructura con las necesidades del ser humano que la habita (Ngarambe, et al., 2020), e indiscutiblemente, poseer un correcto vínculo con el medio ambiente para ostentar el título de resiliente y sustentable.

Actualmente, el conocimiento sobre el diseño de las ciudades está impulsado con mayor ahínco por la gran demanda de espacios urbanos originado por el crecimiento demográfico junto con los movimientos migratorios, así como marca el informe de las Naciones Unidas, donde se espera que de 7,700 millones de personas actualmente para el año 2050 alcance los 9,700 millones, y durante este periodo la población mundial será cada vez más urbanizada y el rango de personas mayores a 65 años supere en número a los menores de 5 años (ONU, 2020).

Un fenómeno altamente investigado referente a los entornos urbanos, es la Isla de Calor Urbano (ICU), que infiere el incremento de temperaturas ambientales internas en la ciudad, en comparación con las zonas exteriores a ella, como son las rurales, inclusive, Ulpiani (2021) ha demostrado que dicho fenómeno se puede asociar con el patrón de la contaminación atmosférica porque fomenta la demanda de energía para mejorar la confortabilidad en los espacios, aumentado la generación de gases de invernadero y acrecentado la mortalidad por estrés a causa del aumento de temperatura que los habitantes viven de manera más prolongada como son las olas de calor (Li, et al., 2018); creando así, un círculo vicioso difícil de romper.

Varios son los factores que alteran la temperatura en la ciudad, generan la forma y ubicación de las isotermas de ICU como son: a) los comportamientos de reflectancia, albedo y emisividad de las superficies urbanas, b) el balance de la evapotranspiración en los entornos urbanos creados por las ares verdes y los cuerpos de agua, c) variables dentro del diseño urbano, que generan la geometría, relación de aspecto, densidad de construcción, uso de suelo, y d) el calor antropogénico ( $Q_F$ ), dividido en el metabólico, industrial, construcción y vehicular (Santamouris, et al., 2011).

La búsqueda de la comprensión profunda del patrón espacio temporal de los perfiles térmicos y los parámetros que los modifican en la ciudad es una línea de investigación altamente requerida, porque permite alcanzar el confort en áreas exteriores y mejorar la eficiencia energética de las edificaciones.

Según Apritasari et al. (2022), en su revisión documental de las técnicas de mitigación para ICU, lo más investigado para su mitigación son los aspectos geométricos y los materiales, de los primeros las investigaciones se enfocan en gran medida en la densidad, la relación H/W de los cañones urbanos y la orientación, mientras que los materiales analizados son los utilizados en pavimentos, cubiertas, y fachadas. Ellos afirman que la geometría afecta la tasa de ganancia de radiación solar y el comportamiento del viento, y los segundos la absorción de la radiación y grado de reflexión, y es, donde acoplándose estos fenómenos se intensifica las isotermas urbanas.

La figura 1, muestra las líneas de investigación de ICU, ubicando los factores, unidades de medida, tipologías, métodos de medición y modelado, donde el presente estudio se encuentra ubicado.

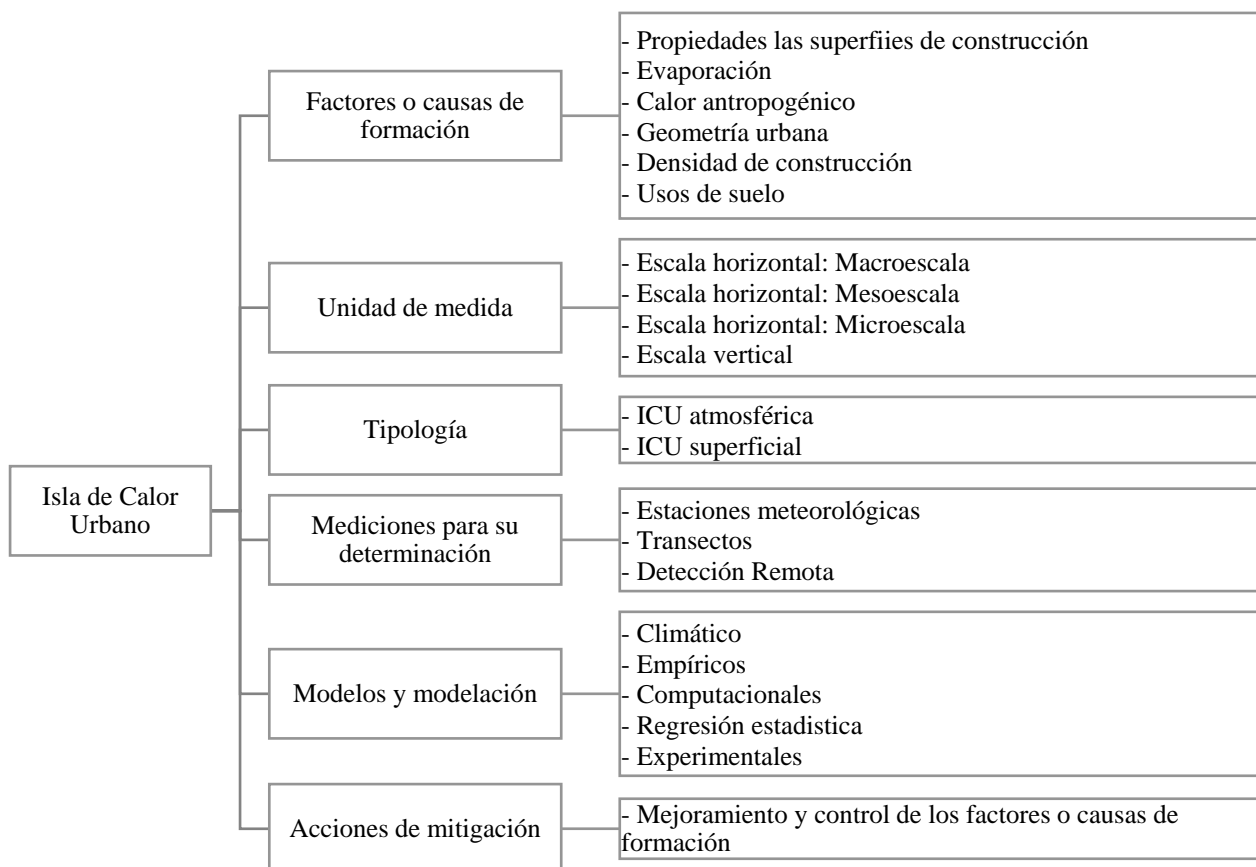


Figura 1. Líneas investigación de la Isla de Calor Urbano.

Los métodos usados para medir y determinar la ICU se han basado en el uso de estaciones meteorológicas, transectos y teledetección. Para determinar las isotermas máximas y mínimas de la ICU Atmosférica o de dosel en macro y microescala, la temperatura del aire es medida utilizando una red estaciones meteorológicas o transectos (mediciones con desplazamiento móvil), siendo las estaciones las primeras en brindar datos de los cambios de temperatura en las ciudades a nivel dosel, con estudios climatológicos comparativos de hasta 30 años (Martinelli, et al., 2020) (Montaner-Fernández, et al., 2020), (Campoverde, 2018). La ICU Superficial, caracteriza típicamente como la toma de temperatura de las superficies terrestres (LST por sus siglas en inglés Land Surface Temperature), su medición ha sido efectuada mediante el uso de sensores remotos térmicos aerotransportados o el empleo de imágenes satelitales, lo que proporciona un cuadro sinóptico y uniforme para estudiar los efectos de ICU Superficial a escalas regionales con software de Sistemas de Información Geográfica. Las mediciones de la temperatura en in situ o remotas, es información importante para determinar la asertividad de una técnica de mitigación, la validez predictiva de un modelo y definir de manera asertiva las variables de los fenómenos que intervienen en los intercambios de flujo de calor a nivel urbano.

Definitivamente, la recreación de las isotermas de la ICU o los flujos térmicos para determinar los cañones urbanos más afectados es fundamental en la planificación de una ciudad, permitiendo una comprensión adecuada de la urbe y su relación con confort urbano, salud física y mental, logrando un mapeo que determinan correcta ubicación e intervención de las técnicas por parte de las autoridades en puntos focales.

Es importante, considerar que, gracias a la medición en campo a diferentes escalas, se ha logrado Estudio comparativo de diferentes cañones urbanos, para eficientizar el comportamiento térmico del entorno construido, variando geometría, envolvente y orientación como técnica de mitigación para la Isla de Calor Urbano, mediante software de simulación de dinámica de fluidos

verificar los resultados que arrojan diferentes softwares en la modelación y simulación del comportamiento térmico del entorno urbano, ya que cada zona tiene características diferentes y las técnicas de mitigación pueden variar su efectividad de acuerdo con estas particularidades.

Es así, como gracias a todos estos estudios y la validación entre las mediciones “in situ” con los datos arrojados de los softwares de simulaciones (Grajeda, et al., 2019) (Grajeda-Rosado, et al., 2020), las simulaciones están ganando terreno para los análisis térmicos a microescala dónde se puede evidenciar los posibles resultados de las estrategias de mitigación de la ICU y en la determinación de la carga térmica que pueden llegar afectar los edificios en esa zona.

El trabajo de Yuan et al. (2020) desarrolla una herramienta semiempírica de tipo GIS (Sistema de Información Geográfica, por sus siglas en inglés) que permite mapear el valor de la temperatura del aire en zonas residenciales de Singapur, la cual predice el comportamiento de la ICU, considerando calor antropogénico y la velocidad del viento; el rendimiento del modelo se valida con datos cruzados con CFD, el cual su objetivo es mejorar la resiliencia y sostenibilidad del clima urbano. Otra manera de abordar el tema del calor antropogénico y su expulsión a través del CFD, es el trabajo de Adelia et al. (2019), que tiene por objetivo analizar el flujo del aire, el calor expulsado por los equipos de aire acondicionado ubicados en las fachadas y su efecto en los cañones urbanos en un caso de estudio ubicado en Tokio. Diseñando 12 casos paramétricos con diferentes porosidades o aberturas en la forma de los edificios, desarrollaron una configuración del espacio urbano que les permite reducir la temperatura 0.6 °C, y además agregan la sugerencia, gracias a los resultados del programa, que la nueva ordenación debe ir acompañada con la ubicación de las condensadoras de un solo lado del cañón, para controlar la emisión de calor.

La combinación de este software, también se observa en el trabajo de Aghamolaei et al. (2021) que junto con BES (Simulación Energética de Edificios, por sus siglas en inglés) combinan los valores en la plataforma de Grasshopper, para analizar varios casos de estudio, en diferentes horarios, orientación y velocidad de viento, y con ello determinar el confort térmico en exteriores de la ciudad de Tehran, Iran que es templado semiárido. Dentro de sus análisis incorporan materiales sólidos y cristales, donde obtienen que los valores en los primeros están dentro de un rango de 16 a 61 °C y los segundos de 24 a 34 °C y determinan que estos valores modifican los °C casi un 40% en relación con el caso base.

Otro aspecto investigado con este software es el albedo de las superficies de construcción en la formación de las isotermas (Wang, et al., 2020) (Acharya, et al., 2021) las cuales han permitido aseverar que los pavimentos asfálticos disminuyen de 2 a 3 K y las superficies de concreto de 1 a 2 K en su temperatura superficial por cada 0.1 unidades de aumento del albedo. Dimoudi et al. (2014) analizando un área de 13 cuadras y considerando materiales como asfalto, pavimento gris y claros, los cuales son conocidos como materiales frescos, concluyen que si el área es sustituida por estos materiales de alto albedo la temperatura superficial promedio de las calles reduce 6.5 °C. También está siendo utilizado para determinar la efectividad de las técnicas de mitigación de ICU, como el sistema Road Pavement Solar Collector, que absorbe el calor de la superficie en pavimentos y lo convierte en energía térmica pasiva. En el estudio conducido en la ciudad cálida y húmeda de Kuala Lumpur (Nasir, et al., 2021), analizando 6 simulaciones, se confirmó que de acuerdo con su configuración se puede reducir la temperatura ambiental de 0.63 a 0.74 °C.

Un interesante trabajo de la utilidad de CFD, es la propuesta por Rodríguez-Lucas et al. (2021), que, para remediar la temperatura en el aire urbano, diseñan la creación de una chimenea o un sistema de vórtice urbano, validando los resultados del software con la construcción del experimento para medir la temperatura, velocidad del viento y las presiones. El trabajo concluye que el modelo aplicado en el diseño arquitectónico de edificios a gran escala, con un vapor y aire de 2 m/s y 450 K ingresadas al generador del vórtice, puede generar una potencia máxima de 2 megavatios, un trabajo específico de 3 kJ/kg y la capacidad de constituir vientos de 6.1 m/s (20 km/h) a 200 m y vientos de 1.5 m/s (5 km/h) a 400 m, con la cual se rompería la inercia del calor

y generar un equilibrio en los perfiles térmicos dentro de la ciudad.

El presente documento hace una revisión literaria de las técnicas actuales para medir y analizar el comportamiento térmico en la urbe a microescala, y un estudio comparativo de casos, utilizando el software Ansys CFD (Computational Fluids Dynamics) de varios entornos urbanos modificando su geometría y envolvente, para determinar la eficiencia del sombreado y convección del viento, como una técnica de mitigación para la ICU.

## 2. PARAMETROS DEL ESTUDIO COMPUTACIONAL

### 2.1 Geometrización del dominio

Para la predicción de la temperatura del aire urbano en sus diferentes escalas horizontales o verticales, según Kolokotroni et al. (2010), se puede clasificar como modelos de climatología, empíricos, de regresión estadística o modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés).

El software de Ansys versión 2022 R2, resuelve a través de una geometría dada, las ecuaciones propias de la transferencia de calor como es la radiación, convección y conducción, ubicando a través del mallado del dominio del volumen finito estructurado las operaciones a resolver, convirtiéndose en una herramienta muy poderosa en el estudio urbano, que permite analizar como la orientación, la relación de aspecto y materiales, son parámetros para determinar el perfil higrotérmico de los cañones y valorar su relación con el confort (Mirzaei, 2015).

Para tener información de análisis, se determinó la realización de varias geometrías y su diseño de envolvente. En todos los casos, se maneja un volumen de  $171,000\text{m}^3$ , de dimensiones longitud = 95 m, ancho = 60 m y altura = 30 m, del cual fue extraído cuatro volúmenes de longitud de 40 m, con diferentes anchos, alturas y separaciones (Figura 1). La altura está definida a cumplir dos veces H del elemento urbano mayor, para evitar turbulencia en la parte superior y obtener un efecto laminar de viento a la altura del nivel dosel.

La figura 1, muestra la disposición de los tres casos de simulación, UR1, UR2 y UR3. En todos los casos, se generan tres cañones internos, los cuales serán denominados a, b, c. En el primer caso se realiza una configuración lineal, en el segundo la colocación de un cañón longitudinal y, por último, se mantiene el cañón longitudinal, pero las fachadas rotan  $3^\circ$  y los siguientes niveles también, así como se disminuyen su tamaño en la parte superior, para incrementar el movimiento del viento, en base a los principios del efecto Venturi.

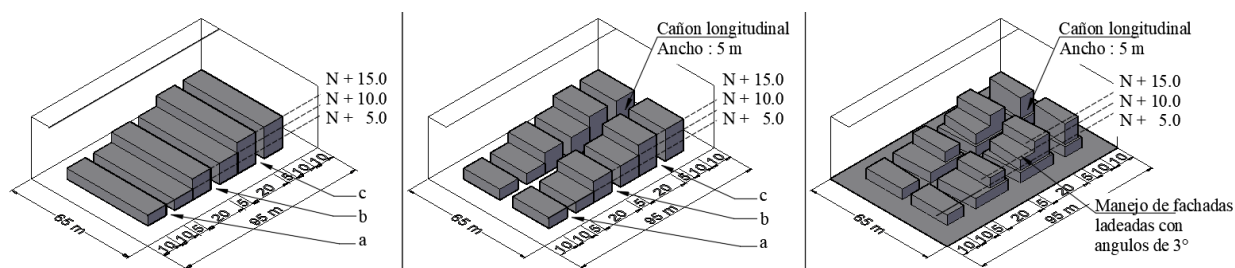


Figura 1. Casos de simulación UR1, UR2 y UR3

La envolvente de los volúmenes que simulan el entorno urbano edificado se determinó con un aplanado cemento: arena de 0.15 m de ancho, densidad de  $1,570\text{ kg/m}^3$ , calor específico  $1,000\text{ j/kg-k}$ , conductividad térmica de  $0.53\text{ w/m-k}$  y una emisividad de 0.90. Para el suelo se aplicaron las características del concreto, con un espesor de 0.20 m, densidad de  $2,300\text{ kg/m}^3$ , calor específico  $840\text{ j/kg-k}$ , conductividad térmica de  $1.00\text{ w/m-k}$  y una emisividad de 0.90, según datos obtenidos de Cengel y Ghajar (2011). Internamente el volumen del dominio se configura como un gas ideal,

Estudio comparativo de diferentes cañones urbanos, para eficientizar el comportamiento térmico del entorno construido, variando geometría, envolvente y orientación como técnica de mitigación para la Isla de Calor Urbano, mediante software de simulación de dinámica de fluidos

formado por partículas puntuales sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos.

## 2.2 Configuración del dominio

Para definir el comportamiento general del modelo apegado a las leyes de la termodinámica, se consideró que el flujo es constante con las propiedades de un gas ideal, sin embargo es isotrópico y presenta una viscosidad en el comportamiento de las paredes por lo que el modelo de turbulencia utilizado es K-épsilon Realizable Model y el Scalable Wall Functions, basándose en las ecuaciones de Reynolds Avaraged Navier-Stokers (RANS) (1), las cuales son el conjunto de ecuaciones derivadas parciales no lineales que describen el movimiento del flujo viscoso.

$$\frac{\partial vx}{\partial x} + \frac{\partial vy}{\partial y} + \frac{\partial vz}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Aunque es un espacio idealizado, se decidió ubicar el modelo en un clima cálido, por lo tanto, se utilizaron las coordenadas longitud (-96.13°) y latitud (19.17°) que corresponden a la ciudad de Veracruz, México, ubicada entre la latitud 0 y trópico de cáncer, además se define un periodo cálido, agregando que la simulación correrá en el mes de agosto el día 21, a las 13:00 horas, con base de estos datos se obtuvo que el valor de la radiación directa es 884.78 Wm<sup>-2</sup> que interviene en el modelo, y con ello generar los datos de radiaciones difusas en superficies verticales (72.57 Wm<sup>-2</sup>), superficies horizontales (118.56 Wm<sup>-2</sup>), radiación reflejada en el suelo (99.58 Wm<sup>-2</sup>), habilitando la hoja de cálculo de ANSYS “Radiation Model Surface to Surface”.

Cabe mencionar que los resultados se apegan a los datos de la ciudad y puerto de Veracruz, México, coincidiendo con valores promedios anuales propuestos para zonas donde la latitud no supera los 1000 msnm, de 952 Wm<sup>-2</sup> en atmosferas limpia (93% directa y 7% difusa), de 883 Wm<sup>-2</sup> en atmosfera media, (71% directa y 29% difusa) y de 833 Wm<sup>-2</sup> en atmosfera turbia (54% directa y 45% difusa) (CONAMA, 2012).

## 2.3 Condiciones del mallado y frontera

El mallado fue estipulado con un método de “Body fitted cartesian”, con parámetros CFD, que genera una red hexaédrica, adaptada perfectamente a la forma del ambiente urbano. Se especifica que los elementos no sean mayores a 0.5 m, por lo cual se genera un total de 958,870 nodos y 915,696 elementos, sin embargo, para ahorro de recursos de simulación, se especificó una distancia de 0.75 m, lo cual redujo más del 50% los elementos, con 435,731 nodos y 420,307 elementos (Figura 2a).

Los requisitos de frontera condicionan el modelo para cumplir con los parámetros de la termodinámica y agregar algunas disposiciones, como en este caso la introducción de viento para idealizar el espacio urbano. Por lo tanto, el modelo a) en la parte frontal se ingresa una entrada de viento “inlet” de 1.20 m/s a presión constante; b) en la parte de los costados se aplica el concepto de simetría para que el fenómeno sea considerado igual en exterior como interior; c) en la parte posterior y superior una presión de salida constante; y d) al suelo o parte inferior y todas las caras internas que simulan las construcciones se determinan como objetos tipo paredes opacas que intervienen en la radiación.

Incorporando los datos, se anexa la ubicación de las líneas de análisis, para que el programa recolecte 40 valores térmicos, y con ello obtener el perfil térmico a la altura de 1.5 y 3.0 m, en los tres cañones formados de los tres modelos micro urbanos diseñados (Figura 2b), generando en cada caso la obtención de 240 datos de medición para comparar.

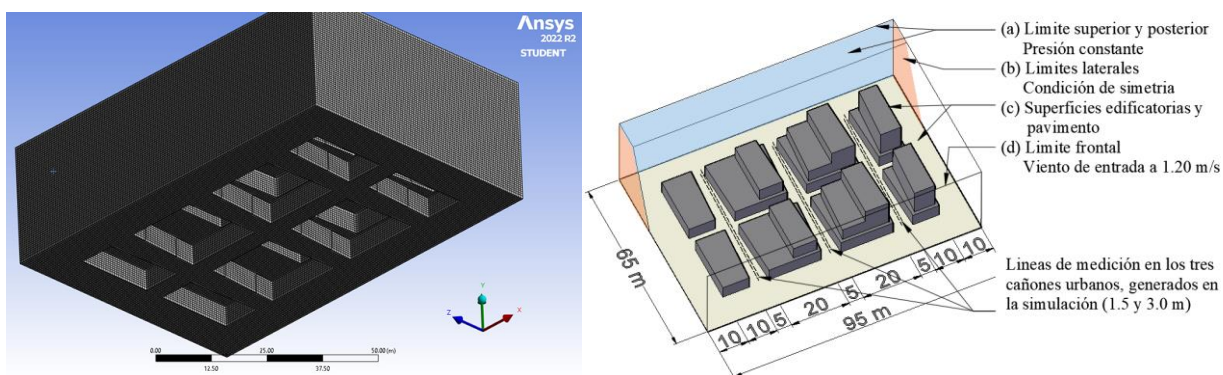


Figura 2. a) Mallado del caso UR3. b) Disposición las condicionantes de frontera y las líneas de medición en simulación en el caso UR3

### 3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados arrojados por el programa de los tres casos de simulación, donde la figura 3, muestra el comportamiento térmico superficial de las envolventes edificatorias y del pavimento y; la Tabla 1 muestra los valores máximos, mínimos y diferencial que reporto cada línea de medición.

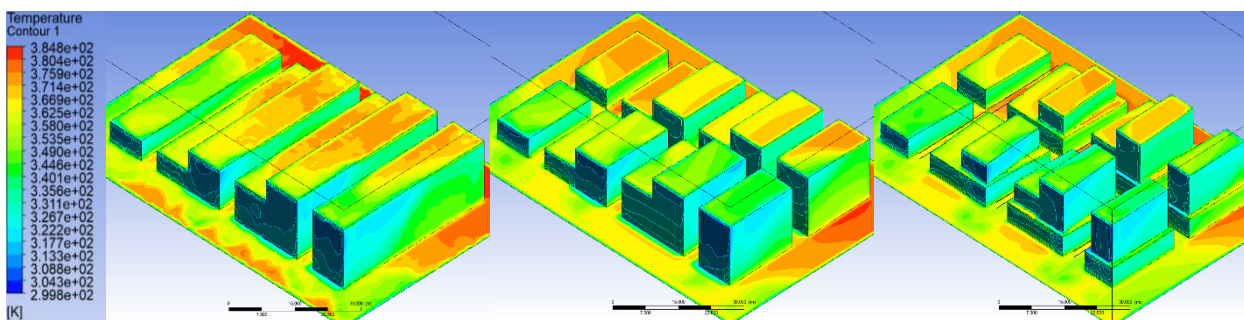


Figura 3. Temperatura superficial en los casos UR1, UR2 y UR3

Tabla 1. Valores máximos y mínimos de temperatura registrados en las líneas de medición de la simulación, expresados en °C

UR1	a (1.5m)	b (1.5m)	c (1.5m)	a (3.0m)	b (3.0m)	c (3.0m)
Max.	32.1	34.3	32.3	30.0	31.9	30.4
Min.	27.1	27.0	27.0	26.9	26.9	26.9
Diferencia	5.0	7.3	5.3	3.1	5.0	3.4
UR2	a (1.5m)	b (1.5m)	c (1.5m)	a (3.0m)	b (3.0m)	c (3.0m)
Max.	33.9	35.0	34.7	33.4	34.4	33.9
Min.	32.6	32.6	32.6	32.2	32.2	32.3
Diferencia	1.3	2.4	2.1	1.2	2.2	1.6
UR3	a (1.5m)	b (1.5m)	c (1.5m)	a (3.0m)	b (3.0m)	c (3.0m)
Max.	33.5	33.8	33.9	32.8	33.2	33.0
Min.	32.5	32.5	32.5	32.2	32.2	32.2
Diferencia	1.0	1.3	1.4	0.6	1.0	0.8

El caso UR1, muestra un comportamiento desigual en los tres cañones, a la altura de 1.5 m los valores tienen una diferencia de 5 a 7 °C, a 3.0 m los valores oscilan entre 3 y 5 °C, sin embargo, es el caso que reportó al inicio de la calle los valores más bajos con 26.9 °C. Y aunque se espera que la altura sea el factor que incremente los valores es el cañón UR-1b (central) el más alto con un valor final de 34.3 °C (Figura 4).

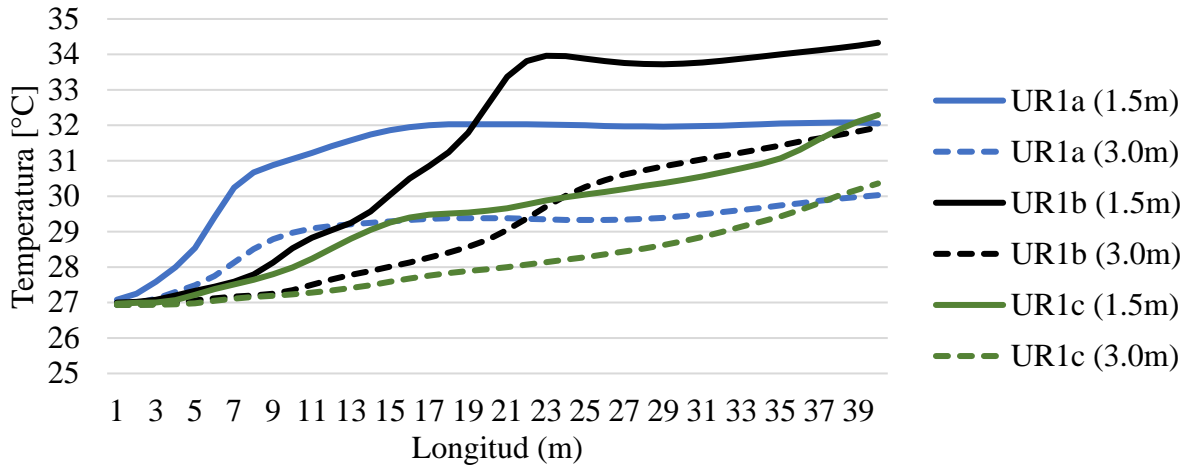


Figura 4. Grafica de valores de temperatura del caso UR1, valores en los cañones a, b, y c a las alturas de 1.5 y 3.0 m

La configuración UR2 (Figura 5) y UR3 (Figura 6) mostraron comportamiento similar, reportando las menores temperaturas en los cañones “a”, seguidos de los “c” y por ultimo los “b”. En el caso de UR2 en ambas alturas los valores oscilaron entre 1 y 2 °C, y el UR3 no sobrepaso el valor de 1.5 °C en diferencias. Se observa, en el caso UR3 a la altura de 3.0 m que los valores se homogenizan generando casi línea de tendencia parecida, con un valor de  $R^2 = 0.855$ , revelando como el viento, pierde valor de convección a medida que se adentra en el cañón. Además, la figura 6, revela que antes de la calle longitudinal la configuración de fachadas inclinadas junto con el viento mantiene la temperatura muy homogénea, y el efecto se pierde cuando cruza por la intersección incrementándose de manera más rápida.

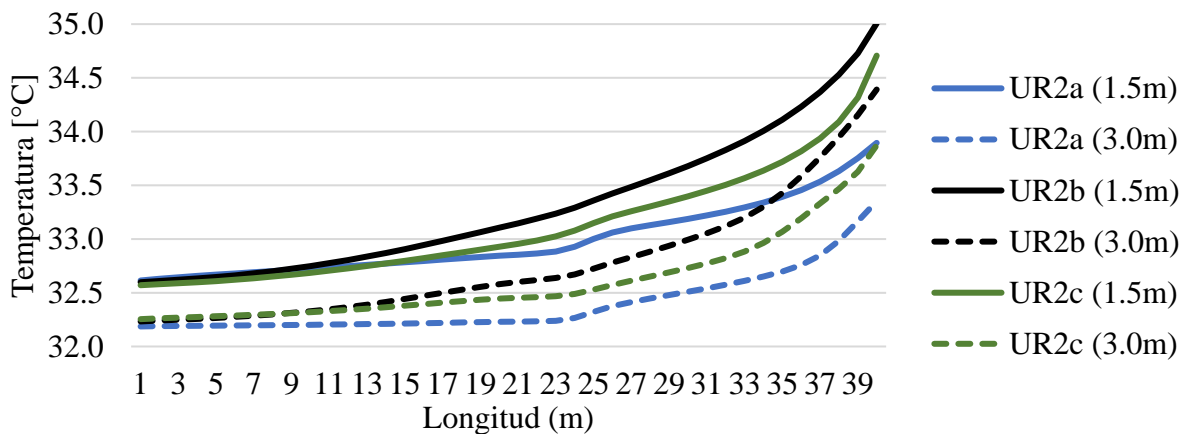


Figura 5. Grafica de valores de temperatura del caso UR2, valores en los cañones a, b, y c a las alturas de 1.5 y 3.0 m



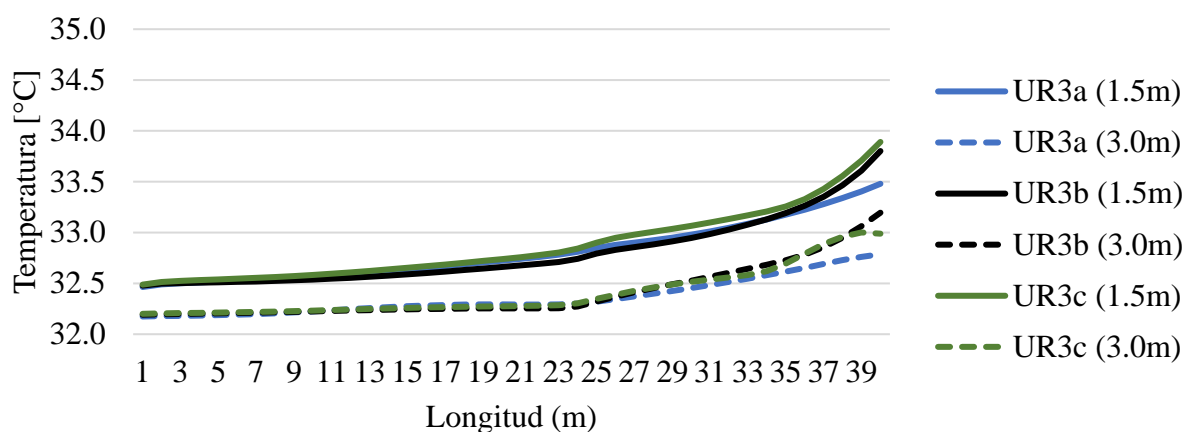


Figura 5. Grafica de valores de temperatura del caso UR3, valores en los cañones a, b, y c a las alturas de 1.5 y 3.0 m

## 4. CONCLUSIONES

En la búsqueda del entendimiento del comportamiento térmico en los espacios urbanos y como las configuraciones geométricas afectan en la temperatura, se ha generado tres casos de espacios microrurbanos idealizados para su análisis, mostrando la configuración de la entrada de datos para el uso del software Ansys para su entendimiento.

Con ello se ha mostrado como la disposición lineal (caso UR1), aunque inicialmente muestra los mejores valores de temperatura, rápidamente pierde su efectividad. La configuración de manzanas más cortas mejora la estabilización del fenómeno interno (caso UR2), sin embargo, al agregar las inclinaciones el efecto se ve homogéneo en la primera cuadra, pero es retenido en la segunda (caso UR3).

Con ello se ratifica la necesidad de incrementar el viento, gracias a la configuración de las fachadas, siendo una de las técnicas de mitigación investigadas, las cuales pueden ser analizadas gracias a este software.

La investigación muestra la practicidad y los datos para el uso del software Ansys, para futuras investigaciones sobre la climatología urbana, generando la posibilidad de realizar un repertorio más amplio de configuraciones, diseños, uso de materiales e incremento en el viento para análisis de casos de estudio en diferentes climas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico que se recibe, así como a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil y la Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat por el apoyo brindado.

## 6. REFERENCIAS

Acharya, T., Riehl, B. & Fuchs, A. (2021). *Effects of Albedo and Thermal Inertia on Pavement Surface Temperatures with Convective Boundary Conditions—A CFD Study*. Processes, 9(11), p. 2078.

Adelia, A., Yuan, C., Liu, L. & Shan, R. (2019). *Effects of urban morphology on anthropogenic heat dispersion in tropical high-density residential areas*. Energy and Buildings, Volumen 186,

pp. 368-383.

Aghamolaei, R., Fallahpour, M. & Mirzaei, P. A. (2021). *Tempo-spatial thermal comfort analysis of urban heat island with coupling of CFD and building energy simulation*. Energy and Buildings, Volumen 251, p. 111317.

Apritasari, Y., Triyadi, S., Wonorahardjo, S. & Indraprastha, A. (2022). *Review on Appropriateness of Urban Heat Island Mitigation Technologies at Several Climates Condition*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, July, 1058(1), p. 012011.

Campoverde, A. (2018). *Análisis de la isla de calor urbana en el entorno andino de Cuenca-Ecuador*. Investigaciones Geográficas (Esp), Volumen 70, pp. 167-179.

Cengel, Y. & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Fundamentos y aplicaciones. 4ta. ed. Barcelona: McGrawHill.

CONAMA (2012). *Congreso Nacional del Medio Ambiente*. Available at: <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706100.pdf>

Dimoudi, A., et al. (2014). *Use of cool materials and other bioclimatic interventions in outdoor places in order to mitigate the urban heat island in a medium size city in Greece*. Sustainable Cities and Society, Volumen 13, pp. 89-96.

Grajeda, R., Alonso, E., Esparza, C., Escobar, C. (2019). *Simulación del comportamiento térmico en exteriores urbanos correlacionando las variables de calor antropogénico vehicular y orientación*. ECORFAN Journal-Spain, p. Aprobado para publicación.

Grajeda-Rosado, R., et al. (2020). *Thermal Analysis of the Urban Canyon Based on the Variables: Orientation, Wind and Vehicular Anthropogenic Heat*. s.l., s.n., pp. 1-6.

Kolokotroni, M., et al. (2010). *A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London*. Solar Energy, 84(12), pp. 2246-2255.

Li, H., et al. (2018). *A new method to quantify surface urban heat island intensity*. Science of the total environment, Issue 624, pp. 262-272.

Martinelli, A., Kolokotsa, D., Fiorito, F. (2020). *Urban heat island in Mediterranean coastal cities: The case of Bari (Italy)*. Climate, 8(6), 79., 8(6), p. 79.

Mirzaei, P. (2015). *Recent challenges in modeling of urban heat island*. Sustainable cities and society, Volumen 19, pp. 200-206.

Montaner-Fernández, D., et al. (2020). *Spatio-Temporal variation of the urban heat island in Santiago, Chile during summers 2005–2017*. Remote Sensing, 12(20), p. 3345.

Nasir, D., et al. (2021). *Numerical analysis of an urban road pavement solar collector (U-RPSC) for heat island mitigation: Impact on the urban environment*. Renewable Energy, Volumen 164, pp. 618-614.

Ngarambe, J., et al. (2020). *Synergies between urban heat island and heat waves in Seoul: The role of wind speed and land use characteristics*. PLoS One, 15(12), p. e0243571.

ONU, N. U. (2020). *UN75 más allá de 2020*. Available at: <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics#:~:text=Se%20espera%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,disminuyendo%20la%20tasa%20de%20fecundidad>.

Rodríguez-Lucas, L., Ning, C., Fajardo-Pruna, M., Yang, Y. (2021). *Study of Vortex Systems as a Method to Weakening the Urban Heat Islands within the Financial District in Large Cities*. Sustainability, p. 13206.

Santamouris, M., et al. (2011). *Energy and Climate in the Urban Built Environment: The canyon effect*. London & New York: Routledge, Taylor & Francis Group.

Ulpiani, G. (2021). *On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework*. Science of The Total Environment, Volumen 751, p. 141727.

Wang, J., Chen, J., Wu, J., Zhou, Z. (2020). *Investigation into the effect of pavement albedo and environmental factors on urban heat island effect using CFD simulation*. In *Functional Pavements*. CRC Press., pp. 289-295.

Yuan, C., et al. (2020). *Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion*. *Building and Environment*, Volumen 176, p. 106876.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-742-MX  
pp. CC – 22 – 33



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Estudio experimental para la reducción del rebase del oleaje (overtopping) en rompeolas convencionales

J. Ramirez<sup>1\*</sup>, V. Román<sup>2</sup>, R. Mompremier<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [jose.rc@zacatepec.tecnm.mx](mailto:jose.rc@zacatepec.tecnm.mx)

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus Zacatepec / Tecnológico Nacional de México.

<sup>2</sup> Academia de Ofimática, Centro de Bachillerato Tecnológico industrial y de servicios No. 136, Jojutla, Morelos.

<sup>3</sup> Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. Cd. de México.

### RESUMEN

En México se realizan actividades de intercambio comercial por la vía marítima a través de los puertos, mismos que deben brindar instalaciones y servicios de calidad; contando con obras de protección que den seguridad y resguardo a las embarcaciones atracadas como a las instalaciones y servicios del recinto portuario. Tales obras de protección (rompeolas), en algunos puertos mexicanos son muy antiguos y los frecuentes eventos meteorológicos ocasionan daños en su estructura, además de tener bajas cotas de coronamiento, por lo que la ola rebasa al rompeolas (overtopping), produciendo que el oleaje de tormenta afecte considerablemente las operaciones portuarias; generando así, pérdidas económicas, de equipo, instalaciones, y algunas veces, de vidas humanas. Por lo que se llevó a cabo un estudio en un modelo físico reducido de un rompeolas de enrocamiento superficial permeable, proponiéndose implementar una berma con dos diferentes anchos de corona de 10 y 20 metros, y dos taludes diferentes de 1.5:1 y 2:1 para conocer mediante el análisis y experimentación su comportamiento, el diseño más adecuado para este tipo de estructuras ante la incidencia de oleaje irregular extremo. Pretendiendo con esto la reducción del rebase del oleaje, y así mismo disminuir los costos de construcción.

**Palabras clave:** rompeolas, escolleras, overtopping, run-up, run-down.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Puertos son fundamentales para el apoyo del crecimiento de cualquier nación, pues en ellos se realizan actividades de comercio marítimo, industrial, pesquero y turístico, convirtiéndose así en importantes polos de desarrollo; debiendo contar con la infraestructura necesaria, adecuada y en óptimas condiciones.

Dentro de los puertos, las obras de protección (rompeolas y escolleras), tienen como función minimizar la incidencia del oleaje y con esto generar una zona de calma dentro del puerto para que las embarcaciones puedan realizar sus operaciones de carga y descarga de mercancías. Por lo que los rompeolas de berma, estudiados y construidos en diferentes países del mundo, han tenido gran funcionalidad para mitigar el oleaje y al mismo tiempo, presentan costos más económicos de construcción comparado con rompeolas convencionales de enrocamiento. Al ser estas una alternativa de solución, se estudiaron las bermas como implementaciones a los rompeolas con daños y con cotas bajas de coronamiento para ser rehabilitados y mejorar su operatividad y funcionalidad.

Para el estudio de esta alternativa se empleó un equipo de medición de oleaje controlado por computadora para recabar y posteriormente analizar los datos de oleaje obtenidos. En cada ensayo se evaluó el rebase del oleaje (overtopping); además se empleó equipo de fotografía y video para registrar los efectos del oleaje sobre la obra de protección, y un perfilador de fondo manual para obtener el perfil de la sección después de cada ensayo y conocer el comportamiento y estabilidad de la estructura (para cada berma); y de los análisis de resultados se obtuvieron gráficos del comportamiento del rebase del oleaje utilizando varios métodos encontrados en el estado del arte como: (Owen, Jorgen Juhl y Peter Sloth, y Van der Meer utilizando para este último dos criterios), y la estabilidad de las diferentes bermas que dependerá su eficiencia del ancho y talud de las mismas.

Por lo anterior, se pretende dar a conocer este trabajo desarrollado y la importancia que tienen los modelos experimentales dentro de la hidráulica marítima y portuaria. Siendo las bermas adosadas al talud del rompeolas o escolleras, una alternativa para la reducción del rebase del oleaje (overtopping)

## 2. PROCEDIMIENTO

Durante años, los modelos físicos han sido una herramienta importante para resolver problemas en la Ingeniería Hidráulica. En la actualidad se disponen de técnicas avanzadas y muchas otras sofisticadas para la modelación física de fenómenos hidráulicos; permitiendo predecir con alto grado de certidumbre lo que puede ocurrir en el prototipo y por consiguiente obtener los mejores resultados de funcionalidad, estabilidad, diseño, economía, entre otras ventajas. (Vergara, 1993)

De acuerdo a la metodología utilizada, puede agruparse en cuatro etapas de acuerdo a lo siguiente:

- Instalación, equipo e instrumentación.
- Diseño y Construcción del modelo
- Calibración y Ensayos

### 2.1 Instalación, equipo e instrumentación.

La instalación empleada en el estudio, es uno de los canales con que cuenta el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura de la Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Este canal de oleaje angosto está prácticamente conformado por paredes de concreto, y en algunos tramos del canal con paredes de acrílico reforzado con acero estructural; el espesor de acrílico es de 15 mm. Las dimensiones del canal son las siguientes: 24.50 metros de longitud, 0.66 metros de ancho y 0.90 metros de profundidad (figura 1).



Figura 1. Canal de oleaje angosto del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, I.P.N.

El canal de oleaje angosto utilizado está provisto de un generador de oleaje que reproduce señales de oleaje regular e irregular mediante una paleta de tipo pistón (figura 2), cuyos movimientos son de tipo traslacional generados por un gato hidráulico, el cual es controlado por un equipo de cómputo, (figura 3).

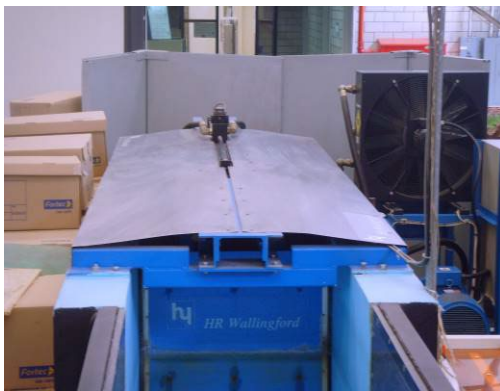


Figura 2. Paleta de tipo Pistón hidráulico.



Figura 3. Equipo de cómputo que controla el generador de oleaje.

El generador de oleaje es controlado y operado con un equipo de cómputo, el cual cuenta con un software llamado WAVEGEN, el cual permite simular las condiciones del mar dependiendo de las necesidades del estudio o proyecto y de forma variable (Beresford, 1994), (Ruiz, 2005).

Como **instrumentación** para la medición de oleaje a reproducir en los ensayos, se pueden utilizar sensores de oleaje de tipo resistivo (figura 4). Estos sensores de tipo resistivo transmiten las señales analógicas recabadas hacia un ológrafo de cuatro canales (figura 5) que amplifica y envía a un convertidor de señales (analógico/digital) con que cuenta el equipo de cómputo; además también se cuenta con un perfilador de fondo manual (figura 6), el cual está graduado al milímetro para levantar los perfiles de las diferentes estructuras utilizadas en el estudio y así poder obtener los valores para ser graficados posteriormente.



Figura 4. Sensor de oleaje de tipo resistivo.



Figura 5. Ológrafo y controlador del generador de oleaje.

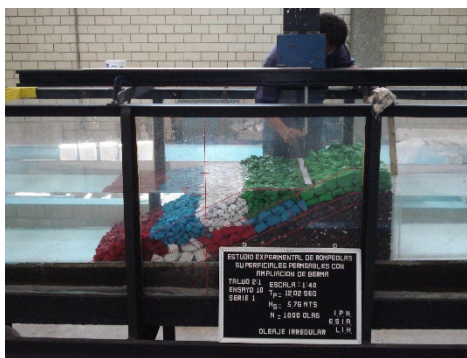


Figura 6. Perfilador de fondo manual.

Cabe mencionar que el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica cuenta con una caseta de control donde se operan los equipos de cómputo, los sensores y el generador. Además de que en dicha caseta están protegidos de la humedad (figura 7).



Figura 7. Caseta de control del generador de olas, equipo e instrumentación.

## 2.2 Diseño y construcción del modelo.

En México el tipo de rompeolas que más se construye son los rompeolas a talud, donde el talud recomendado para las condiciones de las playas mexicanas, según las experiencias en la materia y en la optimización económica son: talud para el lado mar 2:1; talud para el lado protegido oscila entre 1.25:1 y 1.5:1. (DACE-II, 1984), (Ruiz, 2007) y (Hughes 1993).

La sección transversal de una escollera o rompeolas generalmente está formada de 3 capas principales que son: Núcleo, Capa secundaria y Coraza. [C.F.E., 1983]. Los pesos de los elementos de la capa correspondiente a la coraza, de las obras de protección de ciertos puertos de México, oscila entre las 6 y 20 toneladas. En su mayoría se tienen pesos de aproximadamente 12 toneladas; por lo que se toma este valor para dicha capa del rompeolas. La fórmula más utilizada para calcular el peso de los elementos, es la propuesta por Hudson y está basada en la de Iribarren, siendo la siguiente:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot \theta} \quad (1)$$

$$\therefore W = 12 \text{ toneladas}$$

Partiendo de ese valor se prosigue a calcular los pesos de las otras dos capas: núcleo y capa secundaria, siendo para la capa secundaria  $W/10$ . Teniendo como resultado 1.2 toneladas. Para la capa del núcleo se tiene:

$$\frac{W}{200 \text{ a } 6000} \therefore W = \text{aproximadamente } 60 \text{ kg para esta capa de núcleo.}$$

La altura de la ola de diseño se obtuvo a partir de la fórmula de Hudson (1) para el peso de los elementos, de la cual despejando a H se obtuvo:

$$H = \sqrt[3]{\frac{WK_D (S_s - 1)^3 \cot \theta}{\gamma_s}} \quad (2)$$

Teniendo por consiguiente una altura de diseño de 5.20 metros. Sin embargo, para el estudio se consideraron olas de 5.76 metros de altura. Con respecto a los anchos de corona se tendrá que el ancho mínimo constructivo de la corona, tanto de la coraza como de la capa secundaria, determinándose con la siguiente expresión: (Bruun, 1985), (Andersen 2006).

$$B = nK_{\Delta} \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (3)$$

El ancho de corona para capa de coraza de aproximadamente 5.60 metros, y para la capa secundaria se tuvo un ancho de corona de 4.00 metros. Las ecuaciones anteriores son aplicables para la capa de coraza y capa secundaria, en el caso del núcleo, el ancho de corona se establece en función de la superficie de rodamiento necesario para la circulación de un vehículo de carga (camión de volteo) durante su construcción. Para la obtención de los espesores se llegó a lo siguiente:

$$E = nK_{\Delta} \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (4)$$

El resultado del espesor para la capa correspondiente a la coraza es de  $3.84 = 4.00$  metros, el espesor de la capa secundaria de 2.00 metros aproximadamente. Cuando se realiza el colocado de la capa



de coraza en la naturaleza (prototipo) comparado con la colocación de la roca del modelo, el número de las piezas difiere. El número de capas de acuerdo a recomendaciones se opta por utilizar de 2 a 3 capas de coraza y de 2 a más capas secundarias. Las variables que se presentaron en las ecuaciones anteriores de la (1)-(4), se definen a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 1. Descripción de las variables citadas en las fórmulas (1)-(4).

$W$ = Peso del elemento, Ton.	$N$ = Número de elementos
$K_A$ = Coeficiente de capa	$H$ = Altura de ola, m
$K_d$ = Coeficiente de estabilidad, adimensional	$n$ = Número de elementos que forman la capa
$\gamma_s$ = Peso específico del elemento, Ton/m <sup>3</sup>	$S_s$ = Densidad de los sólidos ( $\gamma_s/\gamma$ ) donde $\gamma$ es el peso específico del agua, adimensional

Para la construcción del modelo se tuvieron que realizar previamente una serie de actividades para que las instalaciones e instrumentos a utilizar se encontraran en las mejores condiciones para la realización del fenómeno a reproducir y a estudiar. A continuación, se mencionan y se muestran las figuras correspondientes: 1. Habilitado del perfil del fondo del canal (figura 8); 2. Mantenimiento del amortiguador de oleaje irregular (figura 9); 3. Construcción de un depósito de aforo (figura 10); 4. Obtención, clasificación y pintado de la roca a utilizar (figura 11); 5. Mantenimiento al perfilador de fondo manual (figura 12) y 6. Trazado y elaboración de los escantillones (figura 13).



Figura 8. Perfil playero en el canal de oleaje angosto.



Figura 9. Terminación del mantenimiento del amortiguador y colocación del mismo.

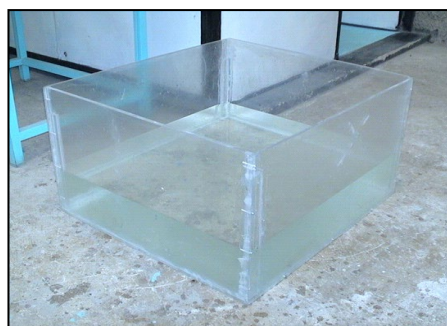


Figura 10. Verificación de las juntas del depósito de acrílico, utilizado para para medir el volumen del rebase.



Figura 11. Rompimiento, clasificado y pintado de rocas de las diferentes capas del rompeolas.



Figura 12. Perfilador de fondo manual para medir los niveles de las estructuras ensayadas.



Figura 13. Colocado de los escantillones dentro del canal de oleaje angosto

Después de establecer la sección del rompeolas en estudio, se colocó el material para las diferentes capas de la estructura dentro del canal de oleaje angosto (figura 14), y posteriormente con base al estado del arte y las condiciones del equipo e instalación, así como a las características de los rompeolas existentes en México, tres diferentes bermas a estudiarse (Tabla 2).



Figura 14. Colocación de las diferentes capas del rompeolas tipo.

Tabla 2. Anchos de las bermas en modelo y prototipo.

Rompeolas	Talud	Ancho de berma (p)	Ancho de berma (m)
<b>Rompeolas con berma (roca)</b>	<b>2:1</b>	<b>10 m</b>	<b>25 cm</b>
<b>Rompeolas con berma (roca)</b>	<b>2:1</b>	<b>20 m</b>	<b>50 cm</b>
<b>Rompeolas con berma (roca)</b>	<b>1.5:1</b>	<b>20 m</b>	<b>50 cm</b>

### 2.3 Calibración y Ensayos.

Para la calibración y los ensayos es importante establecer ciertas condiciones que son:

- En todos los ensayos se utiliza el espectro de Pierson-Moskowitz para generar las señales de oleaje.
- En todos los ensayos se reprodujeron 1000 olas. Cada estructura se somete a una incidencia de 10,000 olas o más si fuese necesario, hasta estabilizar el comportamiento de la estructura (estabilidad del perfil).
- En todos los ensayos se mide el oleaje en dos puntos diferentes (aguas profundas y aguas intermedias).
- Se realizaron las mediciones para la obtención del perfil dinámico de las bermas en cada una de las estructuras ensayadas al inicio y final de cada ensayo con un perfilador de fondo manual.
- Se midieron los gastos de agua que rebasan el rompeolas con respecto al tiempo en cada ensayo, en un depósito de acrílico previamente aforado.

En el estudio se consideró una sección de un rompeolas promedio en México (sección o estructura tipo) y tres secciones de ampliaciones de berma (la primera con talud de 2:1 y ancho de corona de 10 metros, la segunda con un talud 2:1 y ancho de 20 metros, y una tercera con un talud 1.5:1 y ancho de corona de 20 metros). Es importante mencionar que aproximadamente los cinco primeros

ensayos para cada estructura no presentaron problema alguno; por lo que se harán mención de los ensayos finales para cada estructura.

### 2.3.1 Ensayos para rompeolas sin berma (primera estructura tipo).

Al final de los ensayos para esta primera estructura el ascenso máximo rebasa por completo la corona de la estructura. Se observó que la mayoría de las olas rebasaban la misma. Se presentaron desplazamientos de algunas rocas de las diferentes franjas del rompeolas tipo. (Figuras 15 y 16).



Figura 15. Rompeolas tipo (Estructura sin berma), talud 2:1,  $T_p = 11.38$  segundos y  $H_s = 5.13$  metros. 9000 olas acumuladas.

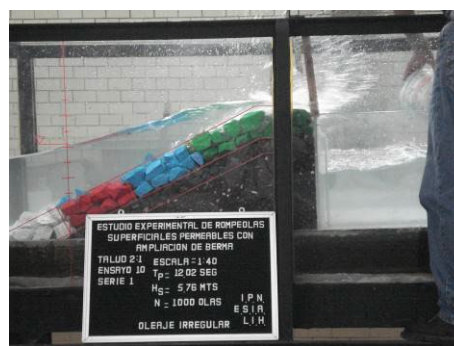


Figura 16. Rompeolas tipo (Estructura sin berma), talud 2:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 10,000 olas acumuladas.

### 2.3.2 Ensayos para rompeolas con berma (Estructura 2 con berma, talud 2:1, ancho de berma de 10.0 metros)

En los ensayos 9, 10 y 11, se encontró que el mayor desplazamiento de las rocas de berma correspondió a la franja blanca y verde. Hubo un reacomodo de la berma y movimiento de sus elementos. Estas condiciones de oleaje hicieron que la franja de la berma de color verde quedara casi descubierta; la franja de color azul perteneciente a la coraza quedó un poco descubierta. Un total de 20 rocas de berma desplazadas hacia el lado puerto. Se observaron aproximadamente 130 rebases de oleaje (overtopping). El ascenso máximo se dio en la roca de coraza; mientras que el descenso máximo se presentó en la franja superior azul. (Figuras 17 y 18).



Figura 17. Ensayo 10. Primera berma con talud 2:1;  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 10,000 olas acumuladas.



Figura 18. Ensayo 18. Primera berma con talud 2:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 11,000 olas acumuladas.

### 2.3.3 Ensayos para rompeolas con berma (Estructura 3 con berma, talud 2:1, ancho de berma de 20.0 metros)

En los ensayos 10 y 11 el ascenso máximo se presenta en la parte inicial de la coraza, el descenso máximo se encontró a la mitad de la franja roja de la berma. La roca de la franja verde de la berma

se desplazó en mayor cantidad a la franja azul, en menor cantidad a la franja roja y coraza. La roca de la berma de color roja fue desplazada hacia la franja azul de la berma. Los desplazamientos mayores se encuentran en la parte superior del ancho de la berma (en la coraza). También se observó que la ampliación de berma reduce en gran medida la energía del oleaje, y fue notorio también una deformación con respecto al perfil original, adoptando una forma de “S” visible. (Figuras 19 y 20)



Figura 19. Ensayo 10. Segunda berma con talud 2:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 10,000 olas acumuladas.



Figura 20. Ensayo 11. Segunda berma con talud 2:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 11,000 olas acumuladas.

### 2.3.4 Ensayos para rompeolas con berma (Estructura 4 con berma, talud 1.5:1, ancho de berma de 20.0 metros)

Con respecto a los ensayos 7, 8 y 9, el ascenso máximo se dio en la parte media de la coraza. El descenso máximo se presentó entre la mitad y la parte superior de la franja roja. Existe mayor salpicado, mayor movimiento y desplazamiento de roca, principalmente de color blanca, roja y verde. Se observó un perfil tendiente a la forma de “S”. Se presentó mayor rebase de ola (overtopping). También se observó que la berma amortigua el oleaje; es decir, disipa la energía de la ola en gran medida. (Figura 21 y 22).



Figura 21. Ensayo 11. Tercera berma con talud 1.5:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 11,000 olas acumuladas.



Figura 22. Ensayo 12 Tercera berma con talud 1.5:1,  $T_p = 12.02$  segundos y  $H_s = 5.76$  metros. 12,000 olas acumuladas.

Como en el ensayo 10 y 11 aún se presentaban movimientos y desplazamientos de la roca de berma, se realizó un ensayo más, presentándose que el perfil que presenta la estructura permite la disipación de la energía del oleaje. Está en forma de “S”, presentándose también una estabilidad en la estructura. Los movimientos y desplazamientos son mínimos y solo se reacomodan las rocas de berma (Ramírez, 2009).

### 3. RESULTADOS

Los resultados correspondientes a las mediciones de la descarga de agua por rebase de la estructura (como resultado de la transmisión del oleaje por rebase) fueron validados con tres criterios localizados en el estado del arte: (Owen, 1980), (Van der Meer, 1992), y (Jorgen Juhl y Peter Sloth, 1994).

Una vez procesados los resultados, se prosiguió con el análisis de la información obtenida de los ensayos, observaciones y cálculos. Para lo cual fue necesario realizar unas tablas de cálculo y comparar los criterios anteriormente mencionados; y posteriormente, se realizó una gráfica (figura 23), la cual relaciona los rebases vs la altura de ola incidente para el rompeolas tipo, y cada berma ensayada.

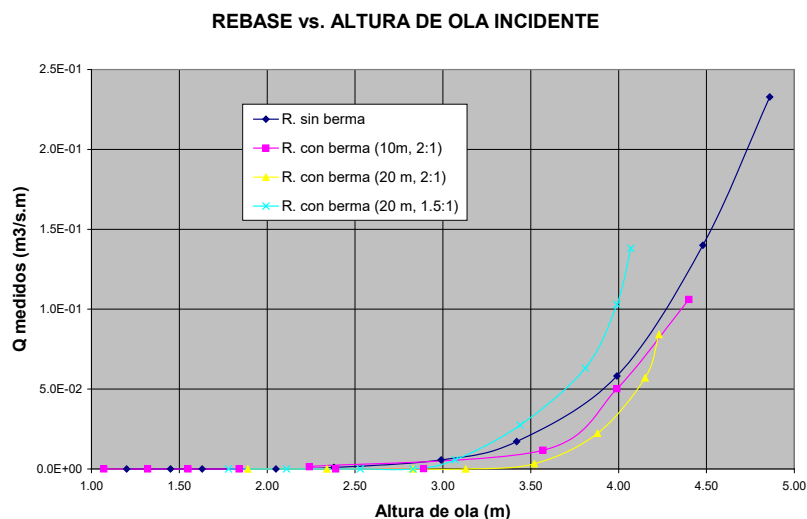


Figura 23. Descargas de rebase vs. Altura de ola incidente (Rompeolas sin berma y rompeolas con las diferentes bermas).

Así mismo, realizado el análisis de los datos con base a las tablas presentadas anteriormente, producto de los ensayos para cada ampliación de berma, se desarrollaron cuatro gráficas (figuras 24, 25, 26 y 27), en las cuales se relacionan los datos aportados por el estudio contra los criterios implementados por otros investigadores, obteniendo lo siguiente:

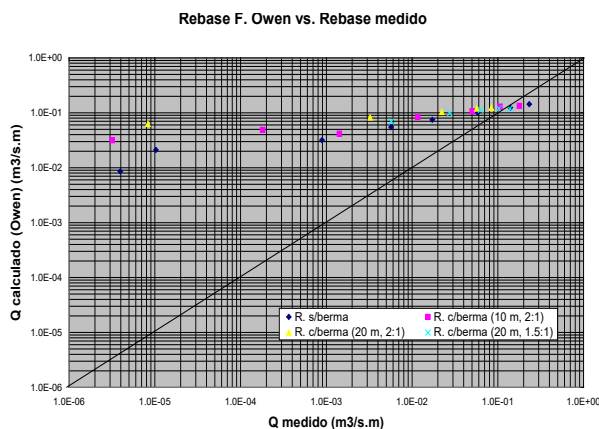


Figura 24. Gráfica correspondiente al rebase calculado (Owen) vs. Rebases medidos.

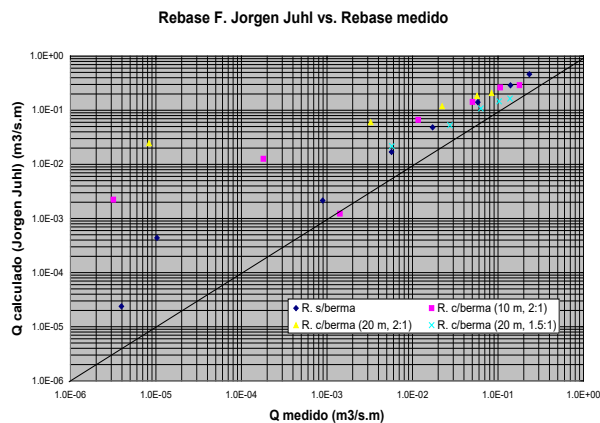


Figura 25. Gráfica correspondiente a las descargas de rebase calculado (Jorgen Juhl) vs. Rebases medidos.

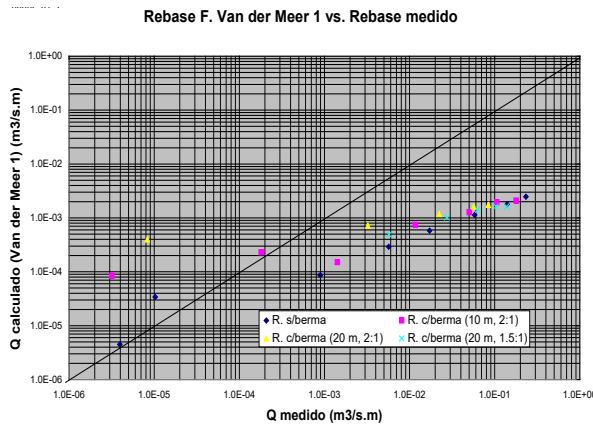


Figura 26. Descargas de rebase calculado (Van der Meer) vs. Rebases medidos

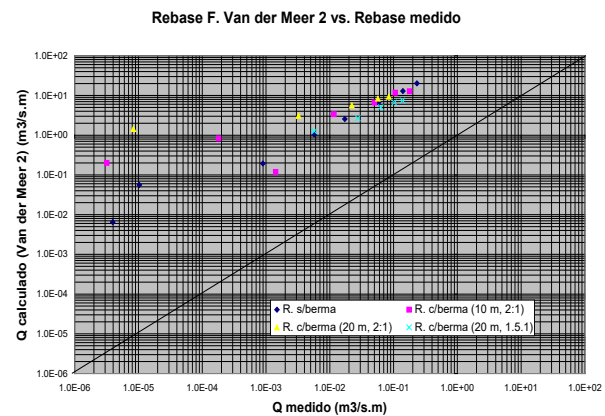


Figura 27. Descargas de rebase calculados (Van der Meer, descarga máxima) vs. Rebases Medidos

#### 4. CONCLUSIONES

El rebase del oleaje (overtopping), es un efecto que puede ocasionar que los elementos de enrocamiento se desplacen provocando un daño parcial o total en los rompeolas de enrocamiento (Sigurdarsson,1998), (Sigurdarsson,2000) afectando su funcionamiento y estabilidad; y con esto, generar problemas de agitación dentro del recinto portuario, teniendo como consecuencia daños en las instalaciones y operaciones dentro de éste.

Todas las bermas disminuyeron el rebase del oleaje. La primera ampliación de berma (ancho de berma de 10 metros y talud 2:1), redujo un 23% el rebase del oleaje. En la segunda berma (ancho de berma de 20 metros y talud 2:1), tuvo una reducción de hasta un 66% del rebase de oleaje. La tercera berma (ancho de berma de 20 metros y talud 1.5:1), tuvo una reducción del rebase del oleaje de un 48%. Por lo que los rompeolas con ampliación de berma ayudan a reducir el rebase del oleaje en condiciones de tormenta y aprovechan mayor material de explotación de las pedreras a comparación de otros tipos de obras de protección, generándose costos más viables.

También se pudo validar alguna ecuación dentro del estado del arte para el rebase del oleaje. De los criterios utilizados para el cálculo del rebase del oleaje, se tiene que la ecuación más favorable y que podría aplicarse para estructuras similares es la de Jorgen Juhl y Peter Sloth (1994). De igual manera, se obtuvieron los perfiles de las bermas ensayadas, apreciando efectos similares a los que se presentan en el estado del arte; por lo que, al compararse con algunos resultados de estudios en la obtención de perfiles ensayados, se puede observar claramente esta relación; donde realmente las bermas después de la incidencia de un oleaje irregular extremo alcanzan su estabilidad dinámica (Ramírez, 2009).

Por lo anterior, y con este trabajo realizado puede mencionarse que, a través de un estudio experimental, a través de un modelo físico reducido, se puede demostrar y comprobar que un rompeolas con ampliación de berma es una alternativa de solución para rehabilitar viejos y dañados rompeolas convencionales, y así mismo, disminuir el rebase del oleaje en condiciones de tormenta.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA Zacatenco) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), y al Tecnológico Nacional de México / Campus Zacatepec.

## 6. REFERENCIAS

- Andersen Lykke T. (2006). “*Scale Effects - Berm Breakwaters. Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters*”. Hydraulics & Coastal Engineering. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Beresford P. J., (1994). “*WAVEGEN-Wave Generator Control Software Program, User Manual*”. Report IT 411, HR-Wallingford.
- Bruun Per (1985). “*Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection*”. Elsevier Science Ltd. Vol. 37.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1983), *Hidráulica Marítima*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia, A.2.13.
- Hughes Steven A. (1993). “*Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*”, World Scientific, Advanced Series on Ocean Engineering, 1993. Vol 7, World Scientific.
- Juhl Jorgen and Sloth Peter (1994). “*Wave Overtopping of Breakwaters under Oblique Waves*”. Coastal Proceedings 1994. Chapter 86.
- Ramírez C. J. M., (2009). “*Estudio experimental de rompeolas superficiales permeables con ampliación de berma*”. Tesis de Maestría. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA, Zacatenco), Instituto Politécnico Nacional.
- Ruiz y Zurvia, Flores Jaime R. (2005). *Canal Angosto y Generador de Oleaje Irregular de la E.S.I.A.-I.P.N., en la Enseñanza de la Hidráulica*. ESIA-U. Zacatenco.
- Sigurdarson Sigurdur, et al. (2000). “*Design Considerations of Berm Breakwaters*”. Coastal Proceedings.
- Sigurdarsson S., Juhl J., Sloth P., Smarason O. B. (1998), *Advances in berm breakwaters. Coastlines, structures and breakwaters*. Edited by Allsop N.W.H.
- Sigurdarson Sigurdur et. al. (1998), *Berm Brakwater, Fifteen years experience*, Coastal Proceedings.
- USACE, (1984). *U. S. Army Corps of Engineers. Shore Protection Manual*. Vol. I. y Vol. II. 4ta. Edición. Washington.
- Van der Meer and Van de Walle (1992). “*Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures*”. Coastal Proceedings 1992, Chapter 134.
- Vergara, Sánchez Miguel A (1993). “*Técnicas de Modelación en Hidráulica*”. Ediciones Alfaomega S.A. de C.V



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-743-MX  
pp. 34 – 45



X CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Efecto del reemplazo de cemento Portland por ceniza de bagazo de caña en la trabajabilidad de compositos – Un minireview

A. Alfonso Olivera<sup>1\*</sup>, V. A. Franco Luján<sup>2</sup>, P. Montes García<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [andy.oliverarivas@gmail.com](mailto:andy.oliverarivas@gmail.com)

<sup>1</sup> CIIDIR Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico del Valle de Etla, Tecnológico Nacional de México, México

### RESUMEN

En este minireview se analizaron los problemas de trabajabilidad que induce el reemplazo parcial del cemento Portland por ceniza de bagazo de caña (CBC) en compositos. Investigaciones reportan que el uso de CBC como material cementante suplementario causa serios problemas de trabajabilidad de compósitos. Los resultados reológicos, fluidez y revenimiento reportados corroboran los problemas de trabajabilidad ocasionados por las formas irregulares, baja densidad y alto contenido de carbón de las CBC. El presente minireview se propone abordar los problemas de trabajabilidad mediante la combinación del uso de aditivos químicos, aditivos minerales y agregados como propuestas de solución.

**Palabras clave:** ceniza de bagazo de caña; trabajabilidad; compositos; material cementante suplementario.



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el crecimiento población mundial va en aumento. Este hecho es evidente en México puesto que durante los últimos 70 años incrementó aproximadamente cuatro veces, y tan solo del año 2010 al 2020 incrementó 14 millones de habitantes (INEGI, 2021). De acuerdo con el incremento de la población las necesidades básicas también aumentan. Una de estas necesidades es la creación de infraestructura básica para el desarrollo como vías de comunicación, hospitales, escuelas, etc. El material más utilizado para la edificación de este tipo de estructuras es el concreto hidráulico (Tamayo et al., 2019) que está compuesto la mayor parte por cemento Portland.

El cemento Portland (CP) es el material más utilizado para la construcción por su disponibilidad y precio. Según el US Geological Survey (2022), en el año 2021 la producción mundial de CP fue alrededor de 4,400,000 toneladas, de las cuales México produjo 50,000 toneladas. Desafortunadamente, la fabricación de cemento emite al medio ambiente grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que es uno de los principales contribuyentes al cambio climático (Keerio et al., 2020). Por cada tonelada que se produce de CP se emite aproximadamente una tonelada de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera que representa entre el 6 y 8% de la emisión de  $\text{CO}_2$  a nivel mundial (Skibsted and Snellings, 2019).

Investigadores alrededor del mundo están realizando propuestas para minimizar el consumo de cemento Portland en la construcción para contribuir significativamente a las reducciones de  $\text{CO}_2$ . Una propuesta que se ha optado en los últimos años para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ , es el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS). Un MCS debe tener propiedades puzolánicas y alto contenido en sílice o una combinación de materiales silicoaluminosos que reaccionen con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que se producen durante la hidratación del cemento. Esta reacción puzolánica produce C-S-H adicional que mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad de los compuestos, además, contribuye a promover la sostenibilidad de la industria de la construcción. Existen estudios previos sobre el uso de subproductos industriales tales como el humo de sílice (Ibrahim, 2021), cenizas volante (Khan and Ali, 2019) o escoria granulada de altos hornos (Shen et al., 2019), así como residuos agrícolas tales como cenizas de cáscara de arroz (Jittin and Bahurudeen, 2022), cenizas de pajas de arroz (Athira and Bahurudeen, 2022), cenizas de aserrín (Awolusi et al., 2021) y cenizas de bagazo de caña (Zhang et al., 2020) que se utilizan como MCS para varias aplicaciones.

En diferentes artículos se ha evaluado el potencial de las cenizas de bagazo de caña (CBC) como un material puzolánico por su cantidad significativa de sílice. Algunas aplicaciones de la CBC en la manufactura de materiales basados en CP son como sustituto de agregado fino (Kunchariyakun et al., 2018), como sustituto parcial del CP (Quedou et al., 2021) o como “filler” (Moretti et al., 2018). En previas investigaciones se ha encontrado que las propiedades puzolánicas de la CBC serios problemas en la trabajabilidad. Con base en lo anterior, el objetivo de este minireview es analizar los efectos del reemplazo de CP por CBC en compositos y proponer futuras investigaciones para solucionar los problemas de trabajabilidad.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA

### 2.3 Producción mundial de la CBC

La producción de caña de azúcar es un sustento financiero para muchas familias en el mundo y depende del tamaño del país, la disponibilidad de alcance y la demanda (Tripathy and Acharya, 2022). En la Figura 1 se muestran las principales contribuciones de cada país en la producción de caña de azúcar a nivel mundial para el año 2018.

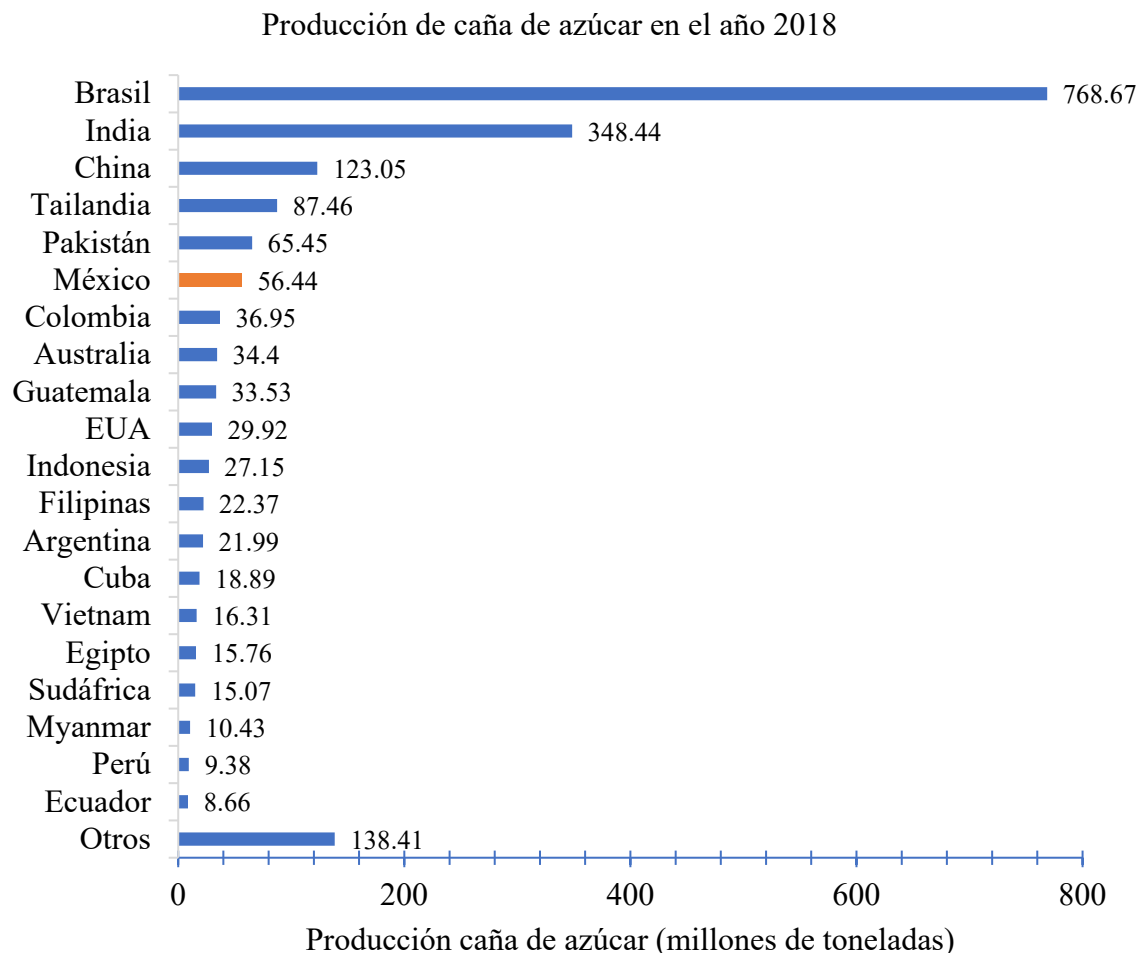


Figura 1. Producción total mundial de caña de azúcar del 2018 (Kolawole et al., 2021).

Se puede observar que México es el sexto mayor productor con aproximadamente 56 millones de toneladas al año (Kolawole et al., 2021) y alrededor de 15 millones de toneladas de bagazo (Maldonado-García et al., 2018). Por cada tonelada de caña de azúcar producida se obtiene aproximadamente 26% de bagazo; si el bagazo tiene un contenido de humedad del 50% se obtiene aproximadamente 0.62% de CBC (Akram et al., 2009) que podrían ser utilizadas como MCS dándoles un valor agregado; no obstante, las cenizas generalmente se desechan en vertederos ocasionando serios problemas ambientales.

### 2.2 Obtención de la CBC

La CBC es un subproducto de la industria azucarera. En la Figura 2 se muestra el proceso para la obtención de la CBC. Primero se tritura la caña de azúcar fresca y luego se extrae el jugo con rodillos pesados. El material fibroso que queda después de la extracción de jugo se llama bagazo. Después, el bagazo se utiliza como combustible quemándolo para generar energía. Por último, se

obtiene el subproducto generado de la combustión del bagazo denominado CBC (Gopinath et al., 2018).

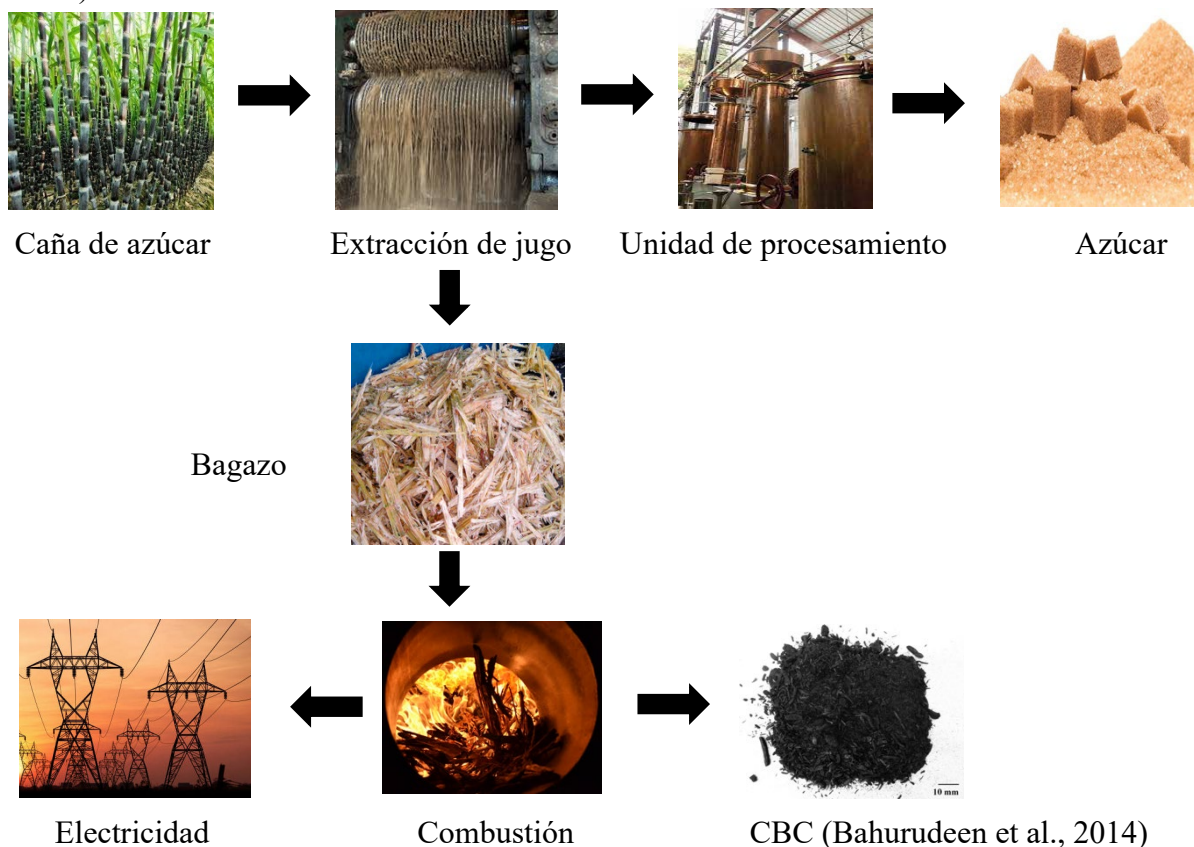


Figura 2. Diagrama de flujo de la ceniza de bagazo de caña (Yadav et al., 2020).

### 2.3 Composición química de la CBC

La composición química de la CBC varía significativamente dependiendo de la temperatura de calcinación (en un rango que va desde 500 °C hasta los 1000 °C), del método de recolección y del post-tratamiento al que sea sometida (recalcinado, cribado o molienda). Con base en la Tabla 1 donde se muestran las investigaciones realizadas del reemplazo parcial de CP por CBC, se observa diferencias en sus porcentajes de óxido debido a la temperatura a la que la calcinan en la producción de azúcar. La CBC contiene un alto porcentaje de SiO<sub>2</sub>, lo que sugiere que puede ser adecuada para ser utilizada como material puzolánico natural. La alta pérdida por ignición de la CBC se debe por la baja temperatura de combustión que someten a las fibras de bagazo en las calderas en los ingenios azucareros, obteniendo alto contenido de carbón. Debido a la alta pérdida por ignición podría interferir negativamente en el desempeño del concreto en sus propiedades de trabajabilidad (Zhang et al., 2020). Chandara et al. (2010) mencionaron que la alta pérdida por ignición por los altos niveles de partículas de carbón sin quemar aumentan el requerimiento de agua o la demanda del uso de un superplastificante.

Tabla 1. Composición química de las CBC

Autores	Composición química (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	*ΣP	LOI
Athira et al., 2022	74.63	3.54	3.67	7.04	-	2.35	-	-	81.84	3.0
Jittin et al., 2022	71.40	3.39	3.51	6.74	-	2.25	-	8.19	78.30	2.28
Singh et al., 2021	70.09	0.19	0.93	2.91	10.25	0.83	0.84	4.26	71.21	6.27
Yadav et al., 2020	71.30	9.00	4.41	4.41	0.07	1.36	0.79	3.01	84.71	2.00
Maldonado-García et al., 2018	56.37	14.61	5.04	2.36	1.43	-	1.57	3.29	76.02	10.53
Rajasekar et al., 2018	86.79	2.45	1.75	3.42	1.46	0.30	-	3.83	90.74	7.0
Akkarapongtrakul et al., 2017	74.0	3.7	1.8	1.7	0.7	0.3	-	4.4	79.5	11.2
Ríos-Parada et al., 2017	66.12	7.16	15.00	2.57	1.19	0.26	0.54	3.52	88.28	9.00

\* Suma del porcentaje de componentes de óxidos puzolánicos (SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## 2.4 Morfología de la CBC

Numerosas investigaciones han realizado estudios de morfología utilizando la microscopía electrónica de barrido. La microscopía electrónica de barrido es una técnica que proporciona micrografías de las superficies de partículas. Se ha observado en diferentes estudios que las partículas de la CBC tienden a tener diferentes morfologías. Las formas que más predominan en el microscopio electrónico de barrido son las formas fibrosas que son fibras no calcinadas, formas prismáticas (tetraédricas) que es sinónimo de la sílice cristalina, esféricas debido a la fusión a altas temperaturas y formas irregulares como se observa en la Figura 3 (Jagadesh et al., 2015; Bahurudeen and Santhanam, 2015).

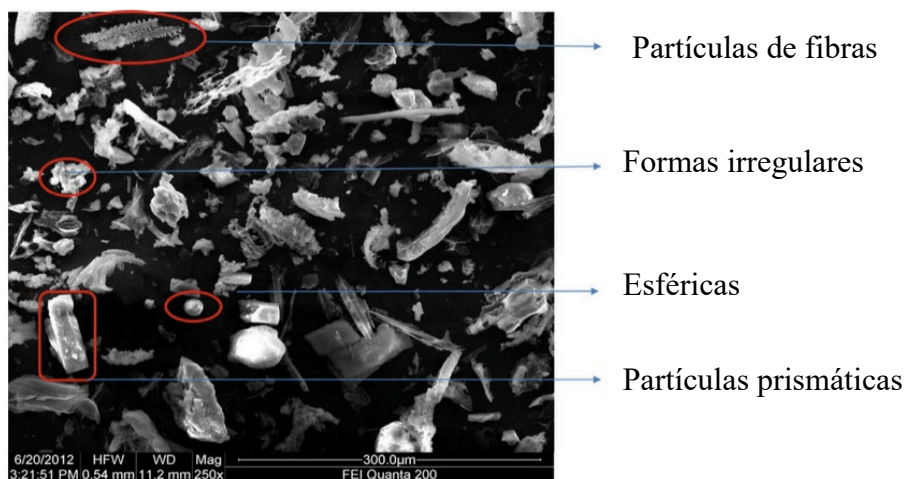


Figura 3. Imagen de formas de la CBC (Bahurudeen and Santhanam, 2015)

Se ha observado que cuando se adiciona CBC en una mezcla de concreto se requiere incorporar más agua o del uso de un superplastificante para mantener la trabajabilidad; es decir, a mayor contenido de CBC mayor demanda de agua (Akkarapongtrakul et al., 2017). La pérdida de trabajabilidad se debe a la presencia de estructuras fibrosas de baja densidad que afectan la demanda de agua y la reología de las mezclas con CP, ocasionando una pérdida de trabajabilidad (Athira and Bahurudeen, 2022). Además, las formas irregulares presentes en la CBC generan fricción entre partículas disminuyendo la fluidez en mezclas (Zareei et al., 2018).

### 3. EFECTO DE LA CBC EN LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

En términos generales, las propiedades en estado fresco de las pastas, morteros y concretos están determinadas por su reología (esfuerzo de fluencia y viscosidad) y su trabajabilidad (revenimiento, y en el caso de concreto autocompactable de las pruebas T500, V-funnel, L-box y J-ring); no obstante, los estudios reológicos sobre el uso de la CBC son limitados en comparación con los de las pruebas de trabajabilidad.

#### 3.1 Efectos reológicos

Se ha demostrado en diversos estudios que el contenido CBC afecta negativamente a morteros, debido a las fibras porosas presentes en las cenizas como se observa en la Figura 4 que conducen a mayor absorción de agua y la necesidad del uso de un superplastificante (Maldonado-García et al., 2018). El mismo efecto reportaron Somna et al. (2012) puesto que la trabajabilidad disminuye debido a las formas angulares, irregulares y la baja densidad de las partículas de la CBC, lo que ocasiona que aumente la fricción entre las superficies de las partículas del cemento y las partículas de la CBC. Le et al. (2018) demuestran que las angularidad y las formas irregulares de los materiales cementosos aumentan la fricción entre las partículas finas, causando que la mezcla fresca sea menos trabajable. Thomas et al. (2021) sugiere que para mejorar la trabajabilidad en las mezclas que contienen CBC se debe reducir el contenido de fibras por medio de molienda. No obstante, para mantener la fluidez, la demanda de un superplastificante aumenta de acuerdo con el porcentaje de sustitución del CP.

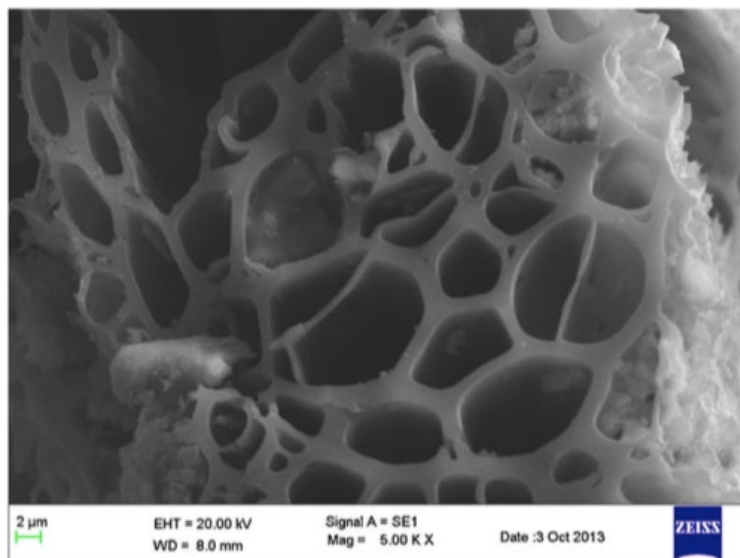


Figura 4. Imagen de la porosidad de las fibras contenidas en las CBC (Jagadesh et al., 2015).

Adicionalmente, el esfuerzo de fluencia y viscosidad aumenta de acuerdo con la cantidad de CBC que contiene la mezcla debido a sus formas irregulares, baja densidad y alto contenido de carbón. Jiménez-Quero et al. (2013) reportaron que la adición de la CBC en un mortero aumenta el esfuerzo de fluencia y la viscosidad de las pastas causando un menor porcentaje de fluidez y un mayor consumo de superplastificante. Anjos et al. (2020) demostraron que reemplazo superiores al 25% de CP por CBC aumenta la fricción interna debido al incremento del número de partículas de CBC, lo que reduce la viscosidad relativa. Jittin y Bahurudeen (2022) mostraron que la adición hasta un 30% de las CBC aumenta la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia de pastas de mezclas binarias debido a la forma prismática e irregular de las partículas, ocasionando un menor porcentaje de fluidez.

### 3.1 Efectos en la trabajabilidad

Como se ha mencionado, en secciones anteriores, la trabajabilidad de pastas, morteros o concretos es una propiedad muy importante debido a que el producto debe ser un material de fácil colocación, consolidación, acabado y resistente a la segregación (Kosmatka et al., 2004). Por eso, investigadores han realizado estudios enfocados en el efecto del reemplazo de CP por CBC, reportando que las partículas de las cenizas reducen la trabajabilidad. Whagh y Waghe (2022) realizaron diferentes pruebas de trabajabilidad para evaluar el efecto de la CBC en cementos autoconsolidables. En sus resultados muestran reducciones en las pruebas de revenimiento, L-box, y aumentos en el tiempo en las pruebas de V-funnel. Concluyeron que la presencia de partículas de CBC reduce la trabajabilidad. Le et al. (2018) demostró que el contenido de CBC incrementa el tiempo de flujo y disminuye la fluidez. Das et al. (2022) reportaron que la adición de CBC en concretos disminuye el revenimiento y aumenta el tiempo en la prueba de V-funnel y el tiempo de flujo de revenimiento, así como el T500 debido a que las partículas absorben mayor cantidad de agua, y esto aumenta la viscosidad en las mezclas. De igual forma Zaeri et al. (2018) demostraron que las CBC reducen la trabajabilidad debido a la mayor demanda de agua causada por el alto contenido de carbón, por las formas irregulares de las partículas, y por su alta porosidad. Kazmi et al. (2017) mostraron que a mayor proporción de CBC ocurre disminución en el flujo de morteros. Bheel et al. (2022) experimentaron con CBC, metacaolín y cenizas de cáscara de mijo como MCS, y encontraron que la trabajabilidad disminuye con el aumento de cada material por separado o en combinación. Murugesan et al. (2021) de igual forma reporta que el aumento de la CBC reduce la trabajabilidad y retrasa el tiempo de fraguado debido a la alta capacidad de absorción de agua y a las formas irregulares de sus partículas. De la misma forma, Katare y Madurwar (2017) reportaron que el reemplazo del CP por CBC tiene efectos negativos en el revenimiento de concretos debidos a la absorción de agua por el alto valor de pérdidas por ignición de la CBC. Li et al. (2022) observaron que el uso de la CBC como MCS afecta negativamete el revenimiento, aumenta el tiempo de fraguado e incrementa la demanda agua o requiere el uso de un superplastificante para mejorar la trabajabilidad. Minnu et al. (2021) concluyeron que una mayor cantidad de CBC reduce la trabajabilidad y aumenta el tiempo de fraguado debido a la alta demanda de agua. Tripathy y Acharya (2022) observaron que el uso de la CBC sin tratamiento como MCS ocasiona problemas trabajabilidad. Incluso con un post-tratamiento como recalcinado o molido, las mezclas requieren de un superplastificante para tener fluidez. Zerihun et al. (2022) estudiaron diferentes residuos agrícolas, entre ellos la CBC y concluyen que la trabajabilidad en concretos en fresco disminuye a mayor contenido de CBC debido a que sus partículas tiene mayor área superficial y porosidad causando que absorbieran más agua. Dayo et al. (2019) reporto que la CBC, como agregado fino, reduce el revenimiento conforme aumenta la proporción de las cenizas en el concreto. Bheel et al. (2019) reemplazaron el CP por CBC en concretos concluyendo que a mayor porcentaje de sustitución disminuye la trabajabilidad. Bheel et al. (2020) realizaron combinaciones de CBC con caliza fina en concretos

concluyendo que a mayor cantidad de las cenizas y caliza disminuye el revenimiento debido a que incrementa la demanda de agua.

Con base en la revisión de la literatura se corrobora que el reemplazo parcial de CP por CBC disminuye la fluidez y trabajabilidad de mezclas debido a las formas irregulares, fibras porosas y prismáticas, y al alto contenido de carbono que contiene la CBC.

#### **4. CONCLUSIONES**

De acuerdo con la revisión previa sobre el efecto de la CBC en la trabajabilidad de mezclas de pastas, morteros y concretos, se concluye lo siguiente:

- La CBC es un material puzolánico natural y es apto para utilizarse como un material cementante suplementario.
- La alta pérdida por ignición de la CBC disminuye la trabajabilidad debido a su alto contenido de carbón, ocasionando un aumento en la demanda de agua o el uso de un superplastificante.
- La morfología de la CBC afecta negativamente a la trabajabilidad debido a sus formas irregulares, que ocasionan mayor fricción entre partículas de CP y CBC, y las fibras altamente porosas que demanda mayor absorción de agua.
- La presencia de CBC aumenta la viscosidad, el esfuerzo de fluencia y disminuye la fluidez debido a las formas irregulares, angulares, prismáticas y fibrosas de sus partículas.
- Los resultados de las pruebas de revenimiento, T500, V-funnel, L-box y J-ring corroboran que la adición de CBC reduce la trabajabilidad de las mezclas debido a que las partículas porosas e irregulares causan mayor demanda de agua.

#### **5. NECESIDAD DE INVESTIGACIÓN**

A partir de las investigaciones previas, está claro que aún se requieren estudios con un enfoque holístico sobre la influencia del reemplazo parcial de CP por CBC en las propiedades de trabajabilidad de materiales compósitos. Estos estudios contribuirán a una mejor comprensión de las causas que originan la pérdida de trabajabilidad de las mezclas y generará confianza para adoptar estas cenizas como una ruta hacia la producción sostenible del cemento. Con base en las conclusiones se proponen las siguientes necesidades de investigación:

- Investigar sobre un mejor post-tratamiento con bajo consumo energético y reducida emisión de CO<sub>2</sub> que sea efectivo para mejorar las propiedades de trabajabilidad de materiales compósitos.
- Implementar investigaciones que consideren la combinación de CBC con otros aditivos minerales como arcilla calcinada, caliza, escoria de alto horno granulado, geopolímeros, residuos de plástico electrónicos, polvo de vidrio, entre otros, para mejorar la trabajabilidad de los compósitos.
- Implementar investigaciones que consideren el uso de aditivos químicos y la combinación aditivos minerales- aditivos químicos para mejorar la trabajabilidad de los compósitos.

#### **6. AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT por la beca otorgada para realizar mi doctorado.

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, por el apoyo financiero mediante recursos del proyecto: “Predicción de la resistividad eléctrica de concretos sustentables mediante modelos ARIMA”, SIP 2022034.

## 7. REFERENCIAS

- Akkarapongtrakul, A., Julphunthong, P., & Nochaiya, T. (2017). Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash–sugarcane bagasse ash pastes. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 148(7), 1355-1362. <https://doi.org/10.1007/s00706-017-1953-5>
- Akram, T., Memon, S. A., & Obaid, H. (2009). Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(2), 703-712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>
- Anjos, M. A., Araujo, T. R., Ferreira, R. L., Farias, E. C., & Martinelli, A. E. (2020). Properties of self-leveling mortars incorporating a high-volume of sugar cane bagasse ash as partial Portland cement replacement. *Journal of Building Engineering*, 32, 101694. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101694>
- Athira, G., & Bahurudeen, A. (2022). Rheological properties of cement paste blended with sugarcane bagasse ash and rice straw ash. *Construction and Building Materials*, 332, 127377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127377>
- Awolusi, T. F., Sojobi, A. O., Oguntayo, D. O., Akinkulore, O. O., & Orogbade, B. O. (2021). Effects of calcined clay, sawdust ash and chemical admixtures on Strength and Properties of concrete for pavement and flooring applications using Taguchi approach. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00568. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00568>
- Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Bheel, N. D., Meghwar, S. K., Abbasi, R. A., Ghunio, I. A., & Shaikh, Z. H. (2019, December). Use of sugarcane bagasse ash as cement replacement materials in concrete. *In International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering, Jamshoro, Pakistan* (pp. 1-4).
- Bheel, N., Memon, A. S., Khaskheli, I. A., Talpur, N. M., Talpur, S. M., & Khanzada, M. A. (2020). Effect of sugarcane bagasse ash and lime stone fines on the mechanical properties of concrete. *Eng Technol Appl Sci Res*, 10(2), 5534-5537. <https://doi.org/0.48084/etasr.3434>
- Bheel, N., Ali, M. O. A., Khahro, S. H., & Keerio, M. A. (2022). Experimental study on fresh, mechanical properties and embodied carbon of concrete blended with sugarcane bagasse ash, metakaolin, and millet husk ash as ternary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 5224-5239. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15954-4>
- Chandara, C., Sakai, E., Azizli, K. A. M., Ahmad, Z. A., & Hashim, S. F. S. (2010). The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1590-1593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.036>
- Das, D., Saravanan, T. J., Bisht, K., & Kabeer, K. S. A. (2022). A review of fresh properties of self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.451>
- Dayo, A. A., Kumar, A., Raja, A., Bheel, N., & Shaikh, Z. H. (2019). Use of sugarcane bagasse ash as a fine aggregate in cement concrete. *Engineering Science and Technology International Research Journal*, 3(3), 8-11.
- Gopinath, A., Bahurudeen, A., Appari, S., & Nanthagopalan, P. (2018). A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. *Journal of Cleaner Production*, 203, 89-108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>
- Ibrahim, K. I. M. (2021). Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00630. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630>



- INEGI. (2021). En México somos 126 014 024 habitantes: censo de población y vivienda 2020. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso2020\\_Nal.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso2020_Nal.pdf)
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Murugesan, R., & Sarayu, K. (2015). Micro-Analytical studies on sugar cane bagasse ash. *Sadhana*, 40(5), 1629-1638. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0390-6>
- Jiménez-Quero, V. G., León-Martínez, F. M., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C., & Chacón-Nava, J. G. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 40, 691-701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Jittin, V., & Bahurudeen, A. (2022). Evaluation of rheological and durability characteristics of sugarcane bagasse ash and rice husk ash based binary and ternary cementitious system. *Construction and Building Materials*, 317, 125965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125965>
- Katare, V. D., & Madurwar, M. V. (2017). Experimental characterization of sugarcane biomass ash—A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Patnaikuni, I., & Wu, Y. F. (2017). Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. *Construction and Building Materials*, 148, 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025>
- Keerio, M. A., Abbasi, S. A., Kumar, A., Bheel, N., & Tashfeen, M. (2020). Effect of silica fume as cementitious material and waste glass as fine aggregate replacement constituent on selected properties of concrete. *Silicon*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00806-6>
- Khan, M., & Ali, M. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres. *Construction and Building Materials*, 203, 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Fanijo, E., Paul, S. C., & Combrinck, R. (2021). State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Kunchariyakun, K., Asavapisit, S., & Sinyoung, S. (2018). Influence of partial sand replacement by black rice husk ash and bagasse ash on properties of autoclaved aerated concrete under different temperatures and times. *Construction and Building Materials*, 173, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.043>
- Le, D. H., Sheen, Y. N., & Lam, M. N. T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029>
- Maldonado-García, M. A., Hernández-Toledo, U. I., Montes-García, P., & Valdez-Tamez, P. L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales de Construcción*, 68(329), e148-e148. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>
- Minnu, S. N., Bahurudeen, A., & Athira, G. (2021). Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124836>
- Moretti, J. P., Nunes, S., & Sales, A. (2018). Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 172, 635-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>

- Murugesan, T., Athira, G., Vidjeapriya, R., & Bahurudeen, A. (2021). Sustainable Opportunities for Sugar Industries Through Potential Reuse of Sugarcane Bagasse Ash in Blended Cement Production. *Sugar Tech*, 23(5), 949-963. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00978-4>
- Quedou, P. G., Wirquin, E., & Bokhoree, C. (2021). Sustainable concrete: potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00545. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545>
- Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M., & Saraswathy, V. (2018). Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 171, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>
- Shen, D., Liu, K., Wen, C., Shen, Y., & Jiang, G. (2019). Early-age cracking resistance of ground granulated blast furnace slag concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.028>
- Singh, M., Siddique, R., Setia, S. S., & Singh, G. (2021). Recycling of waste bagasse ash in concrete for sustainable construction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22(5), 831-842.
- Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, 124, 105799. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>
- Tamayo-García, B., Albareda-Valls, A., Rivera-Rogel, A., & Cornado, C. (2019). Mechanical characterization of a new architectural concrete with glass-recycled aggregate. *Buildings*, 9(6), 145. <https://doi.org/10.3390/buildings9060145>
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete—A review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086>
- Tripathy, A., & Acharya, P. K. (2022). Characterization of bagasse ash and its sustainable use in concrete as a supplementary binder—A review. *Construction and Building Materials*, 322, 126391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126391>
- Unión Nacional de Cañeros A. C. de México. (2022). Visto el 11 de Septiembre de 2022, [www.caneros.org.mx](http://www.caneros.org.mx)
- US Geological Survey (2022). Mineral commodity summaries2022. US Geological Survey, Reston, VA. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- Wagh, M., & Waghe, U. P. (2022). Development of self-compacting concrete blended with sugarcane bagasse ash. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1787-1792. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.459>
- Yadav, A. L., Sairam, V., Muruganandam, L., & Srinivasan, K. (2020). An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>
- Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhang, X., & Si, Z. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 56, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104774>
- Zareei, S. A., Ameri, F., & Bahrami, N. (2018). Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 184, 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>
- Zerihun, B., Yehualaw, M. D., & Vo, D. H. (2022). Effect of Agricultural Crop Wastes as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5648187>

Zhang, P., Liao, W., Kumar, A., Zhang, Q., & Ma, H. (2020). Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material: Comparison with coal combustion fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123834>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-745-MX  
pp. 46 – 57



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de Calidad de las Construcciones

## Análisis FEM-DEM de una viga simplemente apoyada utilizando Kratos Multiphysics

H. Arias-Rojas<sup>1,2\*</sup>, R. Román-Gutierrez<sup>2</sup>, F. J. Dominguez-Mota<sup>1,2</sup>,  
J. A. Guzmán-Torres<sup>1</sup>, G. Tinoco-Guerrero<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [heriberto.arias@umich.mx](mailto:heriberto.arias@umich.mx)

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

<sup>2</sup> Facultad de ciencias físico matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

### RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el análisis por fractura de una viga simplemente apoyada utilizando una combinación del método de elementos finitos y el método de elementos discretos denominada FEM-DEM (de sus siglas en inglés "Finite Element Method and Discrete Element Method"). Con FEM se establecieron los criterios de falla para cada tipo de material y se definió el modelo constitutivo más adecuado. Con DEM se modeló la formación y propagación de grietas ocasionadas por cargas externas sobre vigas simplemente apoyadas, y se modeló la desintegración del concreto en la zona de agrietamiento. Los resultados obtenidos de la modelación numérica son comparados con datos reportados en la literatura para evaluar la precisión del análisis.

**Palabras clave:** método de elemento finito; método de elemento discreto; Kratos Multiphysics; fractura.

## 1. INTRODUCCIÓN

A través de los años se han desarrollado diversas pruebas destructivas para elemento de concreto, con la finalidad de determinar su resistencia y ser capaces de predecir el comportamiento del mismo. Una de las pruebas más conocidas son la prueba de resistencia a la tensión del concreto, que determina la resistencia a la tensión de un cilindro de concreto (García et. al., 2017), y la prueba de resistencia a flexión del concreto, con la que se determina el módulo de ruptura y la carga de flexión máxima del elemento (International ASTM, 2002). El inconveniente con estas pruebas es la necesidad de utilizar equipo especializado y la inversión económica necesaria para llevarlas a cabo. Ante esto, es necesario el desarrollo de nuevas metodologías, he implementar herramientas que nos permitan predecir la resistencia de los elementos estructurales, sin necesidad de elaborar pruebas destructivas de laboratorio. Como una alternativa viable, el uso de herramientas computacionales ha tomado mayor fuerza, y se han desarrollado gran variedad de programas de análisis, entre ellos, (Kratos Multiphysics, 2022). KM es un programa de multifísica que proporciona diversas herramientas de análisis basadas en el método de elemento finito (FEM), y el método de elemento discreto (DEM), implementándolos para el desarrollo de análisis y simulaciones de problemas en una gran variedad de áreas de la ingeniería, usando como interprete al lenguaje de programación Python. KM implementa las propiedades de un modelo de cuerpo rígido de FEM, y con DEM lo unifica con el del comportamiento del sólido y de las partículas del material a través de la aplicación FEM-DEM. Implementando la aplicación FEM-DEM de KM se realizaron pruebas de fractura de modelos de vigas de concreto simplemente apoyadas, con rigideces variables, y propiedades geométricas constantes. Se determinó el módulo de ruptura y la deformación máxima alcanzada. Los valores empleados en las simulaciones de las vigas fueron obtenidos experimentalmente a través de la prueba de flexión estándar con el objetivo de determinar los módulos de ruptura (Guzmán, 2020). Los resultados de las pruebas experimentales se comparan con los resultados del análisis FEM-DEM.

## 2. EL MÉTODO FEM-DEM

### 2.1 El método FEM

En problemas mecánicos, el objetivo principal del método de los elementos finitos es discretizar una ecuación diferencial gobernante de un fenómeno a fin de determinar los efectos que causan las fuerzas que actúan sobre un sistema. Para determinar estos efectos el FEM discretiza los elementos del sistema en estudio, dividiendo cada uno en  $n$  componentes más pequeños a los que llamamos elementos finitos. El método se puede resumir de manera muy somera en 8 pasos (Desai and Kundu, 2001):

1. Discretizar y seleccionar la configuración del elemento, que consiste en dividir al mismo en pequeños componentes llamados elementos finitos, en donde cada una de las intersecciones de sus lados forma un punto al que llamamos nodo.
2. Seleccionar el modelo, patrón y forma adecuada de acuerdo a la naturaleza del problema. Una distribución de nodos adecuada facilita la solución del sistema y brindar resultados más precisos.
3. Definir la ley constitutiva más adecuada al problema de análisis.
4. Obtener las ecuaciones gobernantes del problema e implementar las condiciones de frontera.
5. Resolver el sistema de ecuaciones algebraico para las incógnitas principales (que en un gran número de casos son los desplazamientos).

6. Resolver para las incógnitas secundarias. Información adicional que se desee obtener de acuerdo con el problema (fuerzas, esfuerzos, presiones, etc.).
7. Interpretación de resultados.

La forma de la ecuación básica para el planteamiento del FEM para el problema de interés en este trabajo es:

$$[K]\{q\} = \{Q\} \quad (1)$$

Donde:

$[K]$  : es la matriz que define las propiedades mecánicas y físicas del problema (matriz de rigideces),

$\{q\}$  : es el vector de incógnitas y

$\{Q\}$  : vector de fuerzas nodales.

El FEM determina las ecuaciones para cada elemento finito y con la solución de las mismas intenta predecir el comportamiento aproximado de la estructura o cuerpo de análisis (Desai and Kundu, 2001). La discretización de los elementos se puede hacer utilizando mallas estructuradas y no estructuradas, para las cuales existen una gran variedad de metodologías eficientes de generación. Sin importar el tipo de mallado utilizado, existen implementaciones eficientes para diferentes tipos de elementos finitos. En la figura 1 se presenta la malla no estructurada del FEM para un elemento tipo viga.

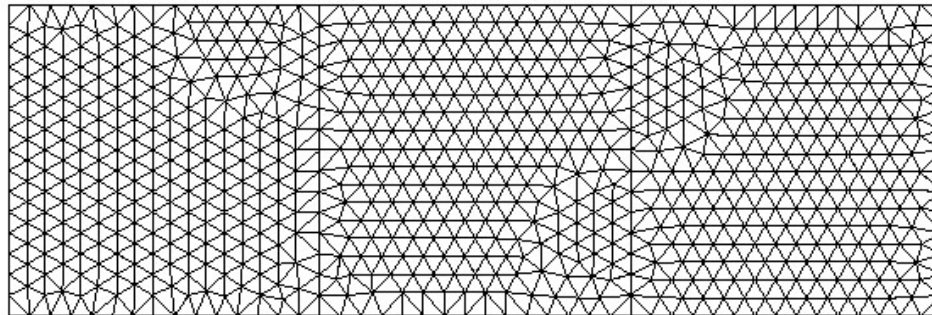


Figura 1. Malla no estructurada de un elemento tipo viga.

## 2.2 El método DEM

Conocido en sus inicios como “The Distinc Element Method” y ahora llamado “The Discrete Element Method” (DEM); se basa en el uso de un sistema explícito en el cual se monitorea la interacción de las partículas a través del contacto entre las mismas, generándose fuerzas y momentos que se transmiten como una reacción en cadena. Dicha reacción permite modelar el movimiento de cada una de las partículas (Kundall and Strack, 1979). En el DEM el material se representa como un conjunto de esferas o discos (de acuerdo con la dimensión del problema) que interactúan unas con otras en sus superficies de contacto, permitiendo el movimiento y transmitiendo las fuerzas en las direcciones normal y tangencial. Aplicando las leyes de contacto y formulación adecuada del modelo macroscópico del material, se simulan las deformaciones presentes en las superficies de contacto. Se consideran conexiones cohesivas entre las partículas rígidas de materiales granulares, estas conexiones pueden romperse al alcanzar su carga de fractura y simular la aparición y representación de grietas (Oñate et. al., 2015). La definición de un correcto modelo constitutivo de las leyes de contacto es la que predice un adecuado comportamiento de la interacción entre las partículas a nivel microscópico del material. El DEM calcula los momentos y

las fuerzas (Fuerza normal  $F_n$  y Fuerza tangencial  $F_s$ ) de contacto entre dos partículas, como lo define (2).

$$\overline{\mathbf{F}^{cont}} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_s = F_n \mathbf{n} + \mathbf{F}_s \quad (2)$$

donde  $\mathbf{n}$  es el vector unitario a lo largo de la línea que conecta los centroides de las dos partículas en contacto (Rojek et. al., 2012). El modelo de la interface de contacto entre dos partículas se muestra en la figura 2, en la cual  $K_n$  y  $K_s$  son las rigideces en las direcciones normal y tangencial, respectivamente.

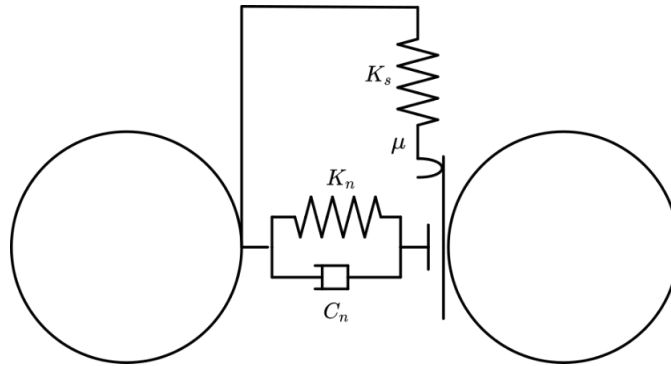


Figura 2. Modelo de la interface de contacto de dos partículas (Oñate et. al., 2015).

Una de las ventajas del método DEM es su habilidad para generar una fractura en cualquier dirección rompiendo la unión entre un elemento discreto y otro. Para lograr esto es necesario definir de manera adecuada los parámetros de los materiales en la interfaz de contacto entre un elemento y otro. El DEM tiene la capacidad de predecir patrones de grietas aleatorios cuando se trabaja con medios continuos formados de materiales granulares principalmente (Zárata and Oñate, 2015). El movimiento del sólido se rige por las cargas externas y las fuerzas de contacto entre las partículas. El método analiza cada elemento finito a cada paso del tiempo, calculando las fuerzas y/o momentos de interacción determinado los desequilibrios entre las mismas, los cuales, generan desplazamientos y aceleraciones que se producirán en los elementos discretos en el siguiente paso de tiempo. Las fuerzas y los desplazamientos se transmiten de una partícula a otra, afectando a todos sus vecinos (partículas que se encuentran alrededor) y actualizándose conforme el análisis avanza (Cornejo, 2020).

El planteamiento inicial del DEM parte de que conocemos las coordenadas iniciales de dos elementos discretos ( $x_1, x_2, y_1, y_2$ ), los radios de las partículas  $R_x$  y  $R_y$ , las distancias entre centros de estas ( $D$ ), además de las velocidades lineales ( $\dot{x}_i, \dot{y}_i$ ) y radiales ( $\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y$ ). Posteriormente se calcula la velocidad relativa en la dirección  $i$  con (3), el esquema de las partículas y la nomenclatura básica de la formulación inicial se presente en la figura 3:

$$\dot{X}_i = (\dot{x}_i - \dot{y}_i) - (\dot{\theta}_x R_x - \dot{\theta}_y R_y) t_i \quad (3)$$

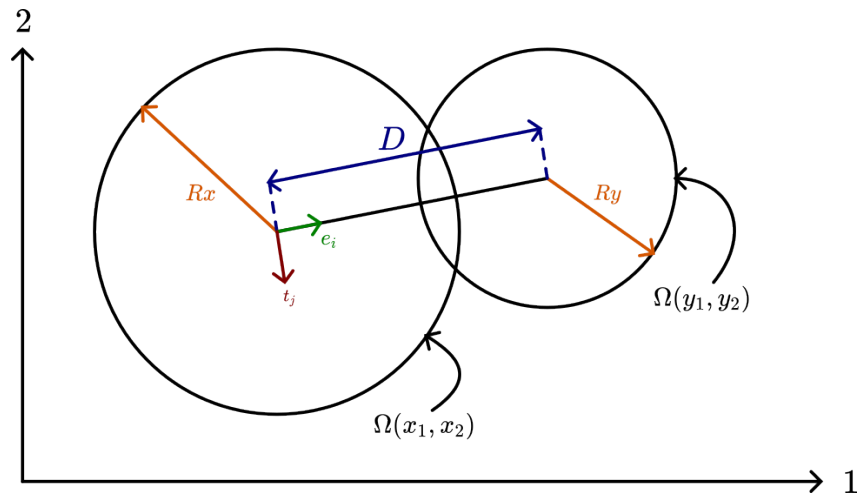


Figura 3. Interacción entre dos partículas del DEM (Cornejo, 2020).

Con  $\dot{X}_i$  se determinan los desplazamientos relativos  $\Delta n$  y  $\Delta s$ , ecuaciones (4) y (5):

$$\Delta n = \dot{X}_i \Delta t e_i \quad (4)$$

$$\Delta s = \dot{X}_i \Delta t t_j. \quad (5)$$

A partir de  $\Delta n$  y  $\Delta s$  se determinan los incrementos de las fuerzas de contacto (normal y tangencial) para el siguiente paso con las ecuaciones (6) y (7):

$$\Delta F_n = k_n (\Delta n + \beta \dot{X}_i e_i) \quad (6)$$

$$\Delta F_s = k_s (\Delta s + \beta \dot{X}_i t_j). \quad (7)$$

Por lo tanto las fuerzas de contacto en el paso  $i + 1$  ahora son (8) y (9):

$$F_n = F_n^n + \Delta F_n \quad (8)$$

$$F_s = F_s^n + \Delta F_s. \quad (9)$$

Posteriormente, se determinan los momentos y fuerzas de deslizamiento entre las partículas. Para finalizar el análisis, en ese paso del tiempo se deben determinar las nuevas aceleraciones, velocidades y desplazamientos, para implementarlas como valores iniciales en el siguiente paso. Todo el detalle del planteamiento del DEM los podemos encontrar en (Cornejo, 2020), (Zárate and Oñate, 2015) y (Santassusana, 2013). El DEM unifica el modelado del comportamiento del sólido y las partículas del material. Las partículas se modelan como cuerpos rígidos que interactúan entre sí a través de las fuerzas de contacto. De esta forma se representa el comportamiento microscópico mediante un sistema de ecuaciones lineales que depende de un número limitado de parámetros. Al iniciar el análisis las partículas en equilibrio, cuando se rompe una unión se genera contacto entre ellas, lo que hace necesaria la evaluación de las fuerzas y la determinación de las nuevas posiciones de las partículas involucradas, posteriormente se determina si existe contacto en el nuevo paso del tiempo y se repite el ciclo (Santassusana, 2013).



### 2.3 FEM-DEM

Si analizamos las características de ambos métodos (FEM y DEM) la combinación de ellos (FEM-DEM) nos proporciona una metodología robusta para el análisis de esfuerzos, predicción y propagación de grietas en elementos de concreto. DEM puede simular el proceso de fractura, pero es necesario calibrar las propiedades de los materiales de manera adecuada, lo cual no es una tarea fácil, cualquier variación en alguno de los parámetros que define las propiedades del material, nos puede llevar a una predicción inadecuada del comportamiento del elemento. Además, se requiere un gran número de elementos discretos lo que conlleva a un alto costo computacional.

En cambio, FEM usa una sofisticada formulación para la predicción de grietas y es necesario usar un remallado en las cercanías donde existe la posibilidad de que se genere las grietas (Zárate and Oñate, 2015). El proceso de remallado consiste en definir una ley isotrópica constitutiva de daño y verificar la falla en los ejes del elemento, una vez que se alcanza alguno de los modos de falla, el elemento finito es removido y elementos discretos son colocados en los nodos del elemento original (figura 4) (Cornejo et. al., 2019).

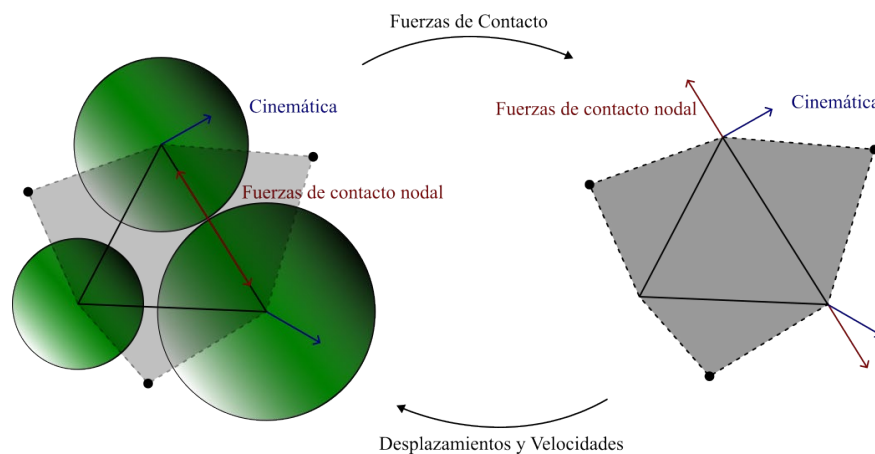


Figura 4. Generación de elementos discretos a partir de un elemento finito (Cornejo et. al., 2019).

La metodología FEM-DEM implementada por KM, utiliza FEM para modelar elementos continuos y DEM para modelar la fractura, la transición se logra haciendo un remallado en los pasos de tiempo que así lo requieran. De inicio el modelo es mallado con elementos finitos triangulares, cuando la carga entre los elementos excede una determina fuerza de cohesión se rompe el link o línea de unión entre los nodos del elemento. La figura 5 muestra a los elementos discretos y sus links de cohesión (resortes) que representan la fuerza normal y tangencial entre los elementos discretos, y del lado derecho su equivalente elemento finito.

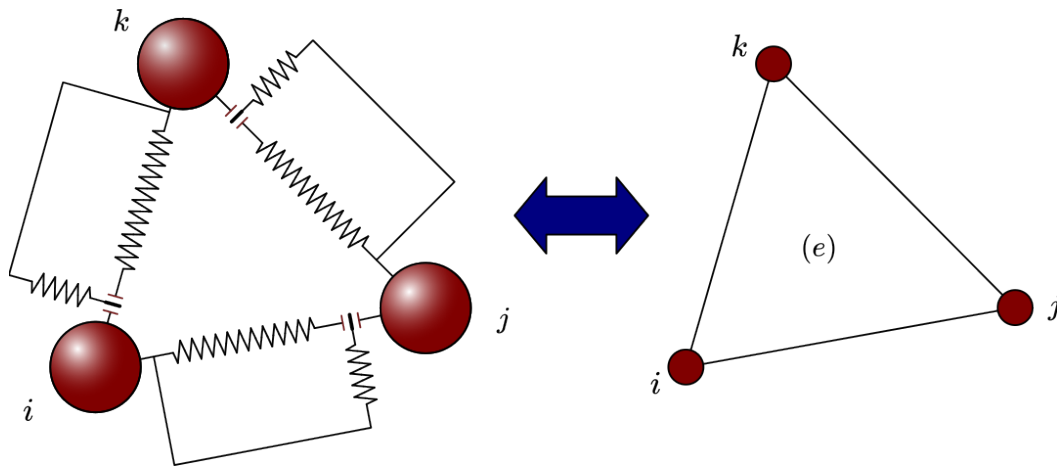


Figura 5. Modelo equivalente de un elemento finito y un elemento discreto (Zárate and Oñate, 2015).

La matriz de rigideces del FE se obtiene a través del balance interno de las fuerzas en los nodos del elemento. Al considerar que una de las uniones entre los nodos ha fallado, las fuerzas quedan desbalanceadas, afectando a la malla completa. La forma adecuada en eliminar un enlace entre los nodos es calculando la pérdida de rigidez asociada con el área removida del elemento. La rigidez es reducida eliminando el área entre los nodos afectados y el centroide del elemento triangular como se muestra en la Figura 6 (Zárate and Oñate, 2015).

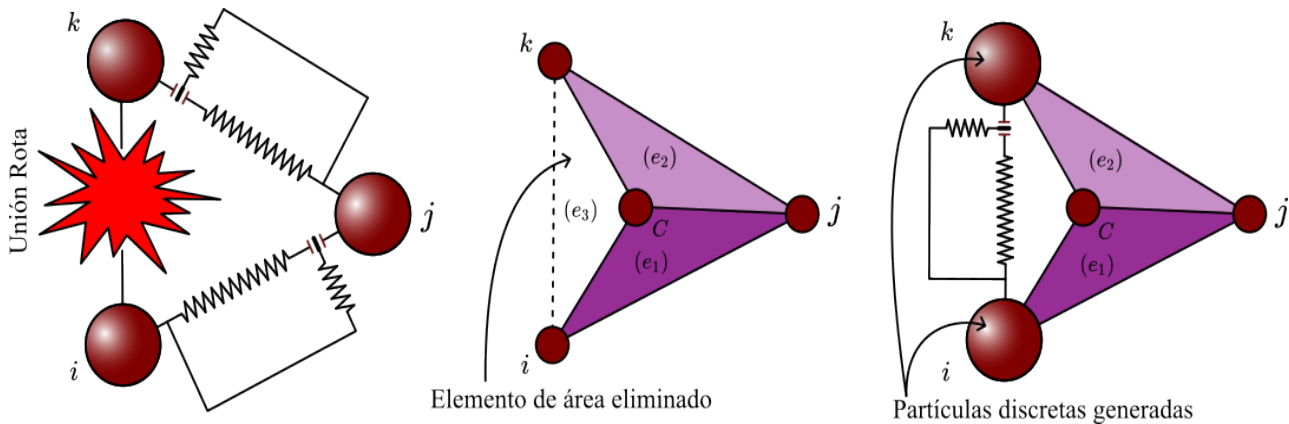


Figura 6. Pérdida de rigidez de un elemento finito con un borde dañado y la generación de elementos discretos (Zárate and Oñate, 2015).

La pérdida de rigidez del elemento se fórmula a partir de la matriz completa del elemento triangular  $K^{(e)}$ , la cual está definida por la ecuación 10, y está formada por la suma de las matrices de los nodos  $\bar{K}^{(1)}$ ,  $\bar{K}^{(2)}$  y  $\bar{K}^{(3)}$  ecuación 11

$$K^{(e)} = \sum_{l=1}^3 \bar{K}^{(l)} = \begin{pmatrix} K_{ii} & K_{ij} & K_{ik} \\ K_{ji} & K_{jj} & K_{jk} \\ K_{ki} & K_{kj} & K_{kk} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\bar{K}^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}K_{jj} & K_{jk} \\ 0 & K_{kj} & \frac{1}{2}K_{kk} \end{pmatrix}; \bar{K}^{(2)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}K_{ii} & 0 & K_{ik} \\ 0 & 0 & 0 \\ K_{ki} & 0 & \frac{1}{2}K_{kk} \end{pmatrix}; \bar{K}^{(3)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}K_{ii} & K_{ij} & 0 \\ K_{ij} & \frac{1}{2}K_{jj} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Considerando el lado dañado  $ik$ , la matriz de rigideces correspondiente es:

$$K_{ik} = \frac{1}{3}K^{(e)}. \quad (12)$$

Una vez eliminada la rigidez del elemento  $ik$  se obtiene la nueva rigidez del elemento dañado

$$\hat{K}^{(e)} = K^{(e)} - K_{ik}. \quad (13)$$

Cuando un elemento tiene dos bordes (enlaces) dañados, eso significa que una grieta se ha generado en el elemento y se ha perdido 2/3 de su rigidez, por lo que se puede considerar que el elemento está completamente dañado (figura 7), y debe ser reemplazado por elementos discretos (Zárate and Oñate, 2015).

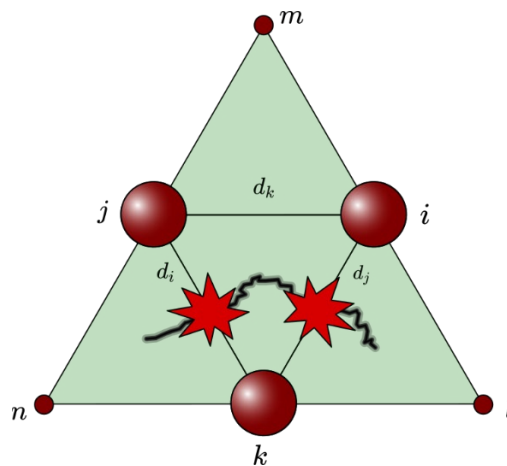


Figura 7. Elemento triangular con dos bordes dañados y su efecto en los triángulos adyacentes (Zárate and Oñate, 2015).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Análisis por fractura

Los materiales granulares como el concreto y la mampostería son propensos a fallas frágiles por tensión. Al incrementar las cargas las deformaciones excesivas producen un agrietamiento inicial que se expande (en direcciones que dependerán del tipo de carga aplicada flexión, cortante, tensión, etc.) hasta alcanzar un estado límite de falla por fractura. La fractura es una falla frágil que deshabilita la capacidad de carga de una estructura y/o componente estructural. A manera de prevenir este tipo de falla frágil, se han desarrollado diversos métodos de refuerzo que brindan una ductilidad adicional al material granular. Existen pruebas de laboratorio que determinan la capacidad de carga de elementos de concreto, pero estas requieren de equipamiento especializado de alto costo, además de la inversión necesaria para la producción de los modelos experimentales,

lo que nos lleva a buscar alternativas más económicas para predecir la capacidad del elemento sin necesidad de recurrir a pruebas destructivas. Una alternativa es el uso de software libre y métodos como el DEM y FEM para reproducir las pruebas experimentales de forma numérica.

### 3.1.1 Prueba de flexión

La prueba de flexión sirve para determinar el módulo de ruptura y la carga máxima que puede soportar una viga de concreto (Guzmán, 2020). La prueba debe llevarse a cabo de acuerdo con los lineamientos especificados por el método de prueba estándar para resistencia a flexión del concreto C 78-02 (International ASTM, 2002). En el trabajo presentado por (Guzmán et. al., 2020) se realizó la prueba de resistencia a flexión de acuerdo con las especificaciones C 78-02 para 8 especímenes de vigas de concreto, y se determinó el módulo de ruptura para concretos de diferentes edades y concretos con aditivos. La representación gráfica de la prueba de flexión se muestra en la figura 8.

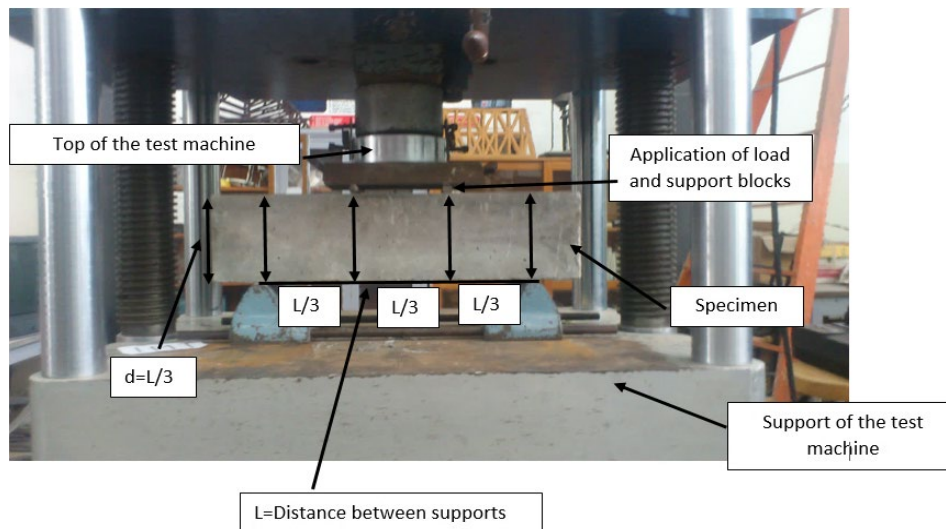


Figura 8. Descripción de la prueba de flexión en una viga de concreto (Guzmán et. al., 2020).

El objetivo de la prueba de flexión es determinar el módulo de ruptura que se obtiene a partir de la carga de la carga máxima aplicada con la ecuación 14:

$$M_R = \frac{PL}{bd^2}, \quad (14)$$

en donde  $M_R$  es el módulo de ruptura ( $kPa$ ),  $P$  es la carga máxima aplicada,  $L$  es la longitud de la viga ( $cm$ ),  $b$  el ancho promedio del espécimen ( $cm$ ) y  $d$  el peralte promedio ( $cm$ ).

## 4. RESULTADOS

La simulación de la prueba de flexión se llevó a cabo con el software KM, se analizaron 20 modelos de prueba considerando para todos los casos la misma geometría ( $L=0.45\text{ m}$ ;  $b=0.15\text{ m}$ ;  $d=0.15\text{ m}$ ) y propiedades mecánicas (módulo de elasticidad,  $E=37.82\text{ GPa}$ ; módulo de Poisson,  $\nu=0.2$ ;  $GPa$  resistencia en compresión  $f'_c=34.34\text{ MPa}$ ; resistencia de tensión  $f_t = 2.26\text{ Mpa}$ ; energía de fractura  $\sigma_t=100\text{ N/m}$ ). El tipo de análisis es dinámico (método de solución: Newmark) y el modelo de fractura implementado es el de Mohr-Coulomb Modificado. La figura 9 muestra los resultados del análisis numérico de la prueba de flexión aplicando la carga de manera puntual (caso I) y con

variación lineal en el tiempo y un paso  $\Delta t = 0.001$  s. Se observa que debido al patrón de carga, el daño se concentra en los puntos de aplicación de las mismas y en los apoyos, principalmente. El modelo es muy susceptible a incrementos bruscos de carga y al tiempo de aplicación de la misma. Cabe mencionar que existen varios parámetros de calibración del DEM que al ser modificados afectan el modo de falla y la propagación de las grietas. En este caso en particular, no se desarrolla la falla por flexión esperada, si no que en su lugar se genera una falla por punzonamiento producida por la aplicación nodal de las cargas, lo cual no representa necesariamente una prueba real.

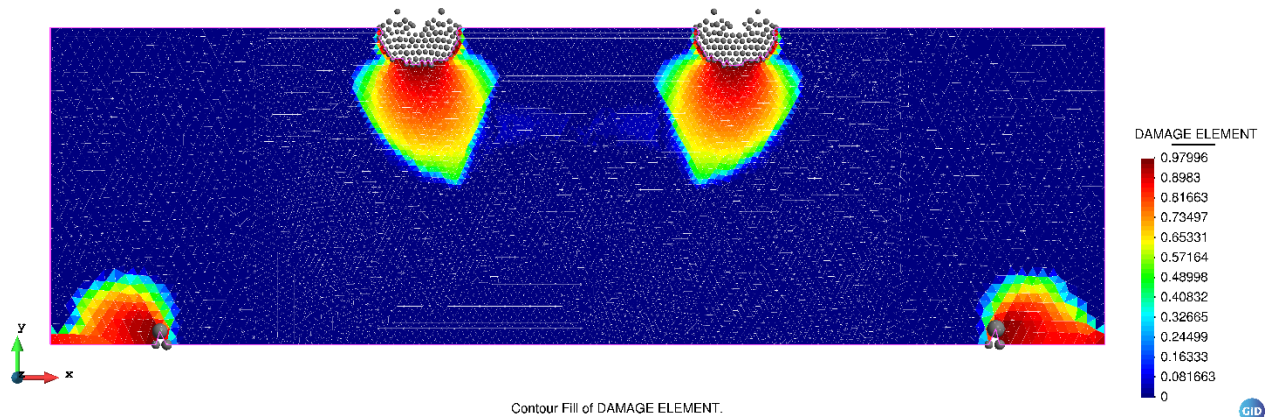


Figura 9. Análisis FEM-DEM, concentración de daño, caso I.

Para el caso de estudio II, se implementó la aplicación de la carga mediante un par de superficies de presión en la parte superior (figura 10), reemplazando el par de cargas del caso I, obteniendo con ello una mejor distribución del daño. Se observa que la zona donde aparecen primero las grietas es en la parte central inferior, produciéndose una falla por tensión del elemento. También se observan un conjunto de zonas más oscuras en la parte central a la izquierda y a la derecha, así como en la parte superior de la figura, que representan un agrietamiento o nivel de daño menor en la viga. El comportamiento y predicción de la ubicación de grietas, y el nivel de daño en el material es el esperado, de acuerdo con las pruebas de laboratorio presentadas en la bibliografía (Guzmán et. al., 2020).

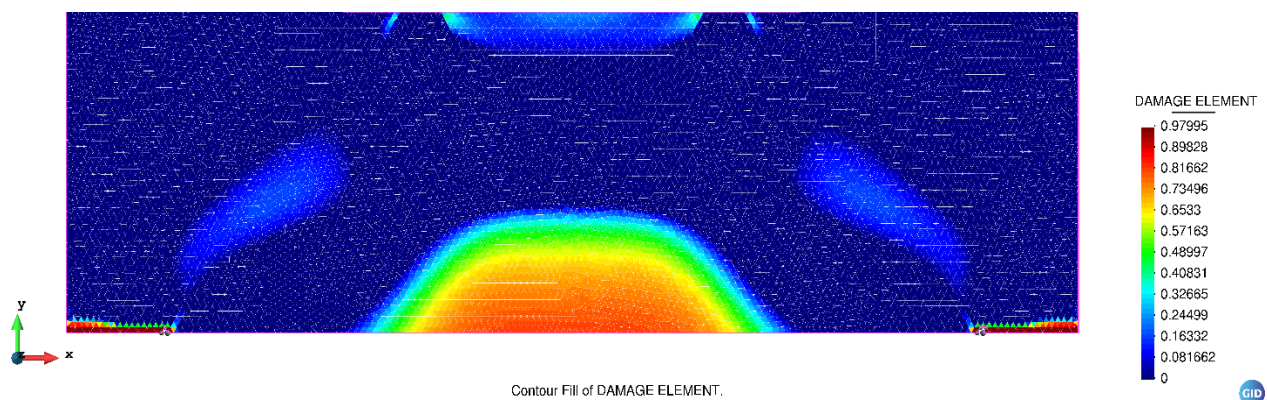


Figura 10. Análisis FEMDEM, concentración de daño, caso II.

La carga máxima alcanzada para producir la falla total del elemento es de  $P=8868.5$  kg, y la carga aplicada para generar los primeros daños en la viga (figura 10) es de aproximadamente  $P=5500$  kg, las cuales difieren de la carga de fractura reportada en la literatura  $P=4529.5$  kg (Guzmán et. al., 2020). Estas diferencias se atribuyen básicamente a detalles de la calibración del modelo, tales

como la energía de fractura a tensión del concreto ( $\sigma_t = 100 J/m^2$ ) tomada de ejemplos de análisis de fractura como el desarrollado por Alejandro Cornejo (Cornejo, 2020)

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es necesario afinar el proceso de calibración en todos los modelos de prueba debido a que no se logró el ajuste más exacto de cada uno de ellos. Se observó que la metodología de predicción de los patrones de grietas del FEM-DEM genera resultados alentadores para el tipo de problema. KM es un software muy sofisticado y se pueden obtener resultados tan exactos acorde a la calidad de calibración del modelo, y la capacidad de hardware disponible. Se concluye que es necesario realizar modelos de prueba adicionales, con un refinamiento de malla y con pasos del tiempo más pequeños, además del uso de equipo de cómputo de mayor capacidad.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al AULA CIMNE y en especial a Alejandro Cornejo, Raúl Bravo y Sergio Jiménez, integrantes del equipo de Kratos Multiphysics en CIMNE, por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto. También agradecemos a CONACYT por el apoyo económico proporcionado.

## 7. REFERENCIAS

- Cornejo, A. (2020). Doctoral Thesis. *A fully Lagrangian formulation for fluid-structure interaction between free-surface flows and multi-fracturing solids and structures*. Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya.
- Cornejo, A., Mataix, V., Zárate, F., Oñate, E. (2019). *Combination of an adaptive remeshing technique with a coupled FEM-DEM approach for analysis of crack propagation problems*. Computational Particle Mechanics, 735-752.
- Desai, C. S., & Kundu, T. (2001). *Introductory FINITE ELEMENT METHOD*. Florida: CRC press.
- García, V. J., Márquez, C. O., Zúñiga-Suárez, A. R., Zúñiga-Torres, B. C., Villalta-Granda, L. J. (2017). *Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 343–363.
- Guzmán, J. A. (2020). *Análisis de sensibilidad y ciencia de datos de un concreto de alta durabilidad y alto desempeño en infraestructura*. Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.
- Guzmán, J. A., Domínguez, F. J., Tinoco-Guerrero, G. (2020). *A numerical approximation for build the stress/strain diagram with just the maximum load obtained*. Boletín de la Sociedad Mexicana de Computación Científica y sus Aplicaciones, 1-8.
- International ASTM. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Pennsylvania: ASTM.
- Kratos Multiphysics. (5 de Septiembre de 2022). *GitHub, inc.* Obtenido de GitHub, inc.: <https://github.com/KratosMultiphysics/Kratos/wiki>
- Kundall, P. A., Strack, O. D. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Gdotechnique 29, 47-65.
- Oñate, E., Zárate, F., Miquel, J., Santasusana, M., Celigueta, M. A., Arrufat, F., Ring, L. (2015). *A local constitutive model for the discrete element method. Application to geomaterials and concrete*. Computational Particle Mechanics, 139-160.

Rojek, J., Labra, C., Su, O., Oñate, E. (2012). *Comparative study of different discrete element models and evaluation of equivalent micromechanical parameters*. International Journal of Solids and Structures, 1497-1517.

Santassusana, M. (2013). *Kratos DEM, a Parallel Code for Concrete Testing Simulations using the Discrete Element Method*. M.Sc. Thesis. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona, Barcelona.

Zárate, F., Oñate, E. (2015). *A simple FEM–DEM technique for fracture prediction in materials and structures*. Computational particle mechanics, 301-314.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-754-MX  
pp. 58 – 68



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de Calidad de las Construcciones

## Evaluación de patrones térmicos en una ciudad histórica de clima cálido templado

I. Tapia<sup>1\*</sup>, R. Grajeda<sup>1</sup>, M. Mondragón<sup>1</sup>, S. Aguello<sup>2</sup>, J. Borrego<sup>2</sup>, E. Alonso<sup>2</sup>, A. Sánchez<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [zS19001621@estudiantes.uv.mx](mailto:zS19001621@estudiantes.uv.mx)

<sup>1, 2, 3</sup> Programa Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, Veracruz, México

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México

<sup>3</sup> Posgrado de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, UMSNH, Morelia, México

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es comparar los valores de las isotermas de la Isla de Calor Urbano y el Índice de Vegetación con datos como población y número de viviendas, ofrecido por la instancia gubernamental del Inventario Nacional y determinar la ponderación entre ambos. La metodología es la aplicación del uso de la información del Landsat 8, el software ArcGIS y metadatos gubernamentales. La limitación de este trabajo es que sólo está enfocada en algunas zonas de una ciudad con clima cálido templado, pero proporciona información para urbanistas en áreas de ciudades con poca ventilación y características similares. Como resultado se obtiene que las temperaturas más altas se encuentran en el centro de la ciudad y los parques vehiculares, por lo que se sugieren políticas urbanas que reforesten estas zonas vehiculares y fomenten la ventilación en el centro de la ciudad.

**Palabras clave:** isotermas; planos térmicos y de vegetación; Landsat 8; software ArcGIS



## 1. INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbano (UHI por sus siglas en inglés) es un fenómeno por el cual las áreas urbanas son generalmente más cálidas que las áreas suburbanas y rurales circundantes. El efecto “isla de calor” puede ocurrir en cualquier zona urbanizada, aunque suele ser más notorio en las ciudades más grandes. Así mismo su “intensidad” por lo general se define y mide como la diferencia de temperatura entre el centro de un área urbana y la temperatura de un punto de referencia rural fuera de la ciudad, con escalas aproximadas a la densidad de población. Las condiciones más favorables para un efecto de Isla de calor, son cuando los cielos se encuentran despejados, esto se debe al aumento de calentamiento solar durante el día, además cuando los vientos son suaves, debido a que, por la falta de mezcla atmosférica, por lo tanto, es que se genera una dispersión en el aire caliente. (Heaviside, 2017)

Varios investigadores han identificado una relación directa entre la magnitud de las anomalías de la temperatura urbana y la cobertura del suelo urbano. Las temperaturas locales del aire son en parte una función de las temperaturas locales del suelo. Esta relación es particularmente evidente en condiciones atmosféricas de cielos despejados y bajas velocidades del viento. Las temperaturas del suelo son el producto neto de la energía. intercambio a través de la interfaz, donde básicamente el albedo, la emisividad y las propiedades térmicas de la interfase determinan las variaciones locales en las temperaturas del suelo. (Goward, 1981)

La capacidad de un pueblo o ciudad para generar una isla de calor urbana es ahora un hecho bien aceptado. En efecto, este es uno de los efectos climatológicos más ampliamente documentados de la modificación del medio ambiente atmosférico por parte del ser humano. La gran mayoría de los estudios se refieren a la forma única de la isla de calor en el pueblo o ciudad en particular encuestados. Ahora es tanto oportuno como importante buscar generalizaciones a partir de esta masa de trabajo. Es decir, parece hora de enfatizar las similitudes entre las islas de calor en lugar de sus diferencias. Las generalizaciones que sean posibles serán útiles en la modelización climática, e incluso pueden ser valiosas en la planificación urbana y la previsión meteorológica. (Oke, 1967) La existencia del fenómeno de la isla de calor urbano se ha documentado durante más de un siglo, Howard, L. (1833) creía que las temperaturas urbanas se elevaban por el autocalentamiento debido a factores industriales y domésticos. Kratzer (1956) atribuye la isla de calor principalmente al efecto de cobertura de la contaminación atmosférica urbana. A su vez, supone que la nube de contaminación de la noche absorbe y vuelve a emitir la radiación térmica de la ciudad, lo que da como resultado el gran exceso de temperatura nocturna observado (Myrup, 1969).

Ahora bien, como ya conocemos, la existencia de las mismas ha sido reconocida por un largo periodo de tiempo, esto a su vez ha traído grandes consecuencias, los métodos para cuantificar su intensidad han evolucionado y estos pueden clasificarse, en términos generales, por el uso de observaciones terrestres (fijas o móviles), imágenes satelitales o mediante la modelización utilizando modelos climáticos o meteorológicos regionales. (Heaviside, 2017).

La aplicación de los datos satelitales al fenómeno de la isla de calor urbana ha sido posible desde la llegada de mediciones confiables de albedo espectral (Kim, 1992), la cual es una medida de la reflectividad, que en relación entre la radiación solar reflejada por una superficie al total de radiación solar entrante.

## 2. PROCEDIMIENTO

Para poder realizar la metodología, fue primordial llevar a cabo una selección y análisis del área que se debía investigar; esto con la intención de generar resultados representativos de las zonas en cuestión.

## 2.1 Análisis del sitio de estudio

El centro histórico de Morelia es uno de los más señoriales y mejor conservados de México e incluso en 1991 fue declarado Patrimonio de la Humanidad por parte de la UNESCO. No obstante, la proliferación de comercio informal en las calles y plazas observado durante los últimos 25 años se convirtió en un problema que parecía irresoluble y que generaba problemas sociales y ambientales, además de que limitaba el disfrute de los espacios públicos, tanto para los ciudadanos locales como para el turismo (Barajas, 2002)

La ciudad de Morelia, es la capital del estado de Michoacán, es uno de los destinos turísticos más importantes de México por su invaluable patrimonio cultural e histórico, siendo esta la cuna ideológica del Movimiento de Independencia y sede de conocidos festivales internacionales de música y cine.

Construida en lo alto de una colina en el siglo XVI, Morelia ofrece un ejemplo excepcional de planificación urbanística en la que se fusionan los conceptos del Renacimiento español con la experiencia mesoamericana. Sus calles, perfectamente adaptadas a las laderas de la colina, conservan su trazado primigenio. La historia arquitectónica de la ciudad puede leerse en sus más de doscientos edificios históricos (Sizzo, 2013).

Esta ciudad se encuentra geolocalizada en la latitud norte entre los paralelos 19°27'06" y 19°50'12", y los meridianos 101°01'43" y 101°30'32" de longitud oeste, a una altitud promedio de 1,920 metros sobre el nivel del mar, al norte de Michoacán. Como podemos observar en la Figura 1 donde se muestra la localización exacta del lugar.

Las edificaciones del centro histórico están construidas en su mayoría de piedra de cantera rosa, con espesores que van de entre los 60 a 80 cm. Por otra parte, en las calles nos podemos encontrar adoquines de piedra al igual que en las banquetas, estas son de una tonalidad de gris, por lo que se supone, esto puede llegar a afectar la sensación térmica, debido a la absorción de calor.

En la ciudad se puede observar la traza urbana española de la época, siendo el parte aguas de la misma, la Catedral Metropolitana de Morelia. De esta se rige una ortogonalidad en sus calles, en donde podemos percibir que, en gran parte del día, se encuentra una incidencia solar alta. No obstante, el clima de la ciudad está catalogado como Cálido Templado, donde su temperatura anual oscila entre los 16 a 22°C, con humedad media y precipitaciones anuales que desde los 700 a 1000 mm.



Figura 1. Mapa satelital de Google Earth mostrando la ubicación de la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán, México. Así mismo la traza urbana del Centro.

## 2.2 Análisis de mapas satelitales

### 2.2.1 Análisis de temperatura con mapa satelital mediante el programa ArcGIS

Con el objetivo de realizar un análisis de las temperaturas que se presentan en la ciudad de Morelia, se realizó un mapeo térmico con ayuda del programa de ArcGIS. Con anterioridad y para poder realizar el mapeo, se descargó el mapa satelital del estado de Michoacán mediante la página de la USGS (2022) donde se seleccionaron las fechas en un rango del 01 al 30 de julio del 2021 con Latitud 19° 42' 00" N y Longitud 101° 07' 00" W, esto debido a que sería el periodo del tiempo en que estaríamos en una estancia de investigación.

Respecto a la sección satelital, se ocupó la información del Landsat Collection 2 Level-2 con Landsat 8-9 OLI/TIRS CS L2, del archivo descargado LC08\_L1TP\_027046\_20210720\_20210729\_02\_T1, estos documentos en formato TIF. Después de haberse logrado la descarga e transferencia de los datos, se empezó a trabajar en el programa para determinar los valores en el ArcMap versión 10.4.1. Siguiendo con el procedimiento, a los archivos de mapas cargados, con el comando clip se recortó únicamente la zona de Morelia, posterior a ello, para poder realizar las imágenes de los mapas, se utilizó la herramienta Composite Band, trabajando con las bandas 10 y 11, la cual a raíz de ello se obtuvieron nuevos layers de Temperatura, los cuales se tuvo que efectuar una conversión de grados Fahrenheit a grados Centígrados, después de una fusión de las mismas, se obtuvo un promedio de layers, dando como resultado layers de áreas y porcentajes de Vegetación, y la Temperatura Superficial, y para lograr una mejor representación e interpretación de la gráfica. Figura 2

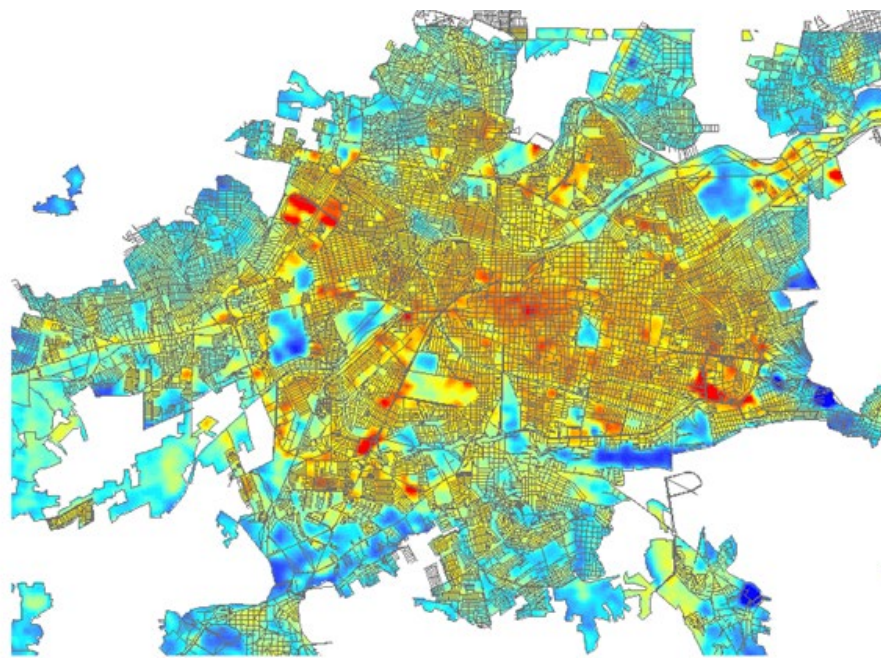


Figura 2. Mapa térmico de la ciudad de Morelia, Michoacán, obtenido mediante la ejecución del programa ArcGIS

Como paso siguiente, se abrió la tabla de atribuciones para poder calcular el porcentaje de temperaturas que presentaba nuestro mapa, siguiendo se añadió una nueva columna la cual le aplicamos la tipología de Double. A su vez, en la columna de COUNT, proseguimos a abrir con el botón derecho la pestaña de estadísticas, esta opción nos proporcionó datos como el número de grados que se obtuvieron, la mínima y la máxima cantidad registrada, entre otros. Los cuales el que nos interesaba en el momento era la cifra de la sumatoria total de todos los datos recabados, este

nos serviría para poder realizar una regla de tres posicionados en la columna de porcentaje, con el botón derecho le dimos click a la pestaña de Field Calculator, donde pudimos realizar la operación: columna COUNT/ Sumatoria total \* 100, dándonos como resultado las cifras de cada uno de los grados en porcentaje. Figura 3. Los datos obtenidos en la tabla se copiaron a un archivo de Excel, esto con la finalidad de obtener una gráfica representativa de los porcentajes obtenidos.

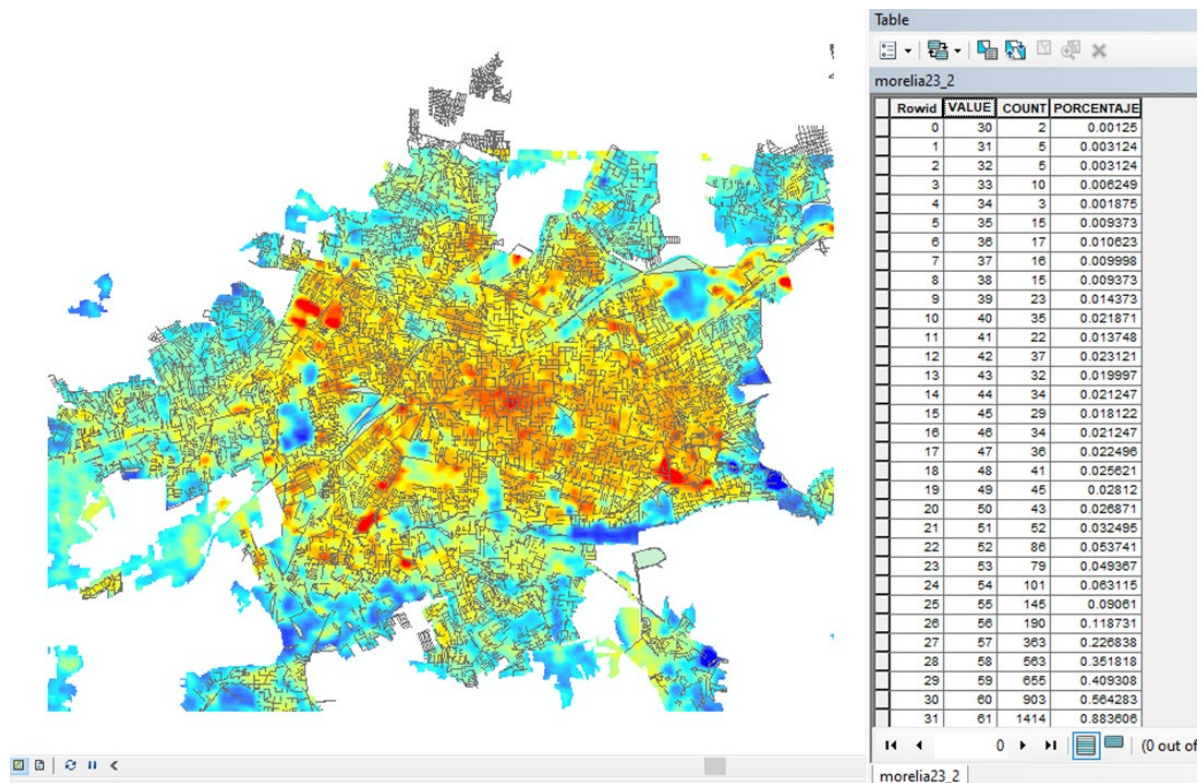


Figura 3. tabla de porcentaje obtenida mediante el mapa térmico

### 2.2.2 Análisis de densidad poblacional y vivienda con mapa satelital mediante metadatos gubernamentales

Con la finalidad de obtener datos referentes a la población y vivienda, se realizó una comparativa entre los distintos mapas, se decidió realizar un mapeo con ayuda de metadatos gubernamentales, como el Mapa Espacio y Datos de México de la página del INEGI (figura 4). Así mismo, dentro de la herramienta, se aplicó el Inventario Nacional de Vivienda, del cual se obtuvieron mapas relacionados al total de población por manzana, el total de viviendas por manzana, el promedio de ocupantes por viviendas distribuidas por manzanas, los recubrimientos de la calle por manzana. Y mediante al Mapa Digital de México (del INEGI), se obtuvo un mapa sobre calor en avenidas principales.



Figura 4. Mapa Espacio y Datos de México de la página del INEGI

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados del análisis con programa el programa satelital ArcGIS

Como resultado del análisis satelital, se pudo observar que la temperatura superficial arrojada por el programa en la ciudad de Morelia, Michoacán Al finalizar el procedimiento del análisis con el programa de ArcGIS, se obtuvo un registro de 24 temperaturas superficiales en la ciudad de Morelia, Michoacán que oscilan entre los 32 °C y una máxima de 55 °C. La Isla de Calor Urbano que presentó un índice más alto fue registrado en el Centro Histórico, así como en zonas de plazas comerciales o explanas sin cubiertas. Así mismo, las zonas más frías son zonas arboladas principalmente el panteón municipal.

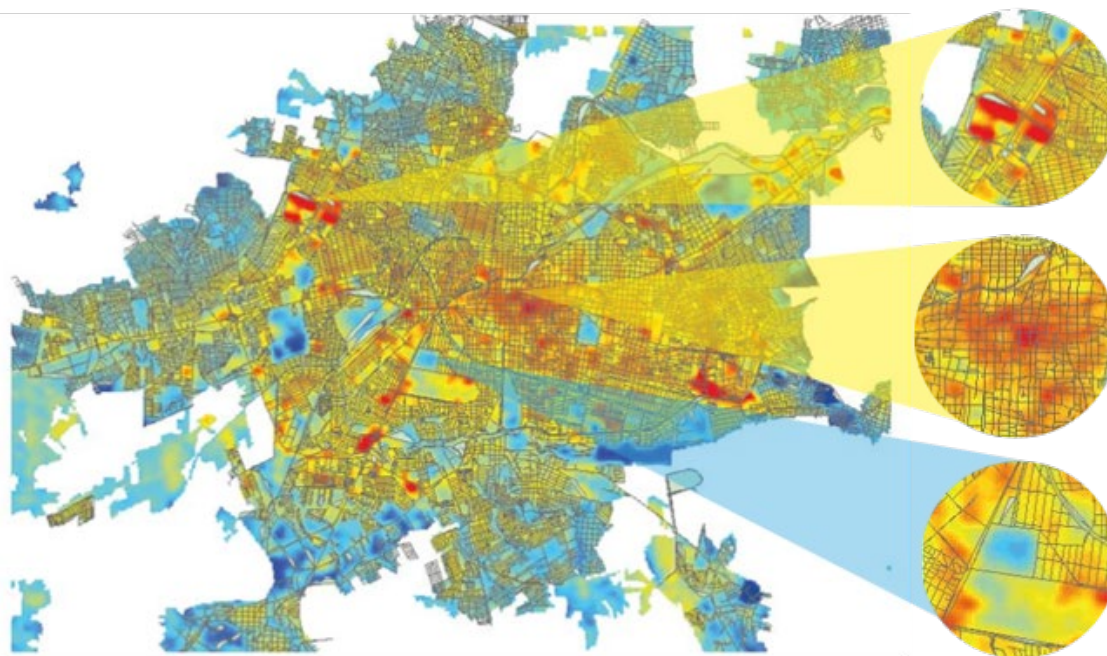


Figura 5: Mapa térmico de la ciudad de Morelia, Michoacán enfocado en las zonas con el punto más alto y bajo de incidencia térmica.

También hay que mencionar que, gracias a la tabla obtenida mediante el programa ArcGIS y la gráfica obtenida por Excel, podemos observar con mayor claridad que las temperaturas más dominantes dentro de la ciudad de Morelia, varían entre los 35°C y 46°C (Figura 6), en la que la tabla registra que la temperatura de 39°C es la que mayor área abarca, con un total del 5.35% del total de la ciudad (Tabla 1), mientras que, por el contrario, la temperatura que menor área abarca fue de 55°C, que en porcentaje arrojó un total del 0.0006% del total de la ciudad (Tabla 2).

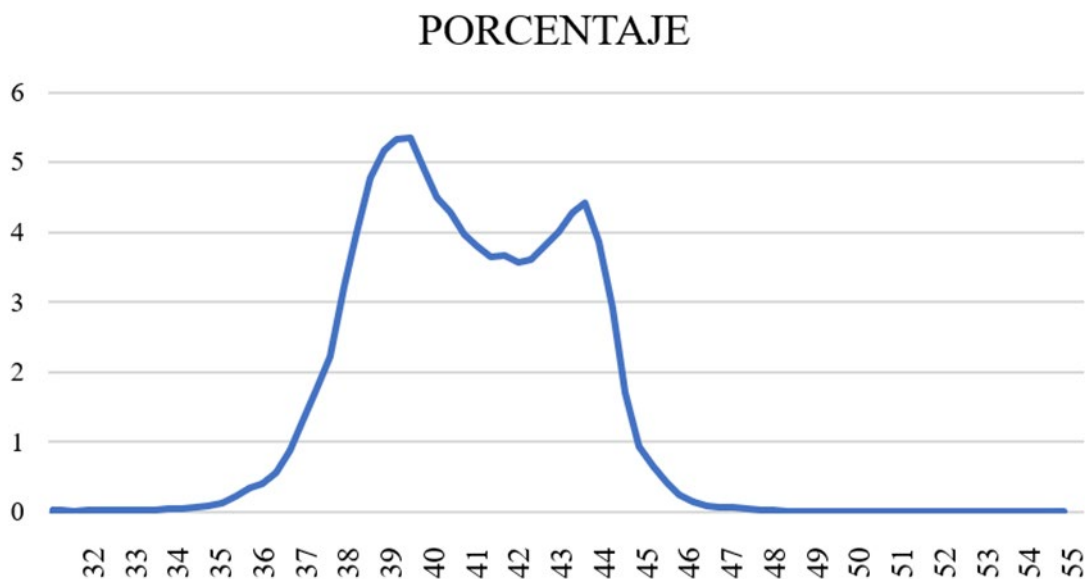


Figura 6: Gráfica que expresa la relación entre los grados registrados en el programa ArcGIS y el porcentaje de cada una de ellas

Tabla 1. Sección de la tabla donde registra las temperaturas que mayor área abarcan y sus cifras expresadas en porcentaje

Morelia 23-2			
Rowind	Grados °C	Count	%
40	39	8568	5.35413
39	38	8532	5.33163
38	37	8281	5.17478

Tabla 2. Sección de la tabla donde registra las temperaturas que menor área abarcan y sus cifras expresadas en porcentaje

Morelia 23-2			
Rowind	Grados °C	Count	%
75	55	1	0.00063
0	30	2	0.00125
4	32	3	0.00188

### 3.2 Resultados del análisis de densidad poblacional y vivienda con mapa satelital mediante metadatos gubernamentales

Como resultado del análisis de los metadatos gubernamentales, pudimos observar diferentes datos dependiendo el mapa que se fue obteniendo. Como primera instancia, en el mapa del total de población por manzana en ciudad de Morelia (Figura 7) podemos examinar que hay zonas aledañas

a la Plaza de Armas (a un costado de la Catedral de Morelia) en las que existen una gran concentración de personas, esto debido a que es una región hotelera y turística, podemos apreciar que, dentro de las cifras registradas, varía en un rango que va de entre los 230 hasta los 455. Por otra parte, cuanto más nos vamos alejando del centro histórico, los números son cada vez más bajos, obteniendo un rango aproximado que va desde los 0 a 230.



Figura 7: Mapa del Total de población por manzana en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Respecto al mapa del total de viviendas por manzana en ciudad de Morelia (Figura 8) podemos observar que dentro del centro histórico existe una baja cantidad de viviendas, esto va de la mano con el punto anterior, debido a la zona en la que nos posicionamos, esta presenta un rango de viviendas por manzana, que va desde los 0 a 30 aproximadamente, por otra parte, entre más alejando del centro histórico, los números son cada vez más altos, obteniendo un rango aproximado que va desde los 30 a 243 aproximadamente.



Figura 8: Total de viviendas por manzana en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Ahora bien, hablando sobre al mapa del promedio de ocupantes por viviendas distribuidas por manzana en la ciudad de Morelia (Figura 9) podemos observar aproximadamente la mayoría de las zonas su rango varía entre los 2 a los 3.92 aproximadamente, a excepción de plazas, parques, museos catedrales, entre otros, donde la cifra arrojada para estos establecimientos es de 0 ocupantes.



Figura 9: Promedio de ocupantes por vivienda distribuidas por manzana en la ciudad de Morelia, Michoacán.

En relación con el mapa sobre recubrimientos de la calle distribuido por manzana en la ciudad de Morelia, Michoacán. (Figura 10) podemos observar que, en la zona céntrica de la ciudad, la mayoría cuenta con todas las vialidades de recubrimiento en calles, pero entre más nos vamos acercando a los límites de la ciudad, estas zonas presentan recubrimiento en alguna vialidad o nulo de esta. También en el mapa podemos contemplar que hay zonas muy alejadas del centro de las cuales no se encuentra especificado si cuentan o no con el recubrimiento.

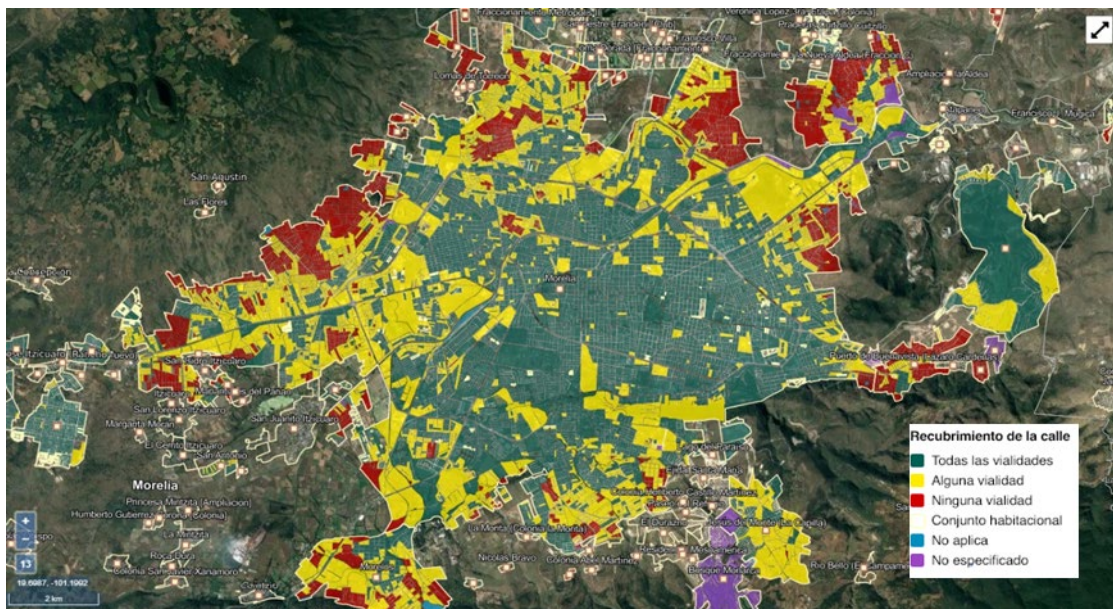


Figura 10: Recubrimientos de la calle por manzana en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Por último, en este mapa de calor en Avenidas Principales dentro de la ciudad de Morelia, Michoacán, del Mapa Digital de México. (Figura 11) podemos observar que al norte, sur y centro de la ciudad, presentan una gran concentración de masas vehiculares.



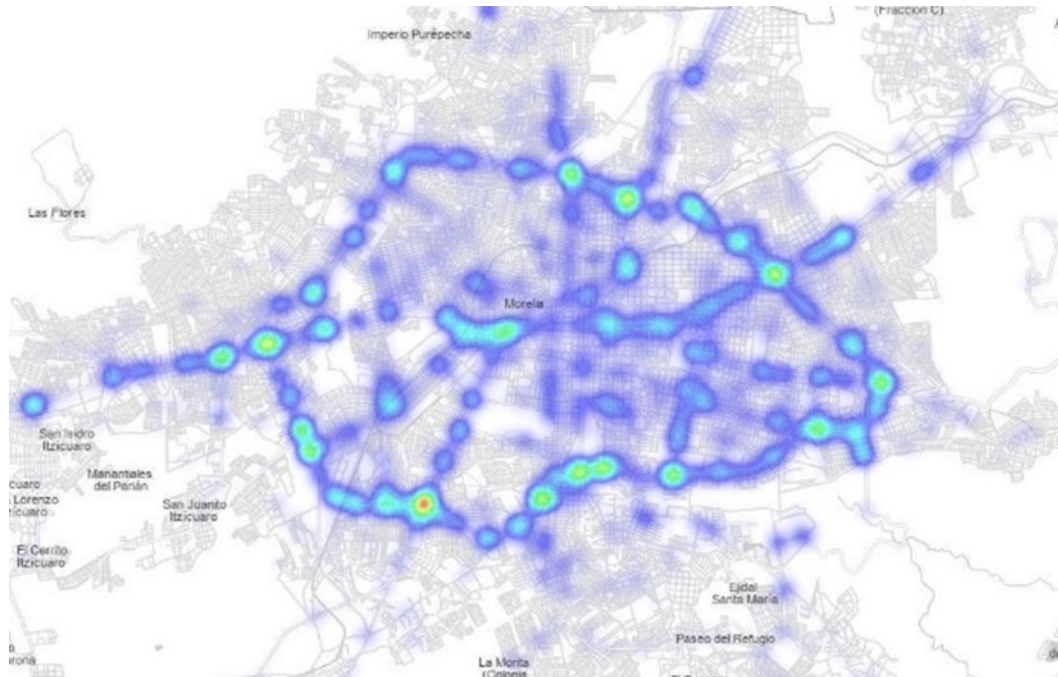


Figura 11: Mapa de calor en Avenidas Principales en la ciudad de Morelia, Michoacán.

#### 4. CONCLUSIONES

Para concluir, estos tipos de programas pueden proporcionar demasiada información acerca de temperaturas, población, vivienda, áreas, entre otros, dependiendo cual sea la necesidad o los objetivos que se busquen, es como podemos adecuarlas para conseguir la mayor información posible. Por otra parte, es importante mencionar que estas investigaciones aportan un conocimiento sobre las temperaturas que pueden presentar en ciertas zonas y como es que estas varían dependiendo por factores, como ejemplo, el tipo de material con el que están construidas las edificaciones, por mencionar alguno, y como es que pueden llegar a afectar la vida de la población. Como observamos en algunos mapas, resulta impresionante la cantidad de datos que tiene registrado el INEGI, esto nos puede dar una idea de cómo ciertos factores (dentro del programa) pueden igual estar afectando a que las condiciones no sean tan favorables a ciertas horas del día. También es importante, si es posible, tener la oportunidad de viajar al lugar de estudio, esto con el objetivo de verificar si las mediciones obtenidas mediante programas satelitales son las correctas. Ahora bien, habiendo recabado toda esta información, lo importante o necesario es buscar soluciones que ayuden a reducir la sensación de calor, principalmente en las zonas donde los datos marcaban entre 35°C a 46°C y por supuesto los grados mayores que iban hasta los 55°C. Al mismo tiempo, este tipo de investigaciones ayudan a que se abra la conversación, no solo en la zona de estudio, sino que también en ciudades o estados donde sea necesario generar un cambio, para generar propuestas de solución a las islas de calor urbano, y así tanto el peatón, como el conductor y el habitante puedan sentirse en zonas confortables en cualquier momento y lugar del día. Otro punto al que se llegó de conclusión es que hay que generar conciencia a las personas sobre la importancia de las áreas verdes, y como estas ayudan a reducir los impactos de los rayos solares. Algo que se pudo observar en los mapas recabados, fue que en las zonas donde se encuentran grandes masas verdes (Bosques y parques) como lo son el panteón, el Bosque Cuauhtémoc y algunas zonas de la Ciudad Universitaria, presentaron muy bajos niveles de incidencia solar.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo financiero de CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. Así mismo, agradezco al soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, y en especial al Dr. Wilfrido Martínez Molina, quien fue el que nos aceptó en nuestra estancia de investigación. De igual forma a la Dra. Ruth María Grajeda Rosado y al Mtro. Max Mondragón, profesores investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat de la Universidad Veracruzana, quienes nos apoyaron durante todo el proceso con sus conocimientos. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación del programa Delfín, financiado por el Depto. De Movilidad de la Universidad Veracruzana.

## 6. REFERENCIAS

- Barajas, L. F. (2002). *El centro histórico de Morelia: gestión social y revaloración del patrimonio*. Anales de Geografía de la Univ. Complutense, 131-156.
- Goward, S. N. (1981). *Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island*. Physical Geography, 19-33.
- Heaviside, C. M. (2017). *The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment*. Current environmental health reports, 296-305.
- Kim, H. H. (1992). *Urban heat island*. International Journal of Remote Sensing, 2319-2336.
- Myrup, L. O. (1969). *A numerical model of the urban heat island*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 908-918.
- Oke, T. R. (1967). *City size and the urban heat island*. Atmospheric Environment, 769-779.
- Sizzo, I. A. (2013). *Colonial y animado: percepción del Centro Histórico de Morelia entre los residentes de la ciudad*. Journal of Latin American Geograph, 113-135.
- USGS. (2022). *United States Geological Survey*. Obtenido de <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-755-MX  
pp. 69 – 81



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Análisis termográfico de los envolventes edificatorios en un centro histórico de clima templado

P. Cano<sup>1\*</sup>, R. Grajeda<sup>1</sup>, M. Mondragon<sup>1</sup>, J. Saucedo<sup>1</sup>, I. Tapia<sup>1</sup>, W. Martinez<sup>2</sup>, C. Lara<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [zS19001618@estudiantes.uv.mx](mailto:zS19001618@estudiantes.uv.mx)

<sup>1</sup> Programa Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, Veracruz, México.

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

### RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar en qué medida afecta la orientación de los cañones urbanos sobre la temperatura superficial de las fachadas, el suelo y la temperatura ambiente, a través de mediciones en campo. Como resultado se obtuvo una variación de temperatura de 6°C promedio entre los cañones urbanos recorridos, así como variaciones de 11°C entre las temperaturas superficiales de las fachadas. La limitación de la práctica fue que se realizó en un solo día representativo, pero las mediciones se complementan recorriendo cuatro cañones urbanos con condicionantes similares de altura, ancho y tipo de materiales. Para concluir, se propone a utilizar materiales frescos y recubrimientos con alta reflectividad como alternativa de métodos pasivos en calles principalmente norte a sur.

**Palabras clave:** termografía; cañón urbano; Isla de Calor Urbano.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las Islas de Calor Urbano (ICU) son fenómenos que ocurren en áreas urbanas donde se presentan condiciones de temperatura considerablemente más elevadas que las zonas circundantes (Madrigal-Uribe, et al., 2007). La ICU se suscitan principalmente en zonas con una alta densidad de estructuras, edificios, asfaltos, planchas de concreto, entre otros elementos; espacios donde se desarrolle la vida humana y que no se tenga la presencia de zonas verdes o arboladas. Uno de los principales factores que suman en la elevación de la temperatura en la ICU son las emisiones por parte de la industria a en general, así como la contaminación por parte de los vehículos motorizados, que agravan la situación de calor (Mercado & Marincic, 2017). La teoría aceptada para entender el fenómeno es la propuesta por T.R. Oke (1987) donde enseña que todo inicia con la radiación solar que incide en las superficies artificiales de las ciudades, se le resta la radiación reflejada y emitida por las mismas, quedando entonces la radiación neta.

En la tipología de los centros históricos creados alrededor de los siglos XVI y XVII, la configuración adoptada en los cañones urbanos es generalmente sin vegetación o con una baja presencia de áreas verdes, lo que provoca que se presenten fenómenos como ICU, afectando el confort del usuario contemporáneo que habita en el lugar. Otro de los factores que incrementan la temperatura es el efecto del cañón urbano donde se tiene una temperatura ambiental que supera a la alcanzada por el aire urbano, este temple tiende a ser más alto durante el día debido a que los edificios de mayor altura atrapan el calor, reduciendo la capacidad de disiparse, y en ambientes como los cañones urbanos de los centros históricos se vuelve aún menores las posibilidades de reducción debido a las características ya mencionadas (Rosas & Garcia, 2014).

A raíz del calentamiento global, las ciudades del siglo XXI están incrementando su temperatura promedio anualmente, por lo que resulta imperioso implementar metodologías que persigan una mengua en las emisiones y consigan un control del perfil térmico; es entonces necesario llevar un estudio y control de ICU en las ciudades para comenzar a contrarrestar el comportamiento térmico negativo a través de procedimientos reglamentados con el fin de adquirir datos estándar que puedan ser utilizados como punto de partida para implementar métodos que respeten a la arquitectura existente del lugar, pero adaptadas a las condiciones climatológicas del sitio de emplazamiento con el fin de dar espacios cómodos para el usuario.

Es importante aclarar que la variación de temperatura depende de factores específicos de clima, composición de los cañones urbanos, materiales de los que está hecho, el número y tipo de vehículos que transitan en él, el número de personas que se desarrollan dentro, cantidad de vegetación y los materiales de las fachadas y rodamiento (Gartland, 2008) (Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011).

Una de las incógnitas que persigue este trabajo es demostrar el nivel de importancia que tiene la orientación de los cañones urbanos en la diferencia de temperaturas, y si esto influye también en la toma de una decisión para los métodos de enfriamiento pasivo aplicado hacia las fachadas con el fin de disminuir la temperatura en la isla de calor urbano de un centro histórico de clima templado. Es aquí donde toma la importancia de los materiales frescos donde según Akbari (2009) demuestra que con un aumento de 0.15 a 0.25% en el albedo de los materiales, a nivel global, en azoteas urbanas y superficies pavimentadas respectivamente, se induce un forzamiento radiativo negativo equivalente a la compensación de 44 Gt (miles de millones de toneladas) de emisiones de CO<sub>2</sub>, y expone la propuesta económica viable para su puesta en práctica.

Tal y como lo menciona (Bustamante, 2017), luego de los resultados obtenidos del análisis de la ciudad de Cuenca, Ecuador, se demuestra que la morfología de las ciudades afecta en la modificación del clima, donde a su vez suma en pro de la ICU, para esto se toma en consideración que la ICU está definida como un aumento de temperatura donde se debe hacer una evaluación de los efectos positivos o negativos con base en rangos de confort delimitados por especificaciones de

cada zona de interés. La zona donde existe un registro de temperatura más bajo en el área superior. Tal como lo demuestra (García Nevado, 2019), existen diferencias de acuerdo con la orientación, teniendo como resultado del análisis que el aire es mayor en las fachadas sur que en las orientadas al norte, y esto se mantiene aun cuando la sur recibe una radiación directa. Tal como lo determina, la orientación de los cañones urbanos hace que se tengan diferentes temperaturas, generando un margen de diferencia, que, si bien no siempre es una variación importante, afecta al confort del usuario.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Análisis geográfico e histórico del sitio de estudio

Para el estudio de las temperaturas se hizo un análisis del área a estudiar en Morelia, Michoacán, México. El centro histórico de Morelia es de los más grandes ejemplos de la planificación urbana española, su composición está determinada por una retícula ortogonal donde siempre hay sol en una acera y sombra en la acera contraria, como se demuestra en la Figura 1, donde es notoria la traza urbana de la ciudad de Morelia. Su clima es templado con humedad media, precipitaciones anuales entre 700 a 1000 mm y la temperatura anual oscila entre los 16 a 22 °C.

Las edificaciones del centro histórico están hechas principalmente de piedra de cantera rosa de la región, con espesores de 60 a 80 cm. En las calles encontramos adoquín de piedra al igual que las banquetas, su color es gris oscuro por lo que puede influir en la absorción de calor. La composición de las edificaciones en los cañones urbanos seleccionados está configurada principalmente en dos niveles, por lo que se tiene una mayor masa de aire caliente al interior.

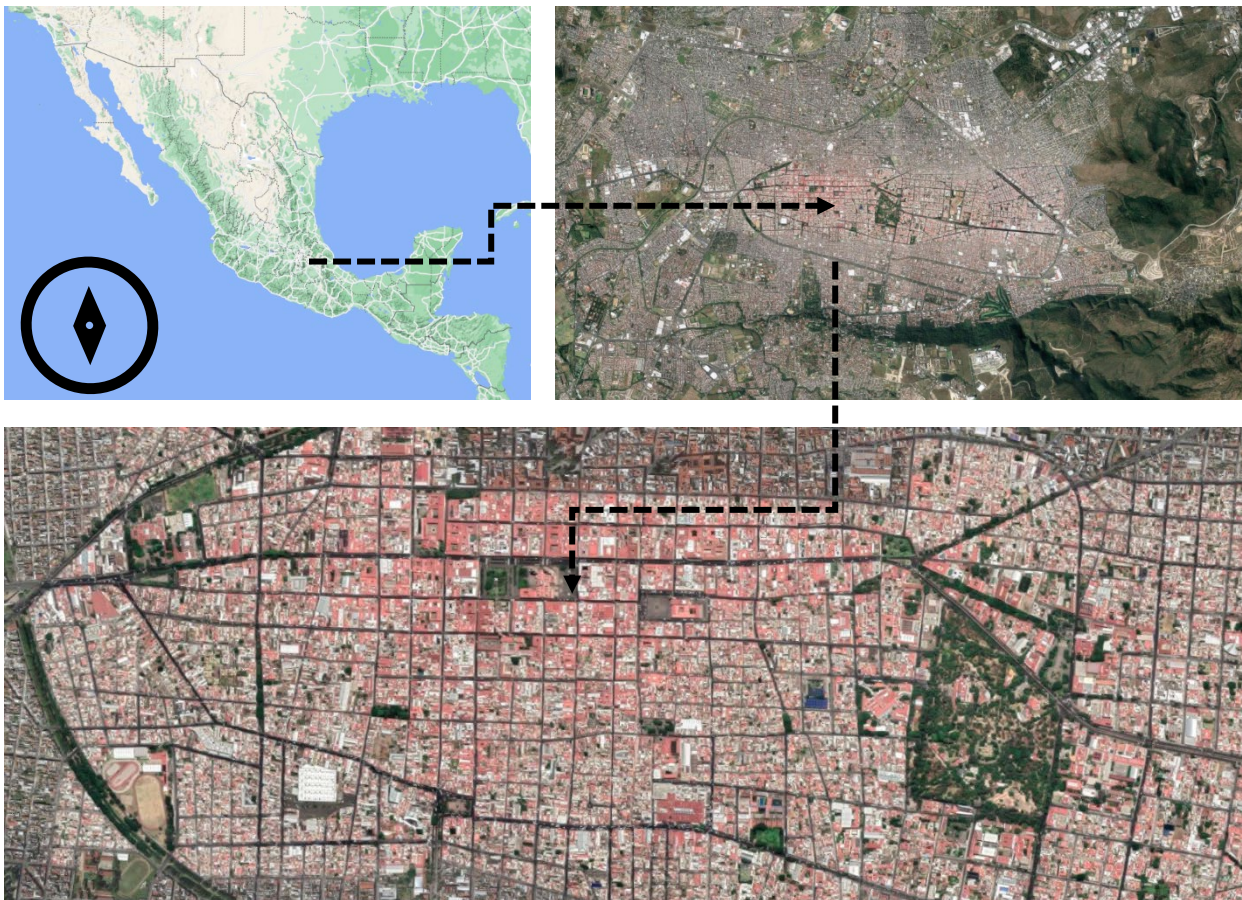


Figura 1. Mapa satelital de la ciudad de Morelia, enfocado hacia el Centro Histórico de la misma, mostrando su traza urbana ortogonal

## 2.2 Análisis de temperatura con mapeo satelital

Con el fin de determinar el área a intervenir, se hizo un mapeo térmico en la ciudad de Morelia con ayuda del programa de ArcGIS. Se comenzó descargando el mapa satelital del estado de Michoacán mediante la página de la USGS (2022) donde se seleccionaron las fechas en un rango del 01 al 30 de julio del 2021 con Latitud 19° 42' 00" N y Longitud 101° 07' 00" W, debido a que es el lapso de tiempo considerado para hacer las mediciones en campo, dando pie a poder realizar una comparativa entre lo que se mostró en el programa con la temperatura atmosférica, y las temperaturas superficiales en los cañones urbanos analizados.

En la sección satelital, se ocupó la información del Landsat Collection 2 Level-2 con Landsat 8-9 OLI/TIRS CS L2, del archivo descargado LC08\_L1TP\_027046\_20210720\_20210729\_02\_T1 con documentos en formato TIF. Una vez realizada la descarga de los datos, se comenzó a trabajar en el programa de ArcGIS con los documentos, en un archivo en blanco para hacer la importación correcta de los datos y determinar los valores en el ArcMap versión 10.4.1. A los mapas cargados, se les retiró el background de las bandas B10, B5 Y B4 para dar paso al uso del comando *Clip* y así recortar únicamente la zona de la ciudad de Morelia. Para las imágenes finales, el RGB aplicó la herramienta *Composite band* y dio cabida a un nuevo Layer "RGB".

La radiancia se obtuvo trabajando con las bandas 10 y 11, obteniendo un nuevo layer Temperatura Brillo del Suelo, con las mismas bandas (10 y 11) se generaron dos layers nuevos, en los que se tuvo que hacer una conversión de °F a °C, y al final se realizó una fusión de estas para obtener un promedio de ambas capas, resultando en Temperatura del Brillo Promedio. Con la herramienta *Raster Calculator* se obtuvieron los layer de Áreas de Vegetación, Porcentaje de Vegetación, y lo más relevante para la investigación que fue la Temperatura de la Superficie; por último, se agregó una escala de colores a la capa final para tener una mejor representación gráfica, y así facilitar la determinación del área de análisis. Las mediciones mencionadas se hicieron de forma progresiva, es decir, fue un proceso lineal para finalmente obtener los resultados de la temperatura, donde se encontró que el área que abarca la ICU más grande en la ciudad de Morelia está en el actual centro histórico, dentro de un área aproximada entre las calles Gertrudis Bocanegra y Nicolás Bravo (Figura 2).

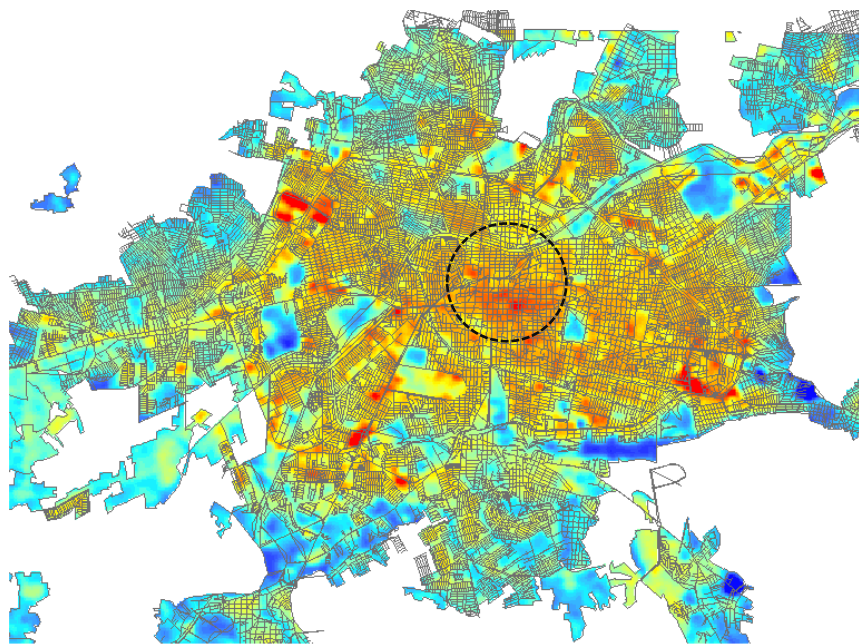


Figura 2. Mapa de análisis térmico de la ciudad de Morelia donde podemos ver la Isla de Calor Urbano más extensa en el interior de la ciudad, el Centro Histórico.

### 2.3 Investigación de Campo

Para la investigación de campo se midió cuatro cañones urbanos (Figura 3); con una extensión de tres cuadras de largo donde el ancho promedio de los cuatro es de 7.80 m y comparten la constante de altura con edificios de dos niveles de alto.

De los cuatro cañones urbanos, dos se seleccionaron en disposición norte a sur, Calle Vasco de Quiroga en una sección con tres cuadras de longitud, entre la avenida Francisco I. Madero y Lic. Soto Saldaña y el segundo cañón fue la calle Virrey de Mendoza entre las calles Francisco I. Madero y Lic. Soto Saldaña.

Por otro lado, las dos calles en disposición este a oeste fueron la calle Allende entre las calles Andrés Quintana Roo y Abasolo; como segunda se eligió la calle Antonio Alzate entre las calles García Obeso y Vasco de Quiroga.



Figura 3. Se muestra en un croquis las calles y avenidas que se caminaron con el fin de obtener las mediciones.

Las mediciones fueron realizadas el 24 de julio del 2022, recorriendo los cañones urbanos con equipos HOBO Data Logger (modelo U12-012) registradores de temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa. Para el recorrido se colocaron dos HOBO en cada acera a una altura constante de 1.50 m, haciendo 30 mediciones por cuadra en el recorrido (Figura 4). Para el primer cañón urbano (C. Allende) se hicieron mediciones entre las 14:40 - 14:55 horas; para el segundo cañón urbano (C. Antonio Alzate) se midió entre las 15:01 - 15:16 horas; el tercer cañón urbano (C. Vasco de Quiroga) fue medido entre las 15:20 - 15:35 horas; por último, las mediciones en el cuarto cañón urbano (C. Virrey de Mendoza) fueron entre las 15:38 - 15:53 horas.



Figura 4. Imagen del cañón Vasco de Quiroga e Instrumentos de medición de temperatura cubierto para evitar la incidencia solar directa

Durante las mediciones, se tomaron fotografías térmicas a las superficies de fachadas, banquetas y calles para encontrar los rangos alcanzados, y en qué medida afecta el tipo de material a la elevación de la temperatura ambiente. Las mediciones fueron realizadas con una cámara termográfica por infrarrojos portátil (modelo TOPDON ITC629) (Figura 5). Las fotografías finalmente agrupadas, permitieron la clasificación del tipo de materiales que absorben mayor cantidad de calor y cuáles, en el centro histórico de un clima templado, y cuales benefician a la sensación térmica.

Por último, se hizo una recopilación de las mediciones y se despreciaron datos registrados como el cruce de las calles.



Cámara térmica por infrarrojos portátil  
Rango de temperatura:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Sensibilidad  $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Resolución  $220 \times 160$  pantalla a color de 3,2 pulgadas batería incluida  
Resolución térmica de  $220 * 160$  con un rango de temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$   
5 paletas de colores y 4 modos de medición  
Emisividad ajustable de 0,01 a 1,00 con 4 tipos de modos de medición de objetos  
Amplio campo de visión de  $35 * 26$  grados  
Memoria adicional incorporada de 3GB para un almacenamiento conveniente

Figura 5. Cámara térmica y especificaciones generales

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados del análisis con programa satelital

Al finalizar el procedimiento del análisis con el programa de ArcGIS, se obtuvo que la temperatura superficial de la ciudad de Morelia Michoacán oscila entre los  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La Isla de Calor Urbano más grande fue registrada en el Centro Histórico, y las consecuentes en zonas



de plazas comerciales. Así mismo, las zonas más frías son zonas arboladas como el panteón municipal.

### 3.2 Resultados temperatura ambiental

Los resultados obtenidos por calles quedaron de la siguiente manera, haciendo una síntesis de las mediciones:

La Calle Vasco de Quiroga (Norte a Sur), obtuvo un promedio de temperatura de 29.3 °C, como podemos verlo en la Tabla 1, en esto se considera que dos HOBO estuvieron en la acera de lado este y dos de lado oeste.

Calle	Vasco de Quiroga		
Intervalo	Madero a Saldaña		
Lado	Hora inicio	Hora termino	Temp Prom, °C
E	03:20:00 p. m.	03:35:00 p. m.	30.4
E	03:20:00 p. m.	03:35:00 p. m.	30.5
O	03:20:00 p. m.	03:35:00 p. m.	28.6
O	03:20:00 p. m.	03:35:00 p. m.	27.8
		<b>Promedio:</b>	<b>29.3</b>

Tabla 1. Resultados de mediciones de calle Vasco de Quiroga.

La Calle Virrey de Mendoza (Norte a Sur), obtuvo un promedio de temperatura de 30.87 °C, como podemos verlo en la Tabla 2, en esto se considera que dos HOBO estuvieron en la acera de lado este y dos de lado oeste.

Calle	Virrey de Mendoza		
Intervalo	Madero a Saldaña		
Lado	Hora inicio	Hora termino	Temp Prom, °C
E	03:38:00 p. m.	03:53:30 p. m.	32.49
E	03:38:00 p. m.	03:53:30 p. m.	29.15
O	03:38:00 p. m.	03:53:30 p. m.	32.71
O	03:38:00 p. m.	03:53:30 p. m.	29.12
		<b>Promedio:</b>	<b>30.87</b>

Tabla 2. Resultados de mediciones de calle Virrey de Mendoza.

La Calle Allende (Este a Oeste), obtuvo un promedio de temperatura de 30.02 °C, como podemos verlo en la Tabla 3, en esto se considera que dos HOBO estuvieron en la acera de lado norte y dos de lado sur.

Calle	Allende		
Intervalo	A. Quintana Roo		
Lado	Hora inicio	Hora termino	Temp Prom, °C
N	02:40:00 p. m.	02:55:20 p. m.	30.11
N	02:40:00 p. m.	02:55:20 p. m.	30.11
S	02:40:00 p. m.	02:55:20 p. m.	30.13
S	02:40:00 p. m.	02:55:20 p. m.	29.73
		<b>Promedio:</b>	<b>30.02</b>

Tabla 3. Resultados de mediciones de calle Allende.

La Calle Antonio Alzate (Este a Oeste), obtuvo un promedio de temperatura de 28.99°C, como podemos verlo en la Tabla 4, en esto se considera que dos HOBO estuvieron en la acera de lado norte y dos de lado sur.

Calle	Antonio Alzate			
Intervalo	García Obeso a Vasco de Quiroga			
Lado	Hora inicio	Hora termino	Temp Prom, °C	
N	03:01:00 p. m.	03:16:20 p. m.	29.04	
N	03:01:00 p. m.	03:16:20 p. m.	28.95	
S	03:01:00 p. m.	03:16:20 p. m.	29.11	
S	03:01:00 p. m.	03:16:20 p. m.	28.85	
		<b>Promedio:</b>	<b>28.99</b>	

Tabla 4. Resultados de mediciones de calle Antonio Alzate.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las mediciones en campo de temperatura de los cañones urbanos del centro histórico, se pudo demostrar que las temperaturas son menores en las calles de este a oeste, con una diferencia de temperatura máxima con las calles norte a sur de 2°C aproximadamente (Figura 6), donde se muestran los promedios de temperatura por calle. Es importante aclarar que se están tomando los resultados ya considerando lo arrojado por los cuatro equipos.

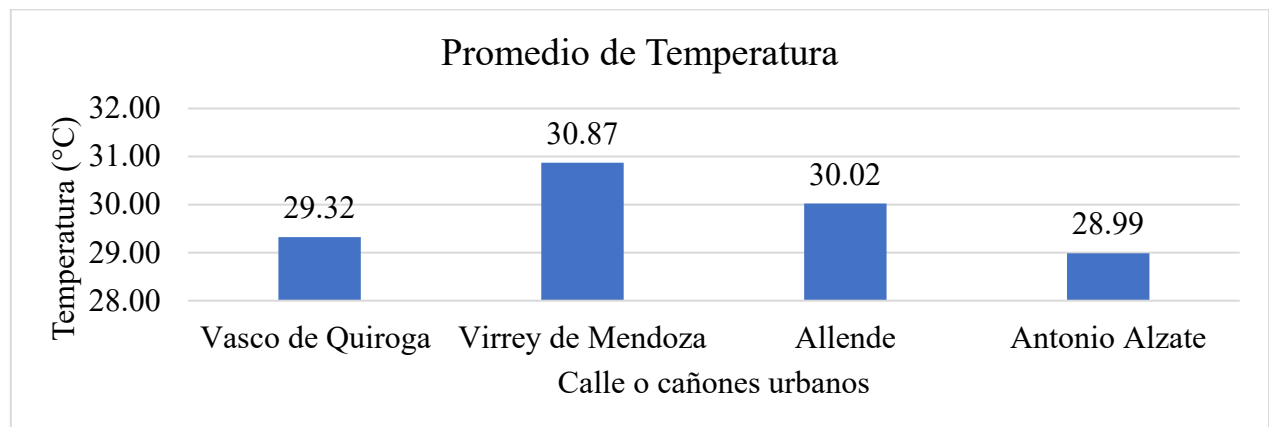


Figura 6. Gráfica de promedios de temperatura de los cañones urbanos

### 3.3 Resultados temperatura superficial

Las calles del centro histórico están compuestas por adoquines, material pétreo que por su consistencia y color tiende a calentarse por la incidencia solar. La toma de temperatura con la cámara térmica arrojó que se tuvo una variación de temperatura superficial en el adoquín entre los 36.7°C y los 59.9°C en las calles de norte a sur; una de las mediciones podemos verla en la Figura 7 donde se muestra un ejemplo de los valores obtenidos en la investigación de campo.



Figura 7. Se muestran las temperaturas superficiales del cañón urbano Virrey de Mendoza.

Por otro lado, las fachadas de los edificios históricos hechos de cantera rosa arrojaron un rango de temperatura en calles norte a sur entre los 30.9°C y 35.2°C, demostrando que la piedra de cantera no eleva demasiado su temperatura a pesar de tener una incidencia solar directa durante el día, como podemos verlo en la Figura 8.



Figura 8. Foto térmica de una fachada de la calle Virrey de Mendoza, orientada hacia el oeste en el centro histórico de la ciudad de Morelia.

Con el fin de complementar y tener un mayor margen de obtención de datos, se tomaron mediciones en dos cañones urbanos en disposición norte a sur, el primero ya mencionado anteriormente, y el segundo que fue la calle Vasco de Quiroga como lo vemos en la Figura 9.

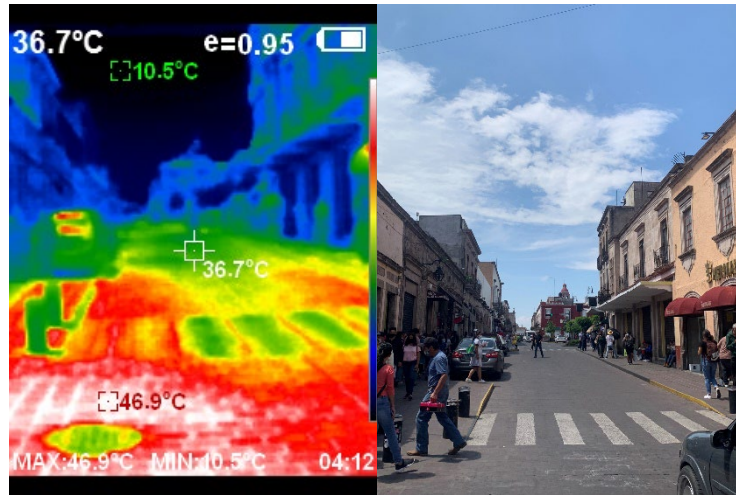


Figura 9. Resultado de toma de temperatura en cañón urbano Vasco de Quiroga

Así mismo, las mediciones se tomaron en las fachadas de piedra de cantera, pero con el fin de tener un mejor estudio, se tomó en este caso en una fachada con talavera de barro, arrojando los valores que vemos en la figura 10.

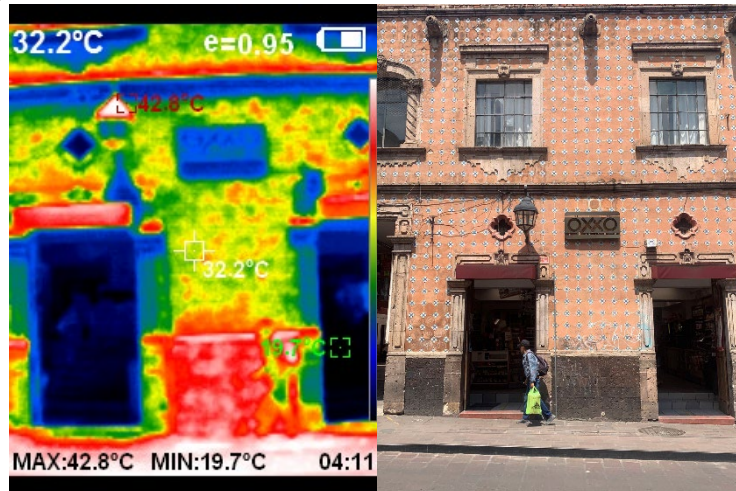


Figura 10. Fachada con talavera de barro en cañón urbano Vasco de Quiroga, orientado hacia el oeste.

En las calles con dirección este a oeste las mediciones arrojaron un rango de temperatura menor a los alcanzados en las dispuesta en norte a sur; en las calles de este a oeste se obtuvo un rango de temperatura en el adoquín entre los 40.8°C y los 57.5°C, lo que demuestra que es el material que más calor absorbe. Como podemos ver en la figura 11 de la calle Allende, donde se tuvo las temperaturas más altas bajas de las mediciones.

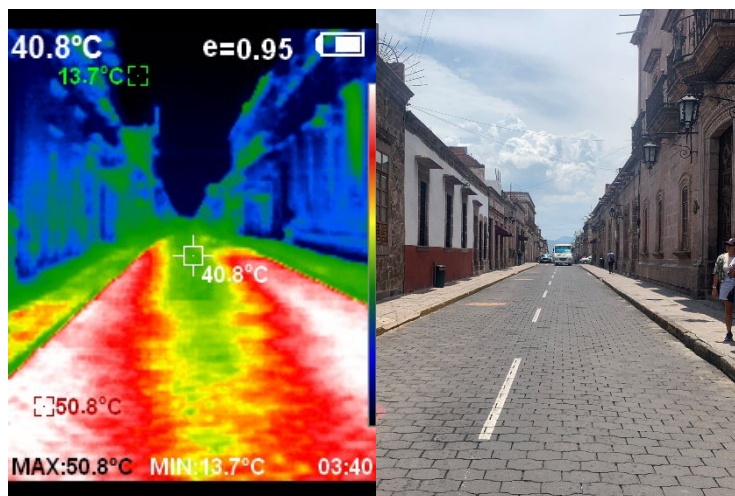


Figura 11. Resultados de toma de temperatura superficial en la calle Allende, enfocado hacia los adoquines.

Por otro lado, las fachadas de los edificios históricos hechos de cantera rosa arrojaron un rango de temperatura en calles este a oeste entre los 28.3°C y 32.2°C demostrando que la piedra de cantera no eleva demasiado su temperatura a pesar de tener una incidencia solar directa durante el día, como podemos verlo en la Figura 12.



Figura 12. Resultados de obtención de toma de temperatura superficial en fachada de edificio en calle Allende, con orientación al sur.

Con el fin de complementar y tener un mayor margen de obtención de datos, se tomaron mediciones en dos cañones urbanos en disposición este a oeste, el primero ya mencionado anteriormente, y el segundo que fue la calle Antonio Alzate como lo vemos en la Figura 13.



Figura 13. Resultado de medición en calle Antonio Alzate.

Por último, los resultados de las mediciones arrojadas por la investigación en la calle Antonio Alzate, enfocado a las fachadas de edificios hechos con cantera rosa son los mostrados en la Figura 14.



Figura 14. Alzate

#### 4. CONCLUSIONES

Resulta relevante mencionar que las investigaciones de campo sobre los temas de temperatura en las ciudades tienen gran importancia en el mundo actual, debido a que este tipo de mediciones aportan información sobre el cambio climático, y cómo esto afecta en la vida cotidiana. Teniendo el conocimiento de las variaciones de temperatura, podemos hacer una proyección de futuros cambios, además de crear acciones en favor del confort espacial para poder asistir al ser humano en sus actividades regulares.

Se puede llegar a la conclusión que las características del Centro Histórico de Morelia, Michoacán hacen que se necesite una mayor intervención sobre las calles con orientación norte a sur, destacando que a pesar de estar construido con materiales de un gran espesor, la piedra rosa de cantera no eleva su temperatura superficial en cantidades excesivas, por lo que las medidas a tomar en consideración van más enfocadas a las zonas peatonales, donde las temperaturas están haciendo de las calles una zona incómoda.

Investigaciones como la presentada actualmente pueden y deberán ser tomadas para la propuesta de soluciones al alza de temperaturas de los cañones urbanos, y así contribuir a la mejora de la temperatura ambiental en las ciudades.

La carencia de vegetación en el centro histórico también causa un efecto relevante en el aumento de temperatura, de los cañones urbanos analizados ninguno contaba con vegetación en las zonas peatonales, por lo que la incidencia solar es permanente durante todo el día. Este fenómeno se replica en la gran mayor parte de calles en el centro histórico, lo que favorece a tener temperaturas más elevadas, el calor se encierra dentro de los cañones urbanos y no hay elementos que contrarresten esta temperatura, por lo que tenemos un calentamiento excesivo en fachas y principalmente en el adoquín de las aceras y calles.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También agradecen el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, así como al Dr. Wilfrido Martínez Molina y la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán quienes me brindaron los conocimientos y equipo necesario para hacer posible la investigación. Se hace un especial agradecimiento a la Dra. Ruth María Grajeda Rosado, quien, con su vasto conocimiento e interés, hizo un seguimiento y asesoría para que el marco metodológico de este trabajo pudiese dar resultados. Así mismo, el Mtro. Max Mondragón Olán quién aportó sus conocimientos y asesoramiento para dar seguimiento a las actividades. Ambos en respaldo de la Universidad Veracruzana, la más grande casa de estudios del estado de Veracruz y a quienes les debo agradecer por mi extensa formación académica, y por último, pero no menos importante, al Programa Delfín del Verano de la Investigación.

## 6. REFERENCIAS

- Akbari, H., S., M. & A., R. (2009). *Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2*. Climatic change, 94(3), pp. 275-286.
- Bustamante, A. S. (2017). *Caracterización de la isla de calor urbana por efectos de la morfología en la ciudad andina de Cuenca*, Ecuador. Master's Thesis, Issue <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27976>, p. 21.
- García Nevado, E. (2019). *Termografía del cañón urbano: uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle*. Tesis Doctoral, UPC, Issue <http://hdl.handle.net/2117/132766>, p. 312.
- Gartland, L. M. (2008). *Heat Islands, Understandign and mitigatin heat in urban areas*. New York: Earthscan from Routledge.
- Madrigal-Uribe, D., Morales-Méndez, C. & Gonzalez-Becerril, L. (2007). *Isla de calor en Toluca, México*. CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 14(3), pp. 307-3016.
- Mercado, L. & Marincic, I. (2017). *Morfología de Isla de Calor Urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable*. Biotecnia, Volumen 19, pp. 27-33.
- Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climate*. New York: Taylor & Francis Group: Routledge.
- Rosas, M. & Garcia, V., 2014. *La influencia de la configuración de los cañones urbanos en el confort del peatón*. Nova scientia, 6(11), pp. 228-253.
- USGS (2022). *United States Geological Survey*. [En línea] Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-757-MX  
pp. 82 – 90



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Evaluación del comportamiento higrotérmico en cañones urbanos históricos en relación con la orientación en un clima templado

J. Saucedo<sup>1\*</sup>, R. Grajeda<sup>1</sup>, M. Mondragon<sup>1</sup>, H. Chavez<sup>2</sup>, P. Cano<sup>1</sup>, E. Chavez<sup>1</sup>, A. Sanchez<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [zs19001613@estudiantes.uv.mx](mailto:zs19001613@estudiantes.uv.mx)

<sup>1</sup> Programa Arquitectura, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Veracruz, Veracruz, México.

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.

<sup>3</sup> Posgrado de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.

### RESUMEN

El documento tiene por objetivo analizar cómo afecta la orientación (N-S y E-O) de los cañones urbanos en un clima templado a la temperatura y humedad relativa urbana, mediante la selección de diferentes calles con la misma altura, sistema constructivo y ancho variando solamente la alineación, en un clima templado. Los resultados registrados presentan que la mayor temperatura es en las calles con orientación Norte – Sur, siendo la mayor diferencia de 2 °C en comparación con las calles de Este - Oeste. Este estudio puede ayudar a los urbanistas a prevenir en los cañones dichas problemáticas, gracias a un diseño que contemple vegetación o ampliar los aspectos geométricos (anchos de calle) para ingreso del viento.

**Palabras clave:** urbanismo, perfil térmico, mediciones en campo



## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que con el paso del tiempo ha demostrado que su incremento altera el comportamiento del clima y con ello, afectando el balance en los ambientes naturales y los artificiales creados por el hombre. Es por ello la arquitectura y la ingeniería civil desde sus conocimientos teóricos y prácticos debe intervenir para ayudar a minimizar lo que conlleva estas elevaciones de temperatura. En el siguiente estudio se analizan las temperaturas del centro histórico de un clima templado, porque es uno de los sitios más transitados de manera peatonal.

El concepto de centro histórico es muy reciente y surge en la década de los años 1960. Ya existía una noción y conciencia del monumento aislado, relacionada a los altos valores de determinadas edificaciones emblemáticas, que destacaban como hitos dentro del paisaje urbano, expresados estos intereses en la Carta de Atenas de 1931, donde se plantea que el uso de los monumentos debe garantizar la continuidad de su existencia, planteándose acciones de restauración que no perjudiquen los estilos de ninguna época. Se acepta el empleo de nuevos materiales, pero se recomienda que sean disimulados, a manera de no alterar el carácter del edificio. (Alomá, 2008)

Los centros históricos son la parte más antigua de cualquier ciudad, representan las primeras construcciones de su fundación e incluyen espacios donde se ubican los principales mercados, comercios, oficinas públicas y casas de las familias fundadoras. Estos espacios representan lo que en alguna época de la historia no solo fue el corazón mismo de las ciudades si no toda su extensión. (Sánchez & Terrazas Juárez, s.f.).

El cañón urbano, conocido como calle, el cual su forma geométrica contiene, un ancho (W), alto (H) y longitud (L) es un lugar flanqueado por edificios a ambos lados creando un entorno similar a un cañón, el cual algunos expertos consideran que puede ser tomado como un punto de análisis referencial microurbano para los entornos macrourbano de la misma ciudad (Stromann-Andersen & Sattrup, 2011); sobre todo, estos análisis pueden referirse a los centros históricos que son altamente concurridos de manera peatonal y vehicular, por lo que el calor antropogénico altera y genera sensaciones térmicas altas en la población (Santamouris, et al., 2011).

El fenómeno ligado a estas sensaciones térmicas es la Isla de Calor Urbano (ICU) el cual se manifiesta como la diferenciación entre las temperaturas dentro de los entornos urbanos, teniendo los puntos más álgidos en el centro de las ciudades (Li, et al., 2018). Una Isla de Calor Urbano es el fenómeno térmico que ocurre cuando una ciudad experimenta temperaturas más elevadas que las zonas rurales circundantes. (Perrozzi, 2021). Esto llega a ocurrir debido a los materiales de construcción en pavimentos o estructuras, así como la altura y la cercanía de los edificios que evita el paso de las corrientes de aire en las zonas, no presentan áreas verdes cercanas y la energía que se encuentra trabajando diariamente dentro de la calle mediante el público en general y automóviles que transitan o utilizan el espacio de manera consecutiva.

Es importante destacar que la isla de calor puede llegar a afectar negativamente a la salud de las personas y del planeta, puesto que se han registrado incrementos en la temperatura de las ciudades, llegando a surgir enfermedades con causa de muerte debido a las altas temperaturas que no se presentaban en muchos lugares.

La ICU se analiza de manera horizontal como ICU Atmosférica y ICU Artificial. La primera, la temperatura ambiental, es aquella que logramos sentir a través de nuestro cuerpo, que al mismo tiempo puede tomarse con diferentes aparatos térmicos analizándola a una altura de dosel (aproximadamente de 1.5 a 3.0 m) a través de mediciones en sitio, y la segunda es aquella que presentan los materiales de construcción, en este caso de estudio, para la ciudad de Morelia, Michoacán, México, la cantera rosa, adoquín y concreto, que puede detectarse con ayuda de cámaras térmicas, por citar un ejemplo.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología consistió previamente en la selección del análisis de sitio gracias a la elaboración de mapas térmicos, posteriormente se hizo un recorrido tipo transecto para la medición de las temperaturas a 1.5 m de altura del suelo mediante equipos dotados con sensores para medir temperatura ( $T$  °C) y humedad relativa (HR %). Con esto se llevó un análisis estadístico para determinar el comportamiento mediante gráficas y así ubicar los cañones que muestran temperaturas más elevadas que otros, y presentar soluciones ante estas situaciones para ayudar a la población.

### 2.1 Análisis de sitio

El municipio de Morelia es la capital del estado de Michoacán, se localiza en la región norte de dicho estado. Se encuentra entre las coordenadas  $19^{\circ} 42' 10''$  latitud norte y entre  $101^{\circ} 11' 32''$  longitud oeste. Territorialmente limita en la zona norte con los municipios de Tarímbaro, Chucándiro y Huaniqueo, al este con Charo y Tzitzio, al sur con Villa Madero y Acuitzio, finalmente en el oeste limita con los municipios de Lagunillas, Coeneo, Tzintzuntzan y Quiroga. El INEGI informó que el municipio de Morelia en el 2010, contaba con 729,757 habitantes, volviéndose la ciudad más poblada y extensa del estado de Michoacán. (Municipios, 2020)

Además, la ciudad guarda un gran número de edificios catalogados como arquitectónicos de gran importancia e históricos que representan no solo a la ciudad, a nuestro país frente al mundo. Es por lo que gracias a lo relevante de sus construcciones de los siglos XVI, XVII y XVIII y a los sucesos históricos ahí desarrollados, el centro histórico de Morelia fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1991.

Asimismo, Morelia es considerada como una de las urbes más representativas del periodo virreinal de México, así como Guanajuato, Puebla y Mérida, identificada de la época por la gran cantidad de edificios del centro histórico construidas con materiales de cantera rosa, por su acueducto, plazas, templos y conventos, y lo más importante, su catedral.

Morelia también es la ciudad más importante del estado de Michoacán desde el punto social, político, económico, educativo y cultural. En el ámbito de la educación, la urbe alberga la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Nicolaíta), una de las universidades más importantes de México y la primera institución de educación de nivel superior del continente americano, lo que la vuelve una de las universidades históricas más antiguas de nuestro país formando estudiantes de carácter para ser profesionistas del mañana.

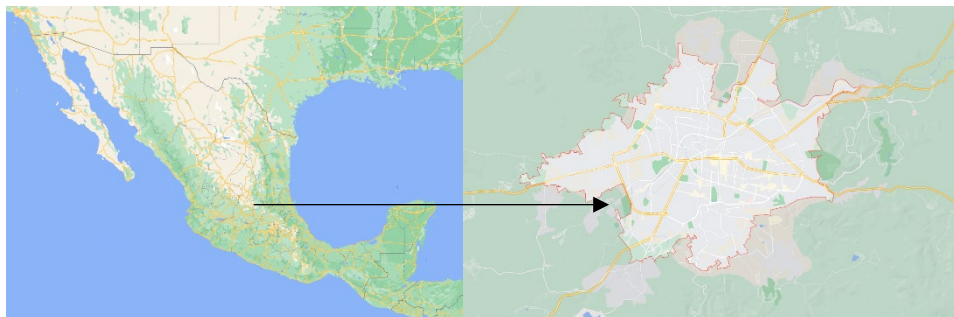


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio

## 2.2 Mapa térmico

La investigación está dirigida hacia el análisis en la temperatura ambiente, sin embargo, la selección de la ubicación se basó previamente con los resultados encontrados por los mapas térmicos superficiales de la ciudad de Morelia.

El análisis térmico del centro histórico, se obtuvo gracias a la información del satélite LandSat 8, el cual a través de las coordenadas establecidas dentro de la página oficial permite obtener información como datos geológicos, humedad, temperatura e inclusive con un procesamiento adecuado el porcentaje de vegetación, generando trabajos como los de Tomlinson (2011), Anderson (2012) y Mia (2012).

La información, es procesada a través del ArcGIS, qué es un sistema de información geográfica, la cual permite administrar, manipular, editar y analizar dicha información creando Datos geográficos con digitalización asistida, automatizar procesos, mapear y controlar datos de salida (ArcGis, s.f.). Por tanto, a través de un proceso de ecuaciones y selección de datos específicos en relación con Morelia dentro del programa ArcGis, el mapa térmico de la ciudad permitió observar con un rango de colores las temperaturas del sitio, dividiendo la ciudad en zonas cálidas (rojo) hasta las más frescas (azul), descubriendo que de las zonas con mayor temperatura era el centro histórico de la ciudad, por lo cual fue tomado para la investigación (Figura 2).

La imagen térmica seleccionada fue del periodo cálido, durante el mes de agosto del año 2021; donde se seleccionó la imagen con menor nubosidad.

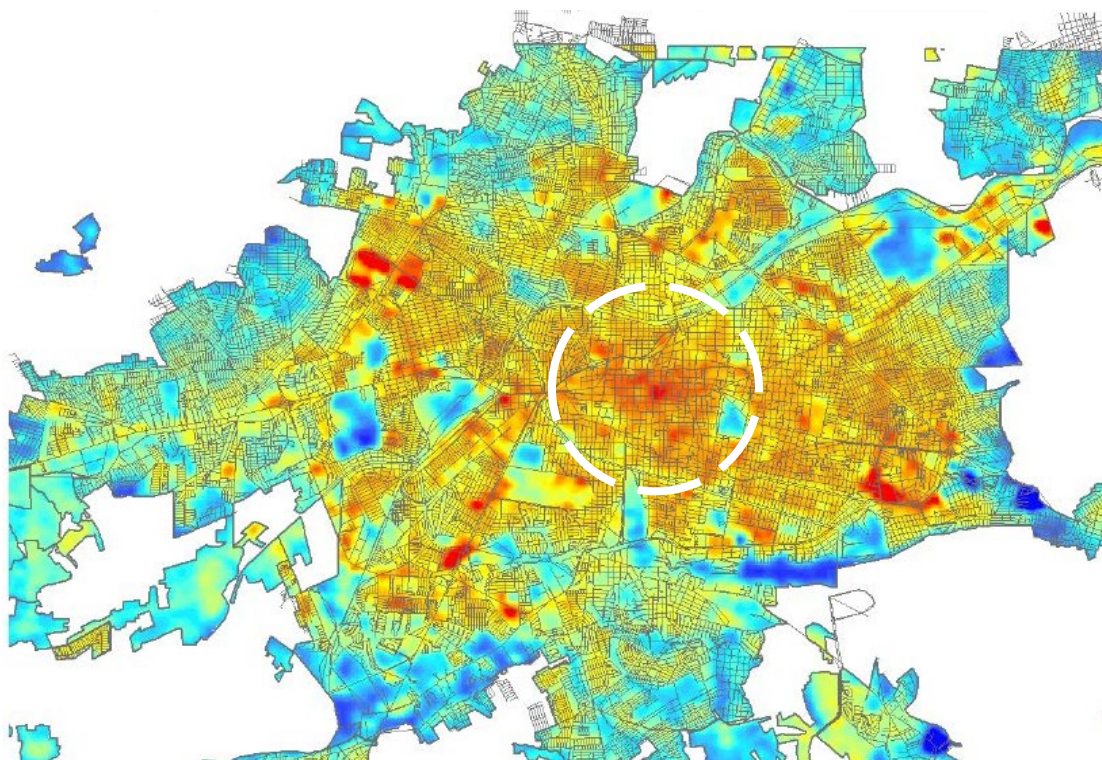


Figura 2. Imagen térmica de la ciudad de Morelia, Michoacán, México

## 2.3 Selección de transectos

Los cañones urbanos seleccionados para realizar el estudio de las temperaturas fueron cuatro, comprendidos dentro del primer sector de la ciudad (Figura 3) los cuales fueron recorridos durante el 24 de julio del 2022, para obtener una medición adecuada por transectos se recorrieron tres cuadras de cada uno, dando un total de 12 cuadras analizadas.

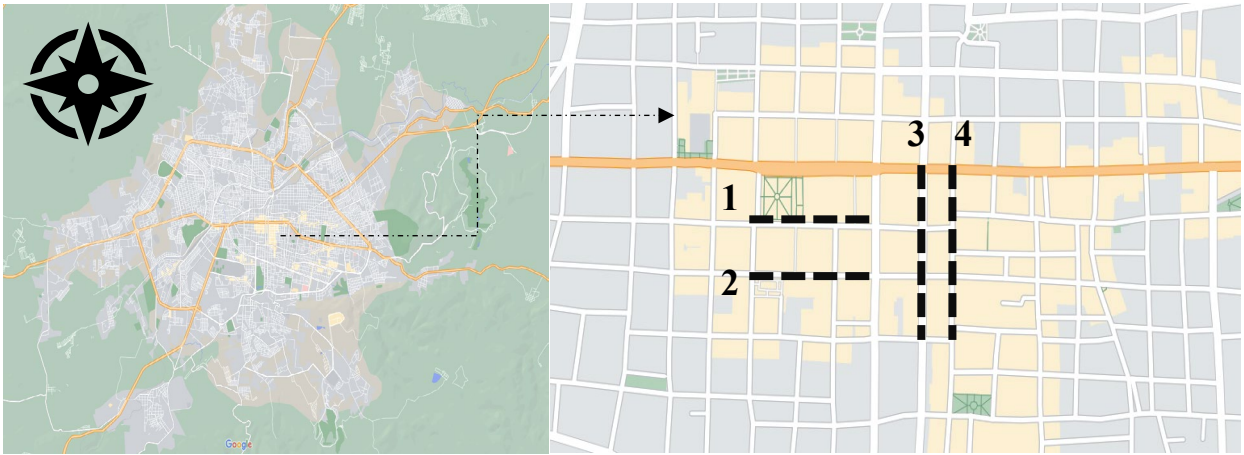


Figura 3. Ubicación de Transectos

La descripción de las calles se muestra a continuación:

1. Calle Allende, con orientación Este – Oeste, comprendida entre la Calle de Abasolo y Av. Morelos Sur, cerca de la Plaza de Armas y las catedrales principales de la ciudad, además en este transecto se encuentra ubicado un área verde (Figura 4a).
2. Calle La Corregidora, con orientación Este – Oeste, comprendida entre la Calle de Abasolo y Av. Morelos Sur, delimitada por construcciones de 1 a 2 niveles sin ninguna área verde (Figura 4b).
3. Calle Virrey de Mendoza con orientación Norte – Sur, comprendida ente la Av. Francisco y Calle Soto Saldaña, delimitada por construcciones de 1 a 2 niveles, sin ninguna área verde (Figura 4c).
4. Calle Vasco de Quiroga con orientación Norte – Sur, comprendida ente la Av. Francisco y Calle Soto Saldaña, delimitada por construcciones de 1 a 2 niveles, pero con un área verde correspondiente a la Plaza de Valladolid (Figura 4d).

Cabe mencionar que la disposición urbana de las cuadras es de traza ortogonal; las construcciones del centro histórico manejan materiales pétreos, como la cantera de color rosa, tradicional de la región; y su el pavimento es tipo empedrado, mayormente en adoquín, cantera rosa, y concreto.



Figura 4. Fotografías del transecto 1 (4a), 2 (4b), 3 (4c) y 4 (4d) respectivamente

Las mediciones fueron realizadas en el mismo día para tener un punto de comparación estuvieron comprendidas en un horario entre las 14:00 y 15:00 horas. Las primera calles medidas fueron las de orientación Este – Oeste, C. Allende y C. Corregidora, seguidas por Norte – Sur, C. Vasco de Quiroga y por último C. Virrey de Mendoza, cada una en un lapso de 15 minutos. El total de

mediciones por cuadra transecto fueron 30 datos, generando un total de 120 datos para comparar y evaluar.

## 2.4 Equipos

Para obtener resultados de campo que eran esenciales para las comparaciones entre las calles se utilizaron cinco equipos, una cámara térmica que permite obtener fotografías a escala de colores de materiales con la temperatura ambiente en la que se encuentra, y cuatro Hobo Data Logger (Tabla 1) que tiene sensores térmicos de temperatura, humedad y luxes, que son programadas para las necesidades de las mediciones “in situ” que en este caso fue en un intervalo de 5 minutos, entre cada medición. Para asegurar las mediciones se utilizaron dos equipos al mismo tiempo y fueron protegidos de la radiación directa para no alterar los resultados (Figura 5).

Ficha técnica del equipo HOBO Temperature Relative Humidity Data Logger U12-012 para TBS y HR (Onset, 2018)


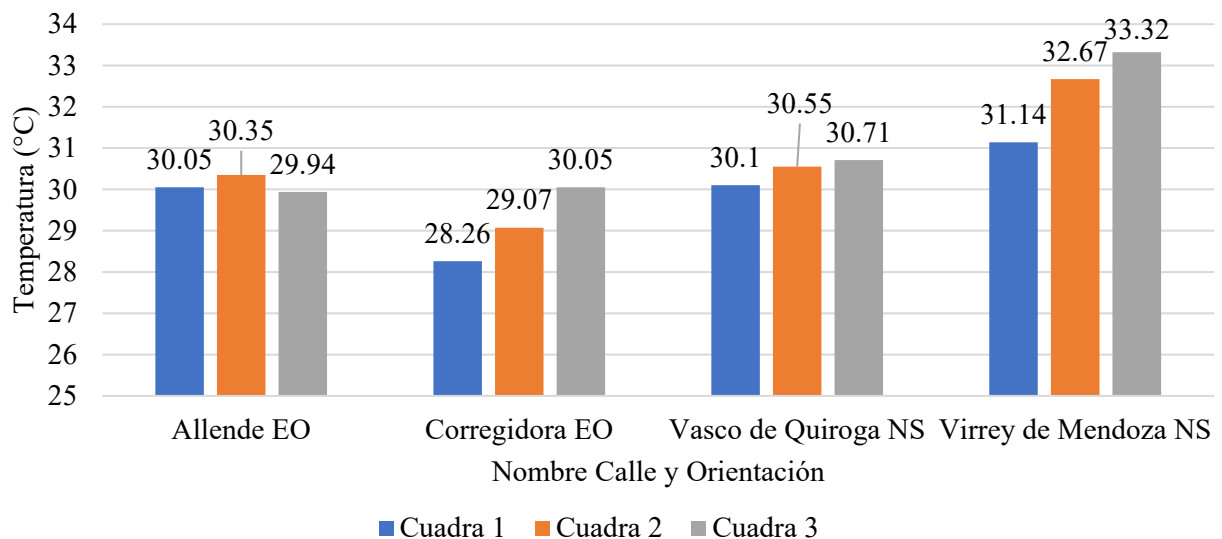
	Measurement range	-20° to 70°C (-4° to 158°F)
	Accuracy	± 0.53°C from 0° to 50°C (± 0.95°F from 32° to 122°F)
	Resolution	0.14°C at 25°C (0.25°F at 77°F)
	Drift	0.1°C/year (0.2°F/year)
	Response time	10 minutes in airflow of 1 m/s (2.2 mph), typical to 90%
	Time accuracy	Approximately ± 1 minute per month at 25°C (77°F)
	Operating range	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing)
	Battery life	One year typical use
	Memory	Memory 64K bytes (52,000 10-bit measurements)
	Weight	26 g (0.82 oz)
	Dimensions	45 x 60 x 20 mm (1.8 x 2.38 x 0.77 inches)
	The U-Series logger requires an Onset-supplied USB interface cable to connect to the computer. If possible, avoid connecting at temperatures below 0°C (32°F) or above 50°C (122°F).	



Figura 5. Mediciones in situ

### 3. RESULTADOS

Las mediciones de los cuatro cañones urbanos C. Allende, Corregidora, Vasco de Quiroga y Virrey de Mendoza ubicadas dentro del centro histórico de Morelia, Michoacán se observó que la orientación de las calles guarda relación con la temperatura ambiente de cada una de ellas, presenciando que las calles Vasco de Quiroga y Virrey de Mendoza con dirección Norte - Sur presentan temperaturas más altas que las calles Allende y Corregidora con dirección Este - Oeste, con una diferencia de 2°C en promedio más alto (Figura 6). Además, la calles Este – Oeste, tuvieron la circunstancia de presentar en la calle central la temperatura mayor.



Como muestra la Figura 7, el transecto con mayor temperatura fue el de la C. Virrey de Mendoza, que al final en su configuración, además de mantener un afluente vehicular constante, es la calle más angosta.

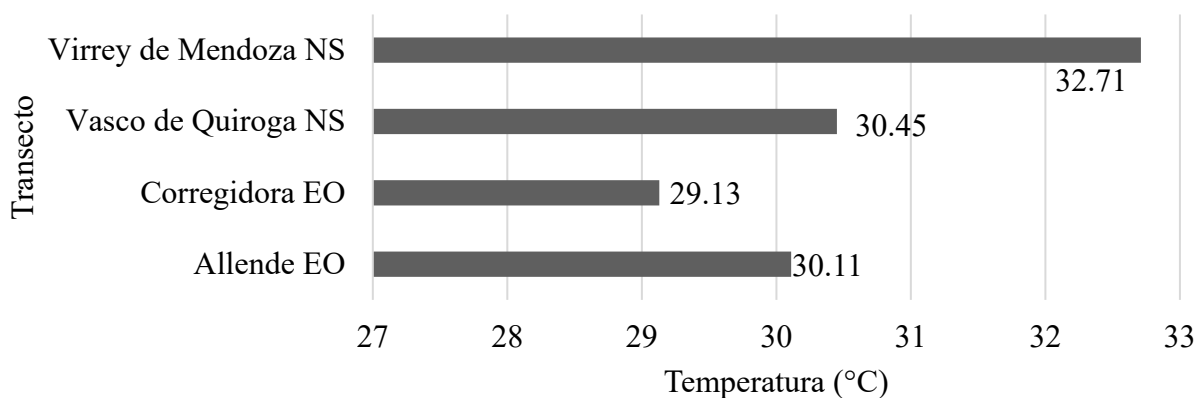


Figura 6. Temperatura promedio general por transecto

#### 4. CONCLUSIONES

La orientación de los cañones ha resultado en el beneficio de temperatura para las calles que se encuentran en dirección Este - Oeste, puesto que dentro de las mediciones se muestran resultados de entre 27°C y 33°C, también debido al tránsito de las personas y automóviles por esa calle. No obstante, el trayecto solar permite a la calle variar la temperatura en toda su longitud, mientras que la calles con dirección Norte - Sur se mantienen mucho más calientes por el tiempo que el Sol permanece justo sobre las calles a en un promedio de 4 horas, de 11:00 a 15:00 horas.

Las calles Allende y Corregidora (dirección Este - Oeste) aún mantienen temperaturas altas con un promedio de 30°C, por lo que resulta no confortable para las personas transitar por ellas, representando una alerta ante los investigadores, urbanistas, ingenieros y arquitectos para con presentar soluciones ante estas situaciones que pueden agravarse con el paso del tiempo.

Como recomendación se propone la colocación de vegetación a cierta distancia por el trayecto de las calles con árboles o arbustos aptos para el sitio, beneficiando tanto la sensación térmica como al cambio climático, ayudando a atrapar al CO<sup>2</sup> del ambiente y liberando oxígeno para evitar altos niveles de contaminación.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo financiero de CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. De igual forma, agradezco al soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, y en especial al Dr. Wilfrido Martínez Molida, profesor investigador de la misma.

También, a la Dra. Ruth María Grajeda Rosado profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat de la UV, y al Mtro. Max Mondragón Olán profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat de la UV, por las sugerencias y conocimientos que han dado realce al presente trabajo. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación del programa Delfín, financiado por el Depto. de Movilidad de la Universidad Veracruzana.

#### 6. REFERENCIAS

Anderson, M., Allen, R., Morse, A., Kustas, W. (2012). *Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources*. Remote Sensing of Environment, Volume 122, pp. 50-65.

- ArcGis, (n.d.) *ArcGis Resources*, Available at: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>, [Accessed 2022].
- Li, H. et al. (2018). *A new method to quantify surface urban heat island intensity*. Science of the total environment, Issue 624, pp. 262-272.
- Mia, M., Bromley, C., Fujimitsu, Y. (2012). *Monitoring heat flux using Landsat TM/ETM+ thermal infrared data - A case study at Karapiti ('Craters of the Moon') thermal area, New Zealand*. Journal of Volcanology and Geothermal research, Volume 235, pp. 1-10.
- Municipios (2020). *MunicipiosMx*, Available at: <http://www.municipios.mx/michoacan/morelia/> [Accessed 13 Septiembre 2022].
- Onset (2018). *Hobo Data Loggers Product Catalog*, Available at: <http://www.onsetcomp.com/files/catalog-lr.pdf>
- Perrozzi, A. (2021). *Transecto*, Available at: <https://transecto.com/2021/01/que-son-las-islas-de-calor-urbano/>, [Accessed 13 Septiembre 2022].
- Rodríguez Alomá, Patricia (2008). *El centro histórico: del concepto a la acción integral*. Centro-h, (1),51-64.[fecha de Consulta 15 de Septiembre de 2022]. ISSN: 1390-4361. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=115112534005>
- Sánchez, P. A. R., Terrazas Juárez, A. R., (n.d.), Available at: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icea/n9/e6.html> [Accessed 13 Septiembre 2022].
- Santamouris, M. et al. (2011). *Energy and Climate in the Urban Built Environment: The canyon effect*. London & New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Stromann-Andersen, J., Sattrup, P. (2011). *The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains*. Energy and Buildings, 43(8), pp. 2011-2020.
- Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J. (2011). *Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review*. Meteorological Applications, 18(3), pp. 296-306.





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-761-MX  
pp. CC - 71 - 81



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de la Construcciones

## **Monitoreo térmico en cañones urbanos con clima templado y diferentes relaciones de aspecto en zona histórica de la ciudad de Morelia, Michoacán, México**

F. Lagunes<sup>1\*</sup>, R. Grajeda<sup>1</sup>, M. Mondragón<sup>1</sup>, M. Santos<sup>1</sup>, W. Martínez<sup>2</sup>, H. Chávez<sup>2</sup>, S. Aguello<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [Zs19022038@estudiantes.uv.mx](mailto:Zs19022038@estudiantes.uv.mx)

<sup>1</sup> Programa Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, Veracruz, México

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

### **RESUMEN**

El objetivo de la investigación fue correlacionar la variación de ancho de la calle junto con su aforo vehicular para conocer cómo se modifica la temperatura dentro de los cañones urbanos con la misma orientación, sistema constructivo y altura del centro histórico de Morelia, Michoacán, México. La metodología utilizada fue realizar mediciones "in situ" en un transecto definido, dentro de la zona del centro histórico con un horario de 14:00 y 15:40 horas. Se detectó como resultado que la temperatura menor (3°C de diferencia) corresponde al cañón que cambia de 2 a 3 carriles (E – W) con un aforo de 10 autos /min. Como conclusión se sugieren políticas de movilidad más adecuadas para eficientizar los afluentes vehiculares en esta zona y no generar aglomeraciones en vialidades que se vuelvan un punto crítico de emisiones de calor para la ciudad.

**Palabras clave:** Isla de calor urbano; confort térmico; aforo vehicular.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cañones urbanos son considerados como calles conformadas por edificios a ambos lados, que le otorgan una configuración de cañón (Lipp, 2014), generando en las ciudades, bloques densos de edificaciones los cuales impiden el flujo adecuado de la ventilación. Estos traen como resultado zonas en las cuales se concentran grandes cantidades de contaminantes y las condiciones de temperaturas, calidad de aire, luz y viento van variando a consecuencia de diferentes relaciones de aspecto que conformen en segmento de calle.

Los cañones se definen por tres parámetros principales: altura máxima de los edificios en el cañón (H), la anchura del cañón (W) y la longitud (L) (Lipp, 2014). Se han demostrado, a lo largo de diversos estudios en la rama, que uno de los problemas primordiales en las ciudades es a causa de cañones urbanos que tienen la capacidad de alterar significativamente sus parámetros de confort térmico. La contaminación del aire urbano depende de la competencia entre los procesos de emisión, que contribuyen a aumentar las concentraciones de contaminantes y los procesos atmosféricos de transporte, dispersión, transformación química de contaminantes y deposición que reducen y/o remueven la contaminación (Dezzutti, 2016).

Dichos espacios no siempre son monótonos, su composición puede variar en el trayecto en que se desarrollan a lo largo de las calles o avenidas que compongan la ciudad; sin embargo, el efecto producido es muy similar y en algunos casos desfavorece o favorece más o menos a las condiciones de cambios térmicos de la zona.

Se han tipificado tres tipos de flujos que dependen de las relaciones entre la altura de los edificios (H) y el ancho del cañón (W), y entre la longitud de la calle (L) y la altura de los edificios (Mazzeo, Venegas, & Martin, 2002). La composición influye significativamente al problema. La variabilidad en sus anchos, alturas, materiales de construcción, flujo vehicular, densidad de población y de más, son algunos de los tantos factores a considerar para un buen monitoreo térmico de un cañón urbano. La capacidad que tengan los contaminantes en dispersarse dentro de estas zonas es lo que podrá dar una idea más clara de cuan crítico es el efecto que se está generando y cuanto riesgo está corriendo el confort de la sociedad que se desenvuelve en la zona.

Esta investigación fue planteada basándose en los aspectos antes mencionados. Se seleccionaron tres calles pertenecientes al centro histórico de la ciudad de Morelia del estado de Michoacán, México; las cuales fueron:

- Calle Allende con transición a Valladolid: de calle García Obeso a calle Vasco de Quiroga
- Calle La Corregidora: de calle Abasolo a calle Andrés Quintana Roo
- Calle de Santiago Tapia: de calle Valentín Gómez Farías a calle Carlos Salazar

Las tres calles fueron analizadas por tres cuadras en las cuales se buscaron que tuvieran similitudes específicas, como edificaciones de casa habitación/ vivienda o local comercial, alturas de no más de dos niveles, orientación de Este – Oeste, cambio de ancho en sus carriles, densidad alta de peatones y tráfico vehicular.

Lo particular de la investigación radica en sugerir políticas de movilidad más adecuadas para eficientizar los afluentes vehiculares en la zona y no generar aglomeraciones en vialidades que se vuelvan un punto crítico de emisiones de calor para la ciudad.

## 2. METODOLOGÍA

Para determinar el monitoreo de estas temperaturas, se hizo un análisis previo del área a intervenir; con la intención de generar resultados específicos de las zonas en cuestión.

### 2.1 Análisis del sitio seleccionado

De arquitectura ecléctica, que incorpora el barroco y el neoclásico, Morelia alberga los edificios más bellos de la región centro-occidente del país, y por esos tesoros, así como por su historia, costumbres y tradiciones, ha sido considerada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la Unesco. (García, 2014)

Morelia, capital del estado de Michoacán, una de las ciudades que refleja en su esplendor, la virtuosidad de una traza urbana española ejemplo. Esta, cuenta con una regularidad estricta en su ortogonalidad; sitúa en el primer cuadro de esta, a la Catedral Metropolitana de Morelia, sobre la cual, pareciera que gira la ciudad. Es uno de los destinos turísticos más bellos e importantes de México por su invaluable patrimonio cultural e histórico.

Esta ciudad está geolocalizada entre los paralelos 19°27'06" y 19°50'12" de latitud norte, y los meridianos 101°01'43" y 101°30'32" de longitud oeste (Figura 1), a una altitud promedio de 1,920 metros sobre el nivel del mar, al norte de Michoacán. El clima predominante en el municipio es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media.



Figura 1. Mapa satelital modificado de Google Earth referenciando la ubicación de la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán, México.

### 2.2 Mapeo térmico

El área térmica que intervenir se delimitó por medio de la búsqueda satelital apoyada en el programa ArcGIS. Este es un sistema de información especializado (GIS en inglés) en el manejo y análisis de información geográfica (geoespacial) (Santiago, 2005), solventado mediante bandas y apoyado en la información que le brinda el satélite LandSat 8. Con ayuda de las coordenadas geográficas del estado, se obtuvieron datos de temperaturas, humedad, vegetación y de más, con los que se logró tener un panorama definido de las zonas más críticas que se podían tomar para la investigación.

Cuando se depuró la información de las bandas B10, B5 Y B4, se descargaron los datos de la zona de Morelia para poder aplicar a la imagen final el RGB (un modo de síntesis aditiva de color compuesto de rojo, verde y azul) que ayudaría a definir las partes más cálidas o frías con una gama de color entre rojo y azul respectivamente.

Terminada esta metodología, se obtuvieron resultados mapeados de la ciudad de Morelia (Figura 2) y con ello fue posible delimitar la zona en la que se trabajarían los monitoreos térmicos a calles de diferentes relaciones de aspecto en zona centro histórico.

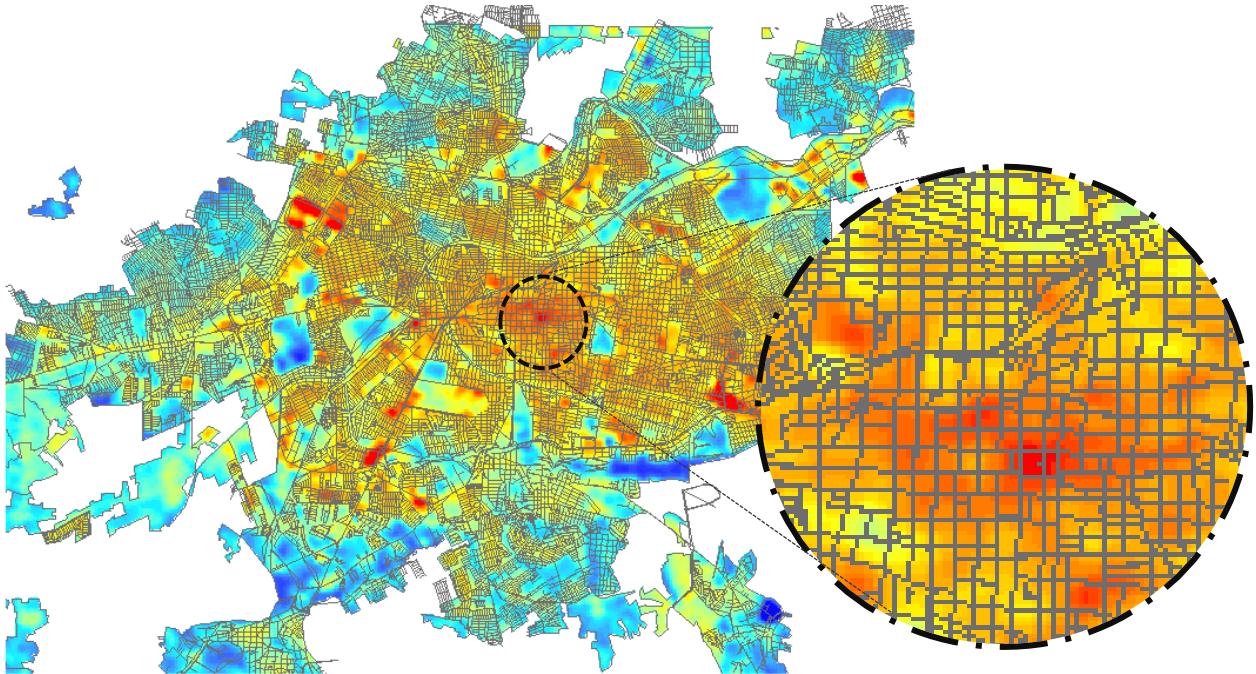


Figura 2. Mapa térmico de la ciudad de Morelia, Michoacán, México enfocado a la zona centro-histórico en donde se observa una incidencia térmica alta

### 2.3 Selección de calles para monitoreo

Para la selección de las calles a las que se les aplicaría la metodología de monitoreo térmico, se colocaron parámetros para regular y delimitar los resultados. Estos parámetros aplicados fueron: diferencias en anchos de calles (cambios de carriles de cuatro a tres, tres a dos y dos a uno), aproximación de alturas de dos niveles en edificaciones que conformaran el cañón, igualdad de sentido en calles (E – W), que los edificios fungieran como casa habitación / vivienda o local comercial y que se encontraran en la zona centro histórico de la ciudad.

En la Figura 3, se observan las calles seleccionadas con respecto a las características ya antes mencionadas.



Figura 3. Imagen satelital de Google Earth en la que se señalan las calles intervenidas

A continuación, se detalla las calles intervenidas (Figura 4).

- 1.- Calle Santiago Tapia comprendida entre Calle Valentín Gómez Farías y Carlos Salazar
- 2.- Calle Valladolid con transición a Allende comprendida entre calle Vasco de Quiroga hacia Obeso
- 3.- Calle Corregidora comprendida entre calle Abasolo y Andrés Quintana Roo

Es importante mencionar que todas las calles seleccionadas tienen una orientación de Este a Oeste. La figura



Figura 4. Vista perspectiva de cada una de las calles desde el punto donde se comenzaban las mediciones, de E – W.

## 2.4 Equipos

En la investigación fueron utilizados diversos equipos de medición con los cuales, por una medición “in situ”, se pudieron recabar datos certeros de temperaturas con lo que se determinaron resultados precisos para dictaminar una conclusión certera.

Primeramente, se comenzaron las mediciones con 4 hobos con sensores de temperatura ambiental y humedad relativa. Estos se encontraban dispuestos 2 en cada perfil circular de madera de aproximadamente 1.5 m de altura sujetos con cinchos y protegidos, en la parte superior, por platos de unicel lo cuales ayudaban a evadir la incidencia solar directa de los hobos (Figura 5).


	Datos
<b>Rango de medición</b>	-20° a 70°C (-4° a 158°F)
<b>Precisión</b>	± 0.53°C desde 0° a 50°C (± 0.95°F desde 32° a 122°F)
<b>Resolución</b>	0.14°C a 25°C (0.25°F at 77°F)
<b>Desviación</b>	0.1 °C/año (0.2°F/año)
<b>Tiempo de respuesta</b>	10 minutos en flujo de aire de 1 m/s (2,2 mph), típico al 90 %
<b>Precisión del tiempo</b>	Aproximadamente ± 1 minuto por mes a 25 °C (77 °F)
<b>Rango de operación</b>	Registro: -20° a 70°C (-4° a 158°F); 0 a 95% HR (sin condensación)
<b>Duración de la batería</b>	Un año de uso típico
<b>Memoria</b>	Memoria 64 K bytes (52 000 mediciones de 10 bits)
<b>Peso</b>	26 g (0,82 onzas)
<b>Dimensiones</b>	45 x 60 x 20 mm <sup>3</sup> (1,8 x 2,38 x 0,77 pulgadas)
<p>El registrador de la serie U requiere un cable de interfaz USB suministrado por Onset para conectarse a la computadora. Si es posible, evitar conectar a temperaturas inferiores a 0 °C (32 °F) o superiores a 50 °C (122 °F).</p>	
	

Figura 5. Ficha técnica de hobo (Onset, 2018) y disposición de equipos en mediciones in situ

Para estas mediciones, en las calles antes mencionadas, se acudió al lugar en un horario de 14:00 a 15:40 horas, en las que 14:00 horas fue el horario de partida por la calle Valladolid esquina Vasco de Quiroga hacia calle García Obeso. Posterior se pasó a calle La Corregidora, de calle Abasolo hacia calle Andrés Quintana Roo. Para terminar a las 15:40 horas se recorrió calle Santiago Tapia de Valentín Gómez Farías hacia calle Calos Salazar.

Estos trayectos fueron controlados por intervalos de tiempo, cada equipo fue programado para realizar una medición cada 10 segundos transcurridos; teniendo así periodos de 15 minutos por calle (tomando en cuenta que fueron seleccionadas 3 cuadras para analizar), 5 minutos por cuadra; compilando 90 datos de mediciones por calle.

Las mediciones con hobo fueron acompañadas por una cámara térmica (Figura 6) con la cual, se obtuvieron las temperaturas superficiales de los materiales que componían dichos trayectos. Estos datos se ven reflejados en fotografías obtenidas por medio de las emisiones de radiación infrarroja de los materiales en cuestión sin la necesidad de tener contacto directo. Las imágenes aportan datos

de temperaturas mínimas y máximas, así como también clasifica por medio de colores (en una escala de azul a rojo) las partes más frías o calientes según sea el caso.

La cámara térmica por infrarrojos portátil tiene un rango de temperatura:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sensibilidad de datos de  $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , resolución  $220 \times 160$  pantalla a color de 3.2, resolución térmica de  $220 \times 160$  con un rango de temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 5 paletas de colores y 4 modos de medición, emisividad ajustable de 0,01 a 1,00 con 4 tipos de modos de medición de objetos, amplio campo de visión de  $35 \times 26$  grados (Figura 6).

Anexo a la toma de temperaturas superficiales y ambientales, también se realizó un aforo por calle, analizando por minuto para conocer la afluencia vehicular reflejada en cada intersección de cuadra; tomando en cuenta que se analizaba un horario de densidad peatonal y vehicular alto, con lo que se podría tomar un dato crítico y representativo de la zona.

Cuando fueron culminadas las mediciones y aforos, los datos de los hobsos fueron vaciados a un documento Excel en el cual se pudieron hacer gráficas que ayudaron a crear una perspectiva de conclusión mucho más visual y con ello comparar los datos de las tres calles analizadas.



Figura 6. Ficha técnica de cámara térmica (Onset, 2018) y disposición de equipos en mediciones in situ

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados de temperaturas ambientales medidas con hobo (cuatro equipos en campo) y afluencia vehicular medida por aforo.

Después de la recolección de los datos adquiridos en las mediciones in situ, se realizaron dos tablas generales por medio del programa Excel, en las que se puede analizar:

- En una (Figura 7) se muestra cómo se comportaron las tres cuadras de las calles seleccionadas unas con otras.
- En la otra (Figura 8) se grafica el promedio de las tres cuadras por cada calle analizada.

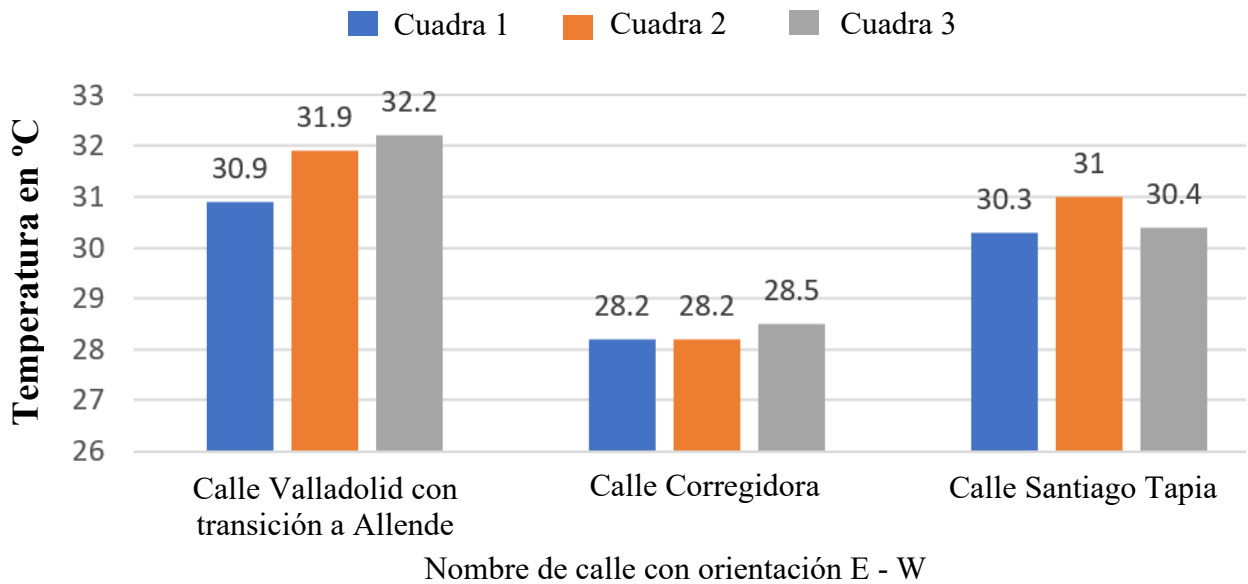


Figura 7. Comportamiento de cuadras por calle.

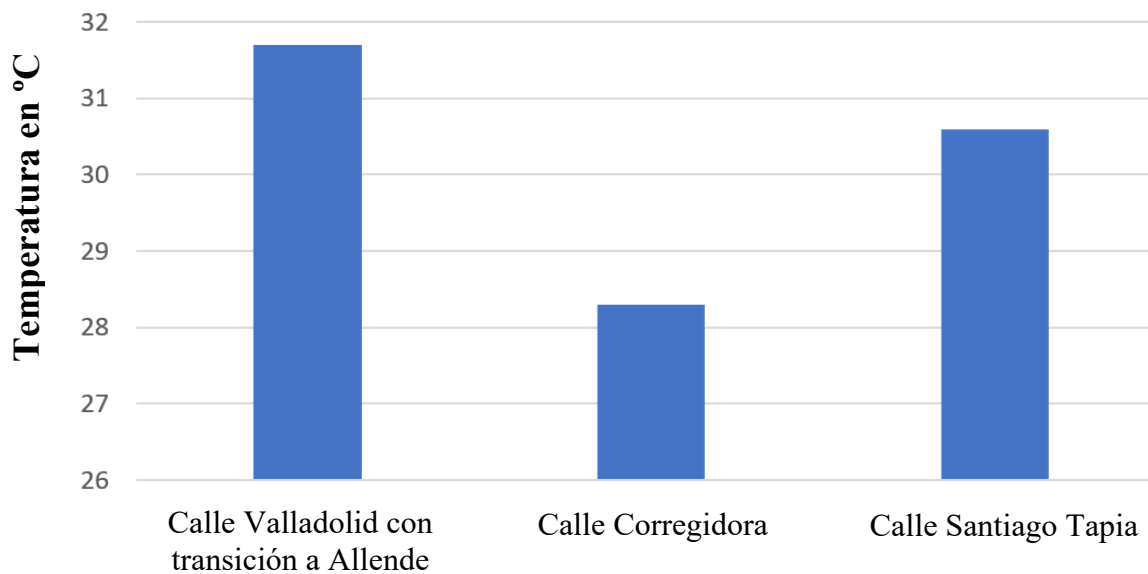


Figura 8. Promedio de cuadras por calle.

Como se observó en los diagramas, las temperaturas ambientales con mayor temperatura se encuentran concentradas en la calle Valladolid con transición a Allende.

Con el gráfico de la figura 7, se hace constatar que el recorrido de la calle con un perfil térmico alto se realizó de calle Vasco de Quiroga a García Obeso. En esta dirección, la calle tiene un cambio en su ancho, disminuye de dos a un carril, generando mayor concentración de tipo automóviles (al menos 20 tipo A y 2 tipo B por ciclo de semáforo de 30 segundos según el aforo vehicular realizado) y una densidad mayor de peatones, lo que provoca que las emisiones de CO<sub>2</sub> tengan mayor dificultad para dispersarse y generen que el confort térmico se desestabilice.



La clasificación de los tipos de auto es mencionada por la Norma Oficial Mexicana, donde informa que los autos tipo A son autos particulares, donde entran toda clase de vehículos clasificados como tal, incluso los mercantes de pasajeros que no exceda los 10 asientos y los Tipo B para autos que no excedan los 10 asientos (NOM, 2017).

La calle Santiago Tapia, aunque su trayecto inicia de tres a cuatro carriles, cuenta con una pequeña fuente en uno de sus cruces y la densidad de peatones no es tan elevada, aun así, su temperatura es elevada con respecto a calle Corregidora. Y esto se da porque, su afluencia vehicular es mayor. En ella se registraron 10 autos/min tipo A y 5 tipo B; mientras que en Santiago tapia circularon 10 autos/min tipo A.

### 3.2 Resultados de temperatura superficial medida con cámara térmica

Por otra parte, en las mediciones que se realizaron con la cámara térmica de las temperaturas de los materiales que se involucraban en la composición de las calles (fachadas de cantera rosa, adoquines y asfalto en pavimentos, materiales en superficie de autos particulares y transporte, etc), se aprecia de igual forma, como la temperatura mayor registrada se encuentra en calle Valladolid transición a Allende (Figura 9) con respecto a calle Corregidora (Figura 10) y calle Santiago Tapia (Figura 11).

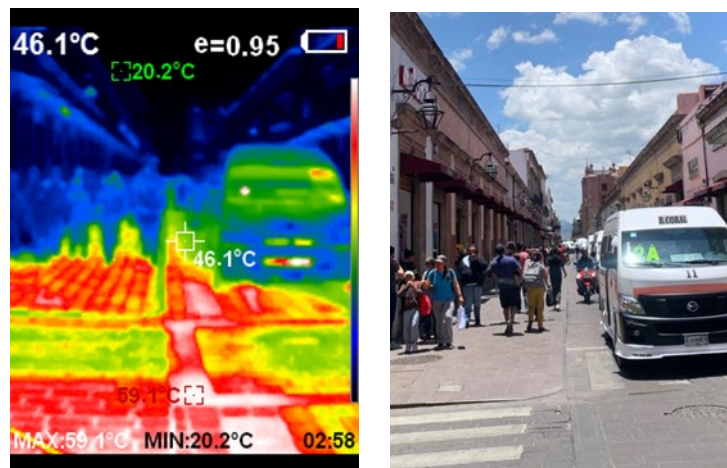


Figura 9. Calle Valladolid Transición Allende

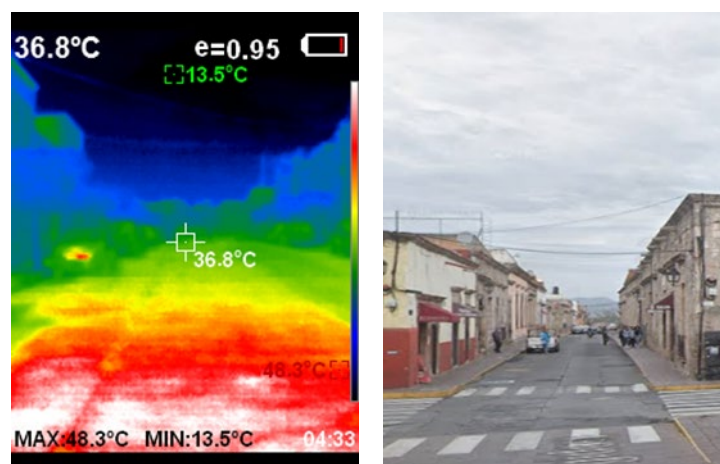


Figura 10. Calle Corregidora

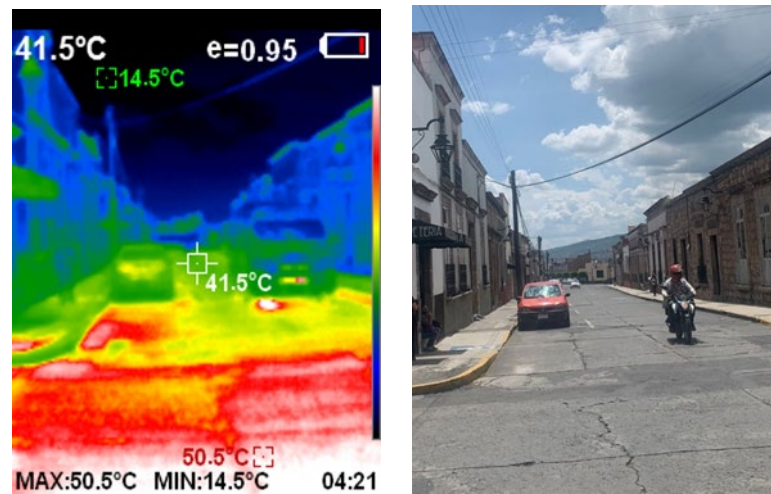


Figura 10. Calle de Santiago Tapia

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos recabados por medio de mediciones en campo, se observó que los cañones urbanos analizados, aun cuando tienen similitudes en alturas, materiales y orientación, los anchos de sus calles provocan un cambio en sus temperaturas de aproximadamente 3 °C. Así como también se comprobó que el aforo vehicular de mayor afluencia logra que el confort térmico se altere y el perfil térmico del cañón urbano sea más cálido.

Esto se resume tomando en cuenta que la calle Valladolid con transición Allende fue una de las que más densidad poblacional y vehicular tenía con respecto a las calles La Corregidora y Santiago Tapia; así mismo fue observado que, al tener una calle estrecha de dos carriles reducido a uno, la concentración prolongada de vehículos provoca que los gases generados aumenten la temperatura, aunado baja disipación de calor y contaminantes si la calle no está a favor de los vientos dominantes.

Las calles de La Corregidora y Santiago Tapia presentaron comportamientos parecidos, con la diferencia que, esta última, al tener un cambio en su ancho, de tres a cuatro carriles, reflejó que la temperatura bajaba entre 2 y 3 °C en su temperatura ambiental y superficial de materiales en fachadas y suelos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero de CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. De igual forma agradecer el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH; al Dr. Wilfrido Martínez Molina, la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, técnicos y maestros en general. A la Universidad Veracruzana y a su departamento de Movilidad por su valioso impulso motivacional y económico para la estancia en la ciudad de Morelia, Michoacán; así como también a sus docentes investigadores, la Dra. Ruth María Grajeda Rosado y el Mtro. Max Mondragón Olán por ser guías fieles de la buena redacción del presente.

## 6. REFERENCIAS

- Dezzutti, M. C. (2016). *Contaminación del aire en cañones*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- García, D. L. (2014). *'La riqueza de Morelia se refleja en sus edificaciones'*. Morelia.
- Lipp, D. (2014). *EL CAÑÓN URBANO. SU INCIDENCIA EN LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE*. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Estudios Geográficos.
- Mazzeo, N. A., Venegas, L. E., & Martin, P. B. (2002). *CONCENTRACIONES DE MONOXIDO DE CARBONO Y EL VIENTO EN UN CAÑÓN URBANO*. Buenos Aires.
- NORMA Oficial Mexicana (NOM) (2017). *NOM-012-SCT-2-2017. Obtenido de Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.:* [https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6890/sct5a12\\_C/sct5a12\\_C.html](https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6890/sct5a12_C/sct5a12_C.html)
- Onset. (2018). *Catalog, Hobo Data Loggers Product*. Obtenido de <http://www.onsetcomp.com/files/catalog-lr.pdf>
- Santiago, I. (2005). *Fundamentos de ArcGis*. Versión Arc View 9.1.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-764-MX  
pp. CC - 102 - 108



X CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Comportamiento físico-mecánico del material fino en mezclas asfálticas densas elaboradas en caliente

M. Arreola Mauleón<sup>1\*</sup>, M. A. Mondragón Ornelas<sup>1</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>1</sup>, H. L. Chávez García<sup>1</sup>, M. A. Villanueva Guzmán<sup>1</sup>, W. Martínez Molina<sup>1</sup>, J. A. Borrego Pérez<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [1579490b@umich.mx](mailto:1579490b@umich.mx)

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

### RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es conocer cómo se comportan las mezclas asfálticas elaboradas con diferentes arenas de la zona centro del estado de Michoacán, por lo cual se elaboraron pastillas con diferentes porcentajes de asfalto para determinar la estabilidad y flujo, y poder identificar la carga que resiste y la deformación que tiene la muestra. El material fino en las mezclas asfálticas de granulometría densa juega un papel muy importante en su comportamiento, debido a que representa entre el 40 al 50 % de su volumen. Considerando que el mejor porcentaje de asfalto es del 5 al 6 %, y un contenido bajo o en exceso provoca menor resistencia. Así mismo, se determina cuál material fino (arena) presenta mejor comportamiento en la mezcla asfáltica, cumpliendo con los requisitos de calidad del material pétreo de la norma N-CMT-4-04-17 y con los parámetros del diseño Marshall de la norma N-CMT-4-05-003-16.

**Palabras clave:** asfaltos; granulometría; finos; estabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo, puede estar constituida mínimo por dos elementos (grava y arena) o por una variedad de acuerdo a su composición granulométrica, además del origen de los materiales; volcánicos, triturados o prefabricados, también se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño; grava, sello, arena y filler. Por lo que es de gran importancia conocer que materiales son los adecuados para la mezcla, es necesario realizar pruebas a los materiales pétreos y asfálticos para conocer su calidad y características.

La mezcla en caliente es elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (¾ in). Durante esta investigación se utilizó grava, sello, arena blanca y arena gris, haciendo énfasis que la arena blanca tiene mayor proporción de finos.

## 2. PROCEDIMIENTO

Se elaboraron pastillas asfálticas de 4” de diámetro y 2.5” de altura por el método Marshall; aplicado para mezclas asfálticas de granulometría densa elaborada en caliente y con una intensidad de tránsito de  $\sum L \leq 10^6$ . De las cuales se obtuvo el contenido óptimo de asfalto a partir de las muestras que mejor cumplían con los parámetros de estabilidad y flujo que nos marca la norma N-CMT-4-05-003-16. A continuación, se describe el proceso realizado para dosificar las mezclas y elaborar las pastillas.

### 2.1 Análisis granulométrico de materiales pétreos

La granulometría permite determinar la composición por tamaños, mediante el paso del material pétreo por una serie de mallas con aberturas determinadas. Se propuso un porcentaje para cada agregado pétreo, donde la suma de todos los agregados pétreos en cada malla debe cumplir con los límites de la Tabla 1 de la norma N-CMT-4-04-17 considerando un tamaño nominal del material pétreo de ¾ in (19 mm).

#### 2.1.1 Contenido mínimo de asfalto

En base al porcentaje que pasa por las diferentes mallas, se determinó el contenido mínimo de asfalto necesario para cubrir las partículas de los agregados pétreos. Sabiendo que a mayor fino se va a requerir mayor asfalto.

### 2.2 Elaboración de pastillas

Partiendo de las cantidades de agregado pétreo (Grava, sello, arena gris y arena blanca, se procede a pesar y calentar los materiales para realizar el mezclado. Iniciando con un contenido mínimo de asfalto de 4 a 6.5% con variación de 0.5%. Una vez hecho esto, se compacta a 50 golpes en cada cara de la muestra en el equipo Marshall, después se deja enfriar la pastilla de 30 a 60 minutos para desmoldar e identificar.



Figura 1. Elaboración de pastillas

### 2.3 Propiedades volumétricas

Se determinan las características y propiedades de las pastillas, midiendo su diámetro, altura, masa, volumen, etc.

### 2.4 Prueba de estabilidad y flujo

Colocamos la pastilla a baño maría a una temperatura de 60° C durante 30 a 40 minutos, posteriormente se coloca en la prensa Marshall y se le aplica carga hasta fallar, registrando la carga máxima y la deformación en el punto de falla.

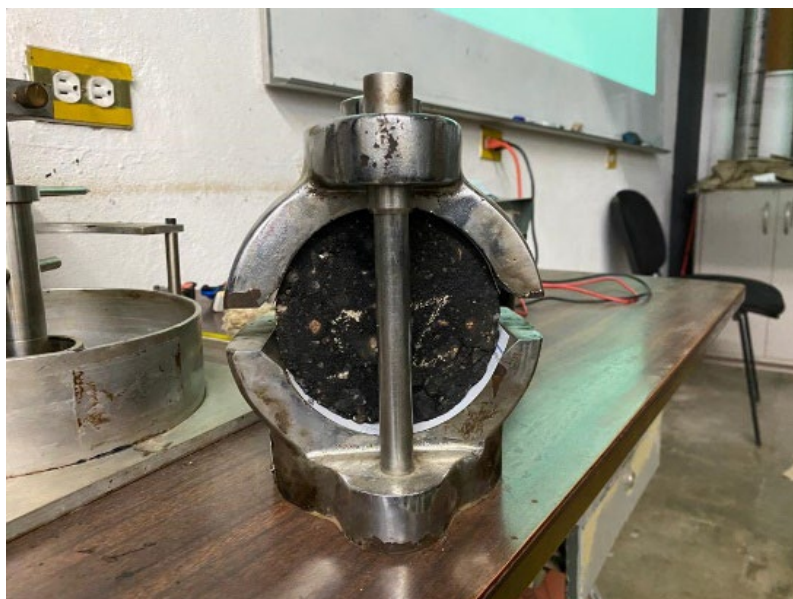


Figura 2. Prensa Marshall

### 3. TABLAS

Tabla 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (Norma N-CMT-4-04-17)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 ( <sup>3</sup> / <sub>8</sub> )	12,5 ( <sup>1</sup> / <sub>2</sub> )	19 ( <sup>3</sup> / <sub>4</sub> )	25 (1)	37,5 (1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> )
		Porcentaje que pasa ( en masa)				
50	2 in	...	...	...	...	100
37.5	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> in	...	...	...	100	90-100
25	1 in	...	...	100	90-100	74-90
19	<sup>3</sup> / <sub>4</sub> in	...	100	90-100	79-92	62-83
12.5	<sup>1</sup> / <sub>2</sub> in	100	90-100	72-89	58-81	46-74
9.5	<sup>3</sup> / <sub>8</sub> in	90-100	76-92	60-82	47-75	39-68
6.3	<sup>1</sup> / <sub>4</sub> in	70-89	56-81	44-71	36-65	30-59
4.75	N°4	56-82	45-74	37-64	30-58	25-53
2	N°10	28-64	25-55	20-46	17-42	13-38
0.85	N°20	18-49	15-42	12-35	9-31	6-28
0.425	N°40	13-37	11-32	8-27	5-24	3-21
0.25	N°60	10-29	8-25	6-21	4-19	2-16
0.15	N°100	6-21	5-18	4-16	2-14	1-12
0.075	N°200	2-10	2-9	2-8	1-7	0-6

Tabla 2. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall (Norma N-CMT-4-05-003-16)

Características	Numero de ejes equivalentes de diseño $\sum L$	
	$\sum L \leq 10^6$	$10^6 < \sum L \leq 10^7$
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm ( $10^{-2}$ in)	2 - 4 (8-16)	2-3,5 (8-14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3-5	3-5
Vacios ocupados por el asfalto /VFA); %	65-78	65-78

#### 4. RESULTADOS

En base a la Tabla 3 se observa que todas las pastillas resisten la carga mínima que indica la Tabla 1 de la norma N-CMT-4-05-003-16 (Ver Tabla 2 de este documento), para la prueba de flujo las pastillas que cumplen los límites son las del Caso 1, siendo de 20% de grava triturada, 28% de sello triturado, 20% de arena gris y 32% de arena blanca, resultando el mejor porcentaje de agregado pétreo, para el contenido de asfalto es indiferente el contenido que se elija, aunque se recomienda realizar la mezcla con un contenido de 5 a 6% de asfalto, para tener mayor trabajabilidad.

Así mismo, se observa que cuando hay exceso de finos los resultados de flujo no cumplen con los parámetros de la norma N-CMT-4-05-003-16 (Caso 2). En la Figura 3 se puede identificar claramente que los resultados están fuera del rango permitido. Por lo que se recomienda tener una granulometría balanceada.

Tabla 3. Resultados de estabilidad y flujo, para los diferentes contenidos de asfalto y porcentaje de agregado pétreo.

Mezclas	Contenido de asfalto (%)	Estabilidad (N)	Valores de referencia (N-CMT-4-05-003/16)	Flujo (mm)	Valores de referencia (N-CMT-4-05-003/16)
Caso 1 (Grava triturada 20%, Sello triturado 28%, Arena gris 20%, Arena blanca 32%)	4	6970.89	5340 N	3.59	2-4 mm
	4.5	11854.91		3.29	
	5	6478.64		3.33	
	5.5	12483.00		3.86	
	6	11823.86		2.54	
Caso 2 (Grava 20%, Sello 30%, Arena gris 10%, Arena blanca 40%)	4	8718.30	5340 N	4.87	2-4 mm
	4.5	8843.37		5.71	
	5	8593.23		4.02	
	5.5	8040.56		4.48	
	6	7850.69		3.30	
Caso 3 (Grava triturada 25%, Sello triturado 15%, Arena gris 30%, Arena blanca 30%)	4	6949.21	5340 N	3.20	2-4 mm
	4.5	7703.28		3.60	
	5	7298.68		3.25	
	5.5	9423.27		4.09	
	6	6632.45		2.79	
	6.5	7675.88		3.56	

Nota: Los valores resaltados en color vino en la columna de Flujo, son aquellos que no cumplen con las características de Flujo de la Tabla 2.



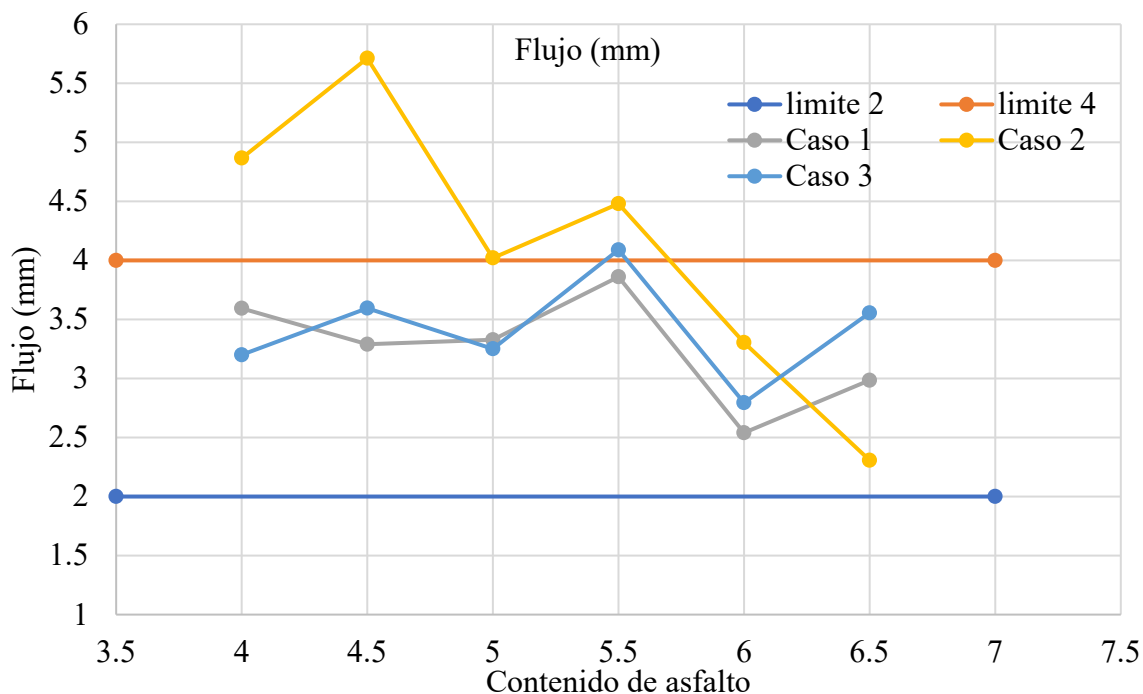


Figura 3. Resultados de prueba de flujo

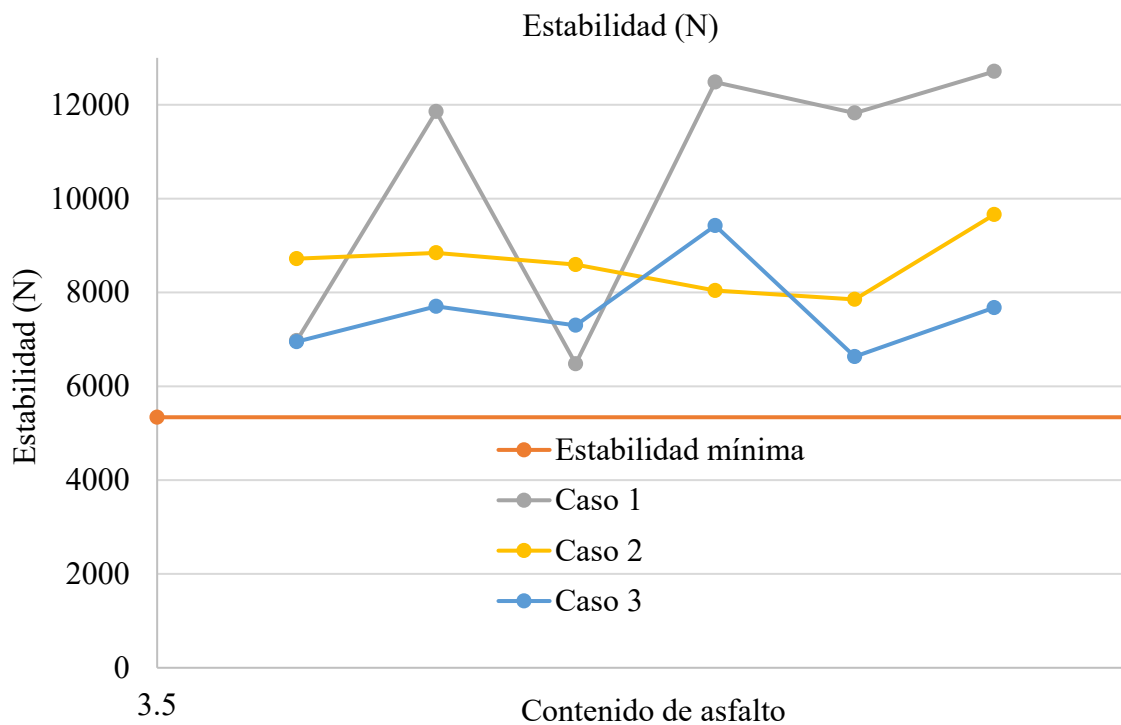


Figura 4. Resultados de prueba de estabilidad

## 5. CONCLUSIONES

En base a las pastillas analizadas, se observa que es necesario determinar el porcentaje del tipo de agregados pétreos a utilizar y en caso de tener un bajo porcentaje mínimo de asfalto se podría incorporar material de otro banco o agregar finos para obtener un porcentaje más alto, o también aumentar un cierto porcentaje de acuerdo al obtenido, esto quedará a criterio del que esté a cargo de realizar el diseño de la mezcla y del encargado de obra. Siempre buscando obtener un porcentaje adecuado de asfalto, y que los materiales pétreos cumplan con las especificaciones marcadas en la normativa N-CMT-4-04-17, además de procurar no exceder con el costo de la obra.

Durante esta investigación concluimos que de los porcentajes de agregados pétreos utilizados el más conveniente es utilizar los del Caso 1 el cual tiene proporciones de 20% de grava triturada, 28% de sello triturado, 20% de arena gris y 32% de arena blanca, siendo un total del 52% de arena (material fino), debido a que con estos porcentajes las muestras analizadas cumplen con los parámetros de estabilidad y flujo de la norma N-CMT-4-05-003-16 los cuales son requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa diseñadas mediante el método Marshall.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería civil, FIC UMSNH.

## 7. REFERENCIAS

Normativa SCT  
N-CMT-4-05-003-16  
N-CMT-4-04-17  
Materiales asfálticos. - Laboratorio de Materiales

## Evaluación de la reactividad y mejoramiento del comportamiento de bases estabilizadas con asfalto espumado y adiciones filler de aportación ante susceptibilidad a la humedad

M. A. Villanueva Guzmán<sup>1\*</sup>, H. L. Chávez García<sup>2</sup>, W. Martínez Molina<sup>3</sup>,  
A. Téllez Correa<sup>4</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>5</sup>, M. Arreola Sánchez<sup>6</sup>, R. M. Grajeda Rosado<sup>7</sup>

\*Autor de Contacto: [ariel.villanueva@umihch.mx](mailto:ariel.villanueva@umihch.mx)

<sup>1</sup> Posgrado de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, México

<sup>4</sup> Grupo o Departamento, Escuela o Facultad, Universidad o Institución, Ciudad, País

<sup>7</sup> Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Programa de Arquitectura Zona Veracruz, Universidad Veracruzana, Veracruz, México

### RESUMEN

Uno de los principales retos en la construcción de nuevas estructuras (o en este caso, pavimentos), es la necesidad de consumir una vasta cantidad de recursos económicos y naturales. En los pavimentos se requieren materiales pétreos convencionales que comprenden las capas de la estructura que, desde el punto de vista de sustentabilidad y sostenibilidad, son considerados como materiales no renovables. Al encontrarse como la segunda capa superficial, la “Base” es la segunda de mejores especificaciones. El asfalto espumado es utilizado para la estabilización de bases, por la adición de “fillers” o mejoramiento de los mismos, los que se utilizan para reducir el índice de plasticidad, incrementar cohesión o disminuir el desgaste del “esqueleto mineral” del pavimento y los efectos de pérdida de resistencia (estabilidad) de la capa debidos a la presencia de humedad. Al estabilizar una base con asfalto y filler, no sólo se incrementan las propiedades mecánicas de la capa de base, también crea un efecto de reducción de la permeabilidad de la base, por lo que las sufre menores deformaciones por el efecto de la variación del contenido de agua, ya que en realidad los cristales de hidratación de los materiales de adición (cal y cemento) crean un cubrimiento de las partículas finas de agregado pétreo. Este tipo de mezclas son conocidas como de “unión discontinua”.

**Palabras clave:** cristalografía; geles de hidratación; coating.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los proyectos de utilización de materiales de construcción se dirigen con un nuevo enfoque, esto debido a que la disponibilidad de los recursos comienza a ser una carencia, en la construcción de pavimentos no es la excepción. Además, los pavimentos que se construyen hoy en día deben de contar con mejores especificaciones, ya que a su vez las cargas y vehículos han evolucionado con el paso de los años, pero sin dejar de lado que la construcción de estos planteen la reducción de labores de conservaciones periódicas o que las actividades de conservación sean más eficientes, y así poder prolongar la vida de servicio de los pavimentos a menor costo.

En las vías terrestres está ocurriendo un fenómeno de evolución de los materiales para su construcción, pero no solo de los materiales como tal, también de en tecnologías que brinden soluciones y comodidades. Partiendo desde esa premisa, existe la necesidad de mejorar los pavimentos, o los elementos que los comprenden. La ingeniería se enfrentó un nuevo reto, la necesidad de modificar los materiales, para incrementar sus propiedades mecánicas a las que se encuentran sometidos (deformaciones, esfuerzos, etc.), en especial, en las capas superiores del pavimento, conocidas como *Capas de Estructura* (subbase, base y capa de rodadura), las cuales tienen una mayor ponderación en cuanto a durabilidad de estos. En la capa de base, los primeros métodos de mejoramiento fueron los “materiales modificados” y “materiales estabilizados” (mediante la implementación de cal o cemento), después surgieron los procedimientos de tratamiento con asfalto (base negra) y concreto hidráulico magro (de baja resistencia), todo esto se encuentra normado (SCT, 2016).

La técnica de asfalto espumado está siendo utilizada, debido a su aplicación, trabajabilidad, y especialmente en el empleo de tasas altas de material reciclado como agregado (hasta 99%), aunado a los resultados que se han obtenido en cuanto al incremento de la capacidad estructural al soportar esfuerzos mayores. Esta tecnología aún se encuentra en desarrollo en México, debido a que se cuentan con pocos documentos técnicos, de los cuales, uno de los primeros es del año 2017. Es de esta manera que surge el interés sobre el tema, utilizando los ensayos existentes y poder ampliarlos con un estudio que permita conocer la razón de los diferentes comportamientos desde la “Ciencia de los Materiales”.

El asfalto espumado es una alternativa de *mezcla sustentable* para los caminos en los cuales los agregados son mezclados hasta a temperatura ambiente, en donde el material bituminoso es adicionado en forma de espuma. El efecto de las propiedades de la espuma en cuanto a la resistencia físico – mecánica de un material de asfalto espumado es menos importante que el efecto que sufren las características de compactación (densidad o energía necesaria) u otros parámetros (Sunarjono, 2013).

Una de las limitantes a las que se encuentra el asfalto espumado se debe a que es un tema en pleno desarrollo en nuestro país, así que de momento no se cuentan con parámetros mecánicos con materiales de México, de los parámetros que se ven modificados (para beneficio) con una base estabilizada con espuma de asfalto son, la cohesión y valor de módulo resiliente, lo cual indica que la metodología es pertinente para los tipos de bases estabilizadas de nuestro entorno; los valores de módulo de resiliente han presentado un aumento (Delgado Alamilla, et al. 2017).

Durante el proceso de elaboración de una mezcla asfáltica en caliente (HMA) el consumo de energía es bastante elevado, ya que de esta manera se pueden lograr temperaturas superiores a 140° C en el asfalto, esto genera que la viscosidad del asfalto disminuya y tenga un mejor comportamiento, en su estado líquido, pero cuando el asfalto se expone a altas temperaturas provoca un efecto de emisiones de SOx, NOx, CO2 y componentes orgánicos volátiles, los cuales son considerados como sustancias tóxicas. Al elaborar una mezcla asfáltica templada (WMA) como lo es el asfalto espumado, se reducen las emisiones de los gases emanados de un 15% y hasta un 70% (Dong, et al 2017).

La estabilización de suelos es una alternativa que ha sido empleada en el ámbito de la construcción de pavimentos y geotecnia, para poder utilizar los materiales denominados como “no ideales” en la construcción de capas de pavimentos, como base o capas inferiores. Existe un amplio espectro de alternativas para la estabilización de suelos, como las estabilizaciones por cal o cemento, las cuales son las más aplicadas. Estas estabilizaciones (con cal o cemento), consisten en adicionar un material (1 a 3% en relación a la masa del agregado pétreo) para reducir la plasticidad del suelo que, a su vez, los cambios volumétricos del suelo deben de ser aceptables de acuerdo a las normativas vigentes (ASTM, 2012; ASTM, 2014; Chomicz-Kowalska, et al 2016; Chomicz-Kowalska, et al. 2016; Delgado Alamilla, et al. 2017; Dong, et al. 2017; Fu, et al. 2011; Li, et al. 2016).

Algunas veces, el proceso de estabilización de suelos con asfalto espumado requiere de la contribución de un material (cal o cemento), para la misma función, reducir el índice plástico del suelo. El asfalto contribuye de manera directa con la cohesión y adherencia en las partículas de agregado pétreo que tengan una mayor área superficial (menor tamaño de las partículas, partículas más finas), las cuales son las responsables de producir los cambios volumétricos cuando se encuentran en contacto con agua (expansión). El contenido de asfalto a emplear en esta técnica va desde 1 y hasta 3% (en relación a la masa del agregado pétreo), en la estabilización mediante el asfalto espumado. esto requiere una menor cantidad de asfalto comparado contra una mezcla asfáltica densa (HMA) (5 a 7%).

La técnica de estabilización mediante asfalto espumado presenta una mejoría en la cohesión y adherencia entre las partículas de suelo, además de proveer resistencia ante el fenómeno de susceptibilidad a la humedad en suelos. La permeabilidad de la mezcla disminuye, esto debido a que el asfalto es un producto “impermeable” e insoluble en agua (Mohd Hasan, et al. 2017a; Mohd Hasan, et al. 2017b; Abreu, et al. 2017; Wirtgen, 2012; Yu, et al. 2014).

## 2. PROCEDIMIENTO

Para el caso de análisis de esta investigación, se consideraron condiciones iniciales para poder realizar una comparación apropiada entre las propiedades de las mezclas. Como el principal objetivo deseado es el análisis del RAP en la resistencia a los esfuerzos de tensión indirecta, se clasificaron dos grupos de mezclas: 100% de agregado virgen (50% de material de base + 50% de arena) y 75% de agregado virgen (37.5% de material de base + 37.5% de arena) + 25% de RAP. Estas dosificaciones fueron determinadas después de un análisis granulométrico de tres diferentes tipos de agregados disponibles (base, arena y RAP). A continuación, se muestran los resultados de las cantidades de materiales para las mezclas de trabajo (ASTM, 2014), Figura 1.

Después, mediante el ensaye “Proctor modificado” se determina la densidad máxima de las mezclas de trabajo, y poder conocer el contenido óptimo de humedad (INEGI, 2015), Figura 2.

La elaboración de los especímenes es mediante un molde circular para obtener las siguientes características de cada uno: diámetro de 150 mm y 100 mm de altura.

El acondicionamiento de los especímenes es en un horno a 40°C por 24 horas, para que pierdan el 0% de humedad (aproximadamente), después de transcurrir esta primera fase, se sellan con plástico (bolsas o membranas) por 48 horas a 40°C, en total son 72 horas de acondicionamiento. La manera de probar los especímenes es hasta que alcancen 25°C, Figura 3. El ensaye se realiza en la prensa Marshall, y con los especímenes acondicionados.

Una vez que han quedado establecidas las condiciones iniciales, se procede a tomar una decisión para igualar otras condiciones de las mezclas, con el fin de reducir al mínimo las variaciones de los resultados obtenidos. El asfalto a utilizar en todos los casos de la aplicación de esta tecnología es un PG 64-16, debido a que las boquillas dosificadoras no permiten el paso de asfaltos con materiales modificados. El contenido de asfalto es de 2.4% con respecto a la masa total del

agregado pétreo, fueron seleccionadas 4 condiciones: mezcla control (sin filler de contribución), cal 1%, CPC-20 1% (cemento tipo mortero), y CPC-30 1% (cemento portland compuesto). De esta manera se cuentan con 8 mezclas a evaluar. Se determinó la importancia de evaluar las condiciones de resistencia mecánica mediante un ensaye a la tensión indirecta, en el cual las referencias establecen que debe evaluarse a 72 horas de curado, para el caso de esta investigación y con los fundamentos que se tienen sobre las reacciones químicas y formaciones cristalinas en los productos de hidratación de cemento y cal, se evaluaron 3 edades, 3, 7 y 28 días de curado, ya que se pueden tener mejores resistencias con la evolución de la edad, esto de acuerdo a los principios de la *Ciencia de Materiales*.

Los resultados de esfuerzos resistentes son un promedio de los especímenes ensayados. En las Tablas 1 – 9 y Figura 4 – 8 se muestra el comportamiento de las resistencias a esfuerzos de tensión indirecta de las mezclas de trabajo.

Escriba directamente sobre este formato. El texto debe escribirse en una sola columna con espaciado sencillo y justificado. Utilice el tipo de letra Times New Roman. El tamaño de letra que se tiene que usar es de 12 puntos.

El resumen deberá estar ubicado en la primera página del artículo. El primer punto del artículo deberá ser “Introducción” y comenzar en la segunda hoja.

### 3. ECUACIONES

Cada prensa Marshall cuenta con la ecuación que permite transformar la deformación en los especímenes a carga, debido a que la velocidad de incremento de las cargas es una constante. A continuación, se presenta la ecuación para calcular el esfuerzo de tensión indirecta (ITS) de la prensa empleada en la experimentación:

$$ITS = \frac{2,000,000*(A+(B*Li)+(C*Li^2))}{\pi \phi h} \quad (1)$$

En donde:

ITS= esfuerzo de tensión indirecta de falla del espécimen, (kPa)

A, B y C: constantes de la velocidad y calibración del equipo

$$A= 2.31541 \times 10^{-2}$$

$$B= 2.16548 \times 10^{-2}$$

$$C= 1.45075 \times 10^{-7}$$

Li: Lectura máxima de la deformación del espécimen, ( $\mu\text{m}$ )

$\phi$ : diámetro del espécimen, (mm)

h: altura del espécimen, (mm)

#### 4. TABLAS Y FIGURAS

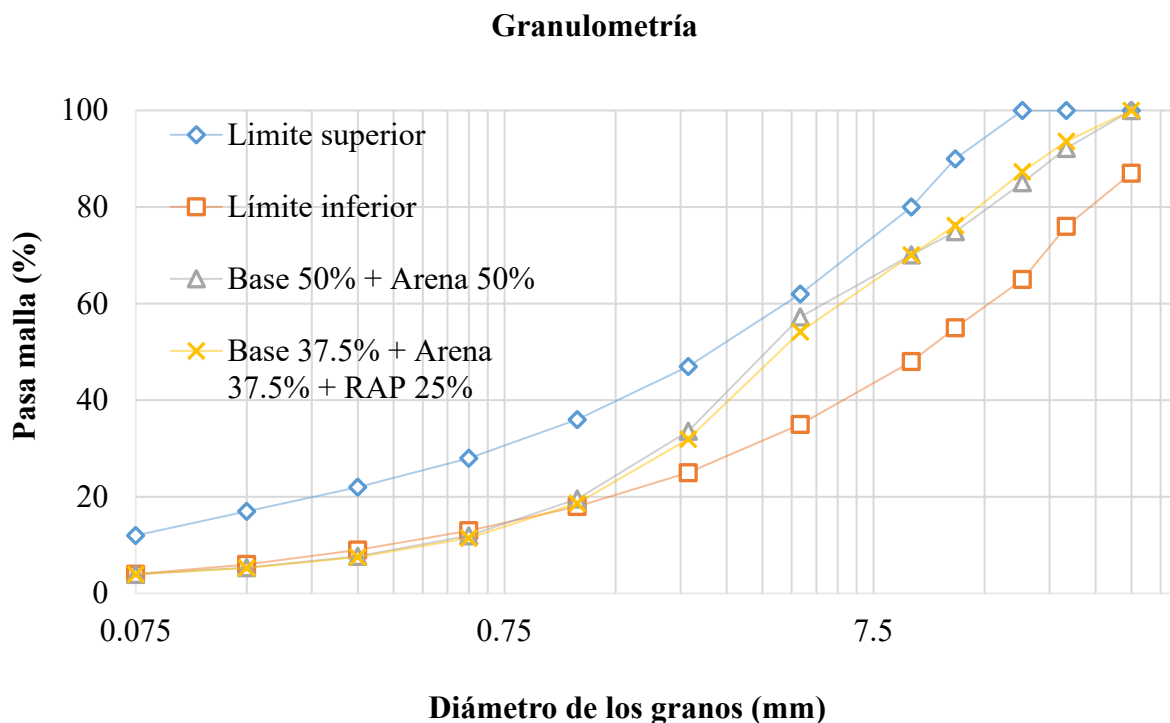


Figura 1. Curvas granulométricas de las mezclas de trabajo.

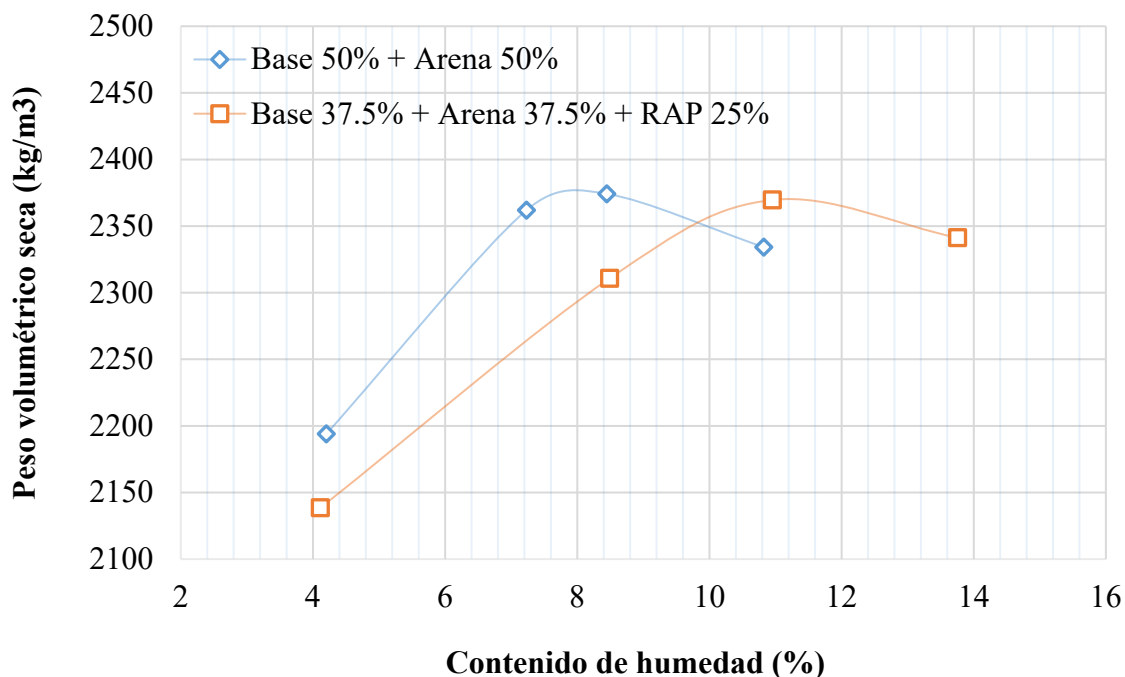


Figura 2. Curvas de peso volumétrico seco - contenido de humedad de las mezclas de trabajo.



Figura 3. Acondicionamiento de los especímenes de las mezclas de trabajo.

## 5. RESULTADOS

De acuerdo a la referencia, se requiere que los materiales de capa de base tengan una resistencia ante la tensión indirecta de 225 kPa para una edad de 3 días de curado. Estas características son las deseables de una capa de base en pavimentos. Una de las variables de esta investigación era determinar la evolución de las resistencias con los diferentes tipos de filler de aportación respecto a una mezcla de referencia. Además, se busca representar la relevancia del RAP como agregado natural con respecto a los esfuerzos de un agregado pétreo virgen.

En las Tablas 1 y 2 y Figuras 4 – 9 se aprecian las resistencias promedio de los especímenes respecto a cada una de las condiciones de las mezclas. A los 3 días de curado, ninguna de las mezclas con agregado virgen cumple con la resistencia mínima de 225 kPa que se tiene como referencia; en cambio, de las mezclas con presencia de RAP se aprecia que la mezcla de referencia y la que contiene el CPC-30 como filler cumplen con la especificación de resistencia, siendo la mezcla de RAP con CPC-30 la que muestra un mejor desempeño a 3 días de edad (mayor referencia).

Se aprecia que, a una edad de 7 días de curado, casi todas las mezclas cumplen con la especificación, a excepción de: Mezcla con agregado virgen de CPC-30 (190.39 kPa); y de las mezclas con RAP de referencia (206.62 kPa), CPC-20 (194.84 kPa). Por último, se observa que a la edad de 28 días de curado todos los especímenes de las mezclas con agregado virgen sufren una disminución de los esfuerzos resistentes, únicamente la mezcla de referencia cumple con la resistencia > 225 kPa (306 kPa); de las mezclas con RAP todas cumplen con la resistencia de referencia, siendo la mezcla referencia la que cuenta con el valor más elevado (383.40 kPa).



Tabla 1. Resultados de resistencia promedio a tensión indirecta a diferentes edades de acondicionamiento de las mezclas de trabajo con agregado virgen.

Mezclas con agregado virgen				
Edad (días)	Resistencia promedio (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
3	206.30	179.92	143.34	172.60
7	335.84	240.92	264.75	190.39
28	306.00	165.28	170.06	185.32

Tabla 2. Resultados de resistencia promedio a tensión indirecta a diferentes edades de acondicionamiento de las mezclas de trabajo con 25% RAP.

Mezclas con RAP				
Edad (días)	Resistencia promedio (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
3	232.99	174.51	170.70	276.18
7	206.62	252.67	194.84	251.41
28	383.40	296.17	249.19	268.56

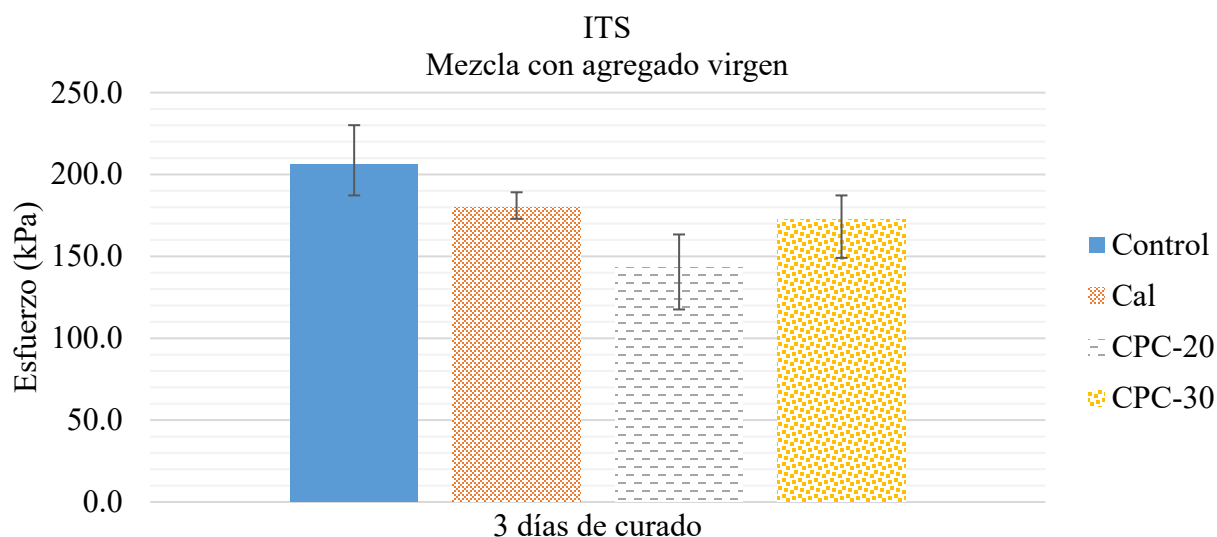


Figura 4. Resultados de las mezclas con agregado virgen de prueba de tensión indirecta a 3 días.

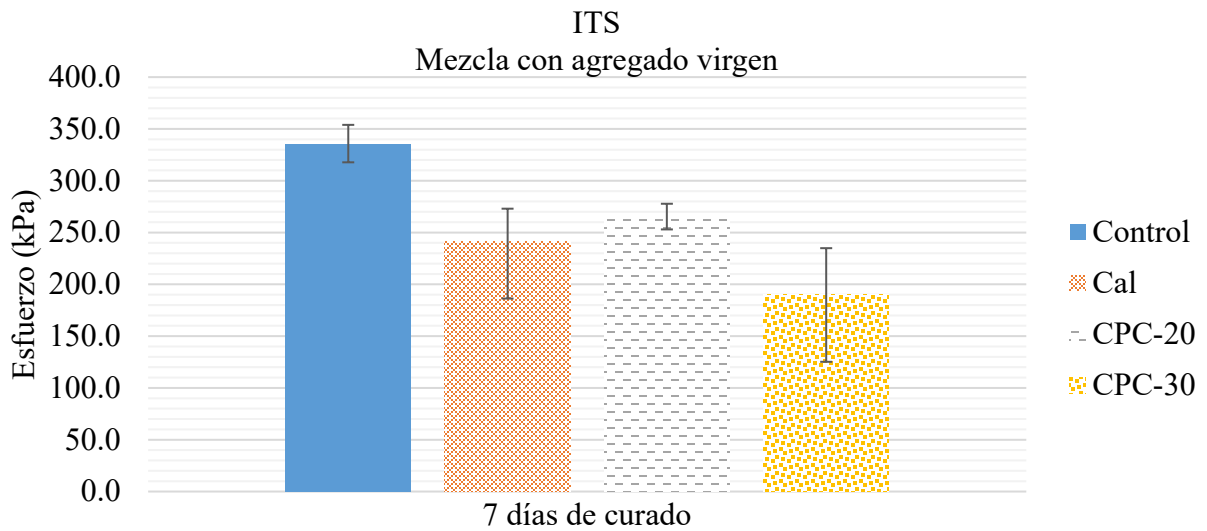


Figura 5. Resultados de las mezclas con agregado virgen de prueba de tensión indirecta a 7 días.

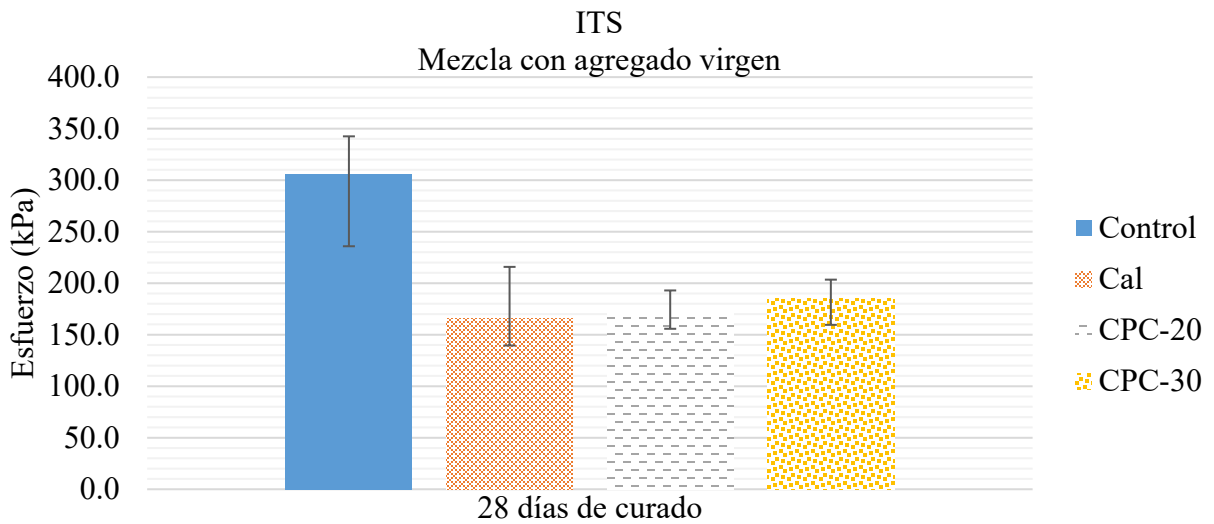


Figura 6. Resultados de las mezclas con agregado virgen de prueba de tensión indirecta a 28 días.

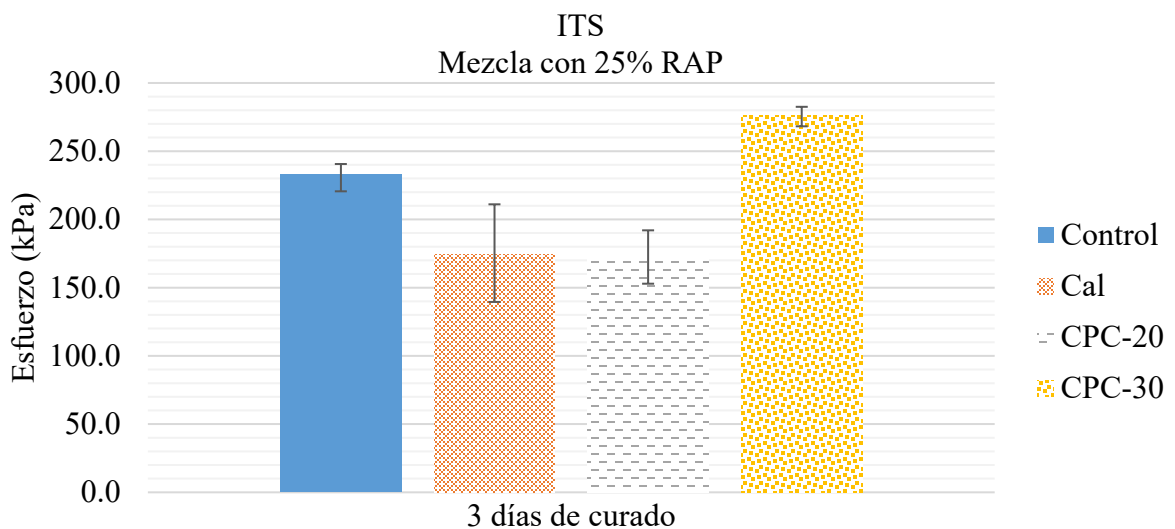


Figura 7. Resultados de las mezclas con 25% RAP de prueba de tensión indirecta a 3 días.

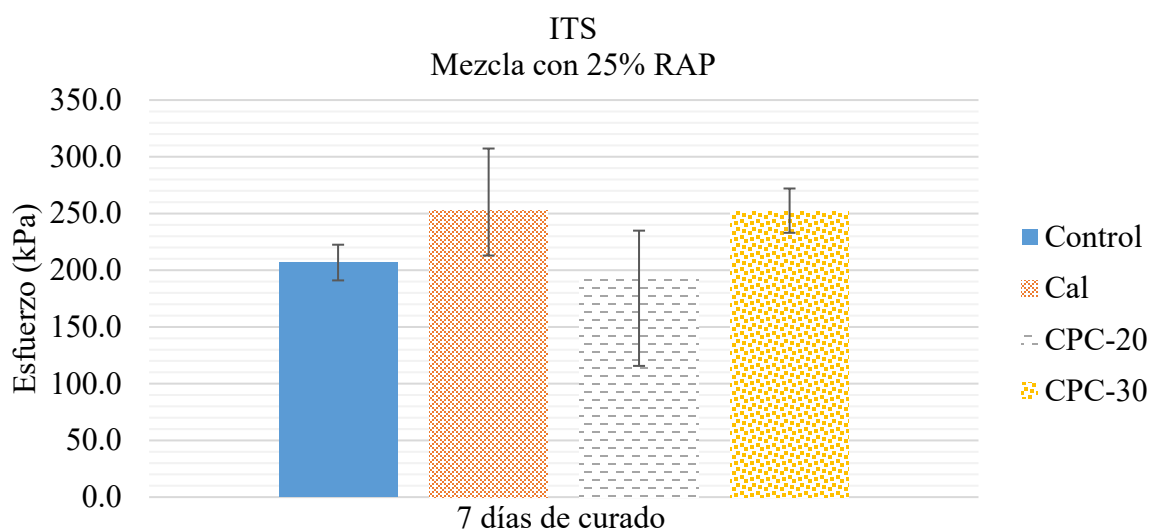


Figura 8. Resultados de las mezclas con 25% RAP de prueba de tensión indirecta a 7 días.

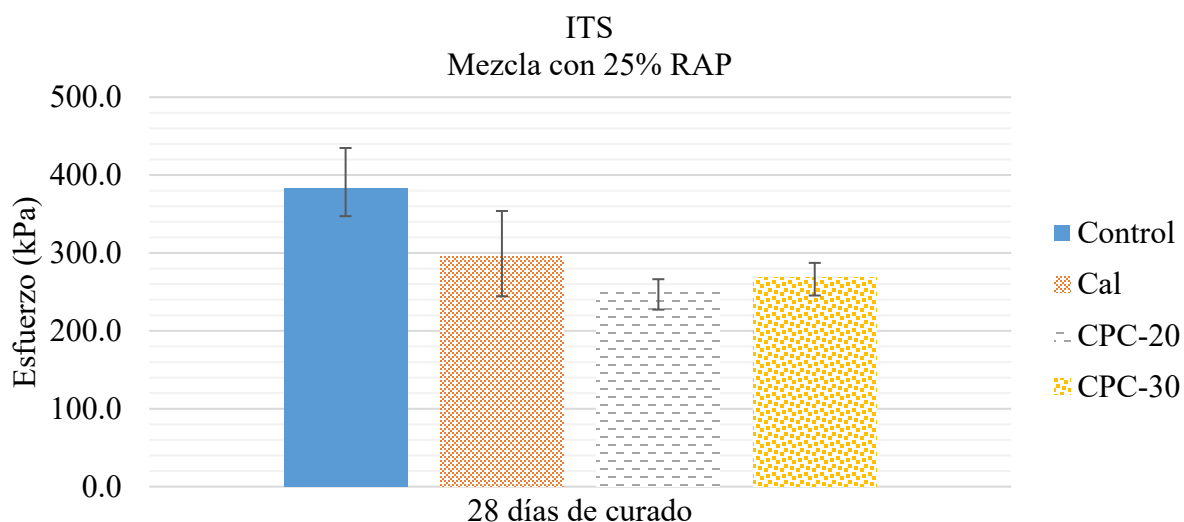


Figura 9. Resultados de las mezclas con 25% RAP de prueba de tensión indirecta a 28 días.

En las Figuras 4 – 9 se encuentran los resultados promedio alcanzados por los especímenes, además de apreciar unas barras de error, las cuales muestran la diferencia de las resistencia máxima y mínima alcanzada en los especímenes ensayados bajo esas condiciones de las mezclas. De las 8 mezclas analizadas durante esta investigación, la mezcla con RAP de CPC-30 es la que tiene una mayor consistencia de los resultados de resistencia obtenidas, esto indica una menor variación de ellas.

A continuación, en las Figura 10 y 11 se muestra la evolución de las resistencias con la edad de curado, brindado una pendiente aproximada, en la que se aprecia que en las mezclas de agregado virgen de 3 a 7 días incrementa la resistencia, pero de 7 a 28 días disminuyen la resistencia (a excepción de la mezcla con CPC-30), pero todas ellas tienden a mantenerse estables, es decir, la pendiente tiende a ser constante horizontalmente.

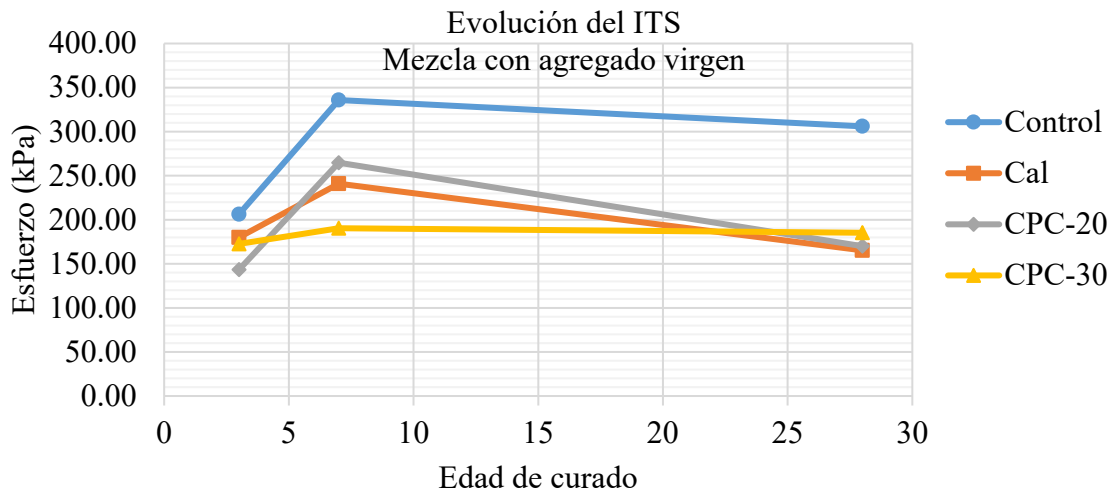


Figura 10. Resultados la evolución de la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas con agregado virgen.

Para los especímenes de mezclas con presencia de RAP como agregado pétreo, de 3 a 7 días reducen las resistencias (excepto la mezcla con cal), en cambio de 7 a 28 días todas las mezclas tienden a incrementar sus resistencia de manera notable.

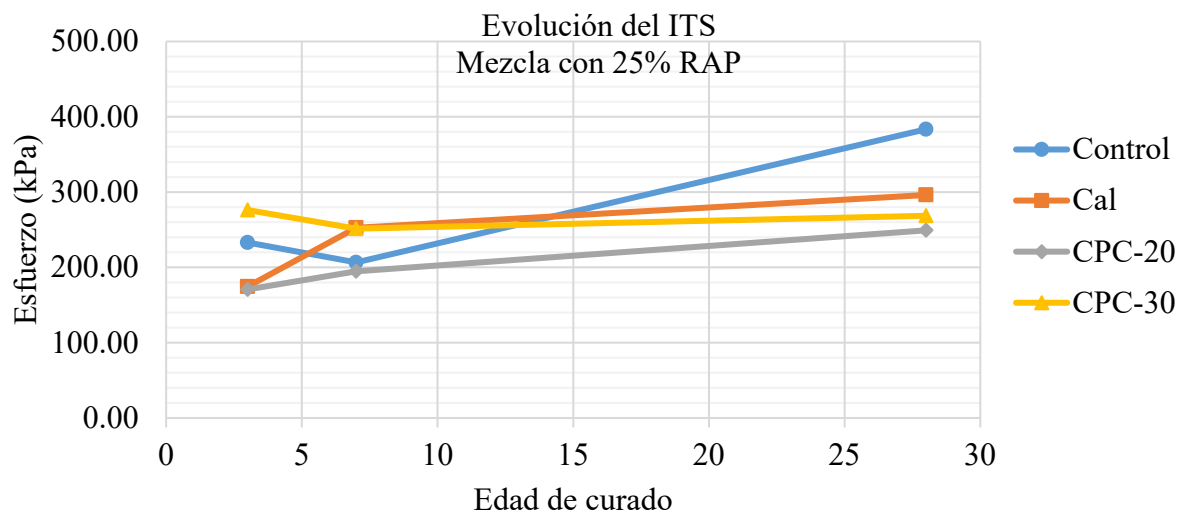


Figura 11. Resultados la evolución de la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas con 25% RAP.

## 6. CONCLUSIONES

Los materiales utilizados como filler de aportación cumplen con la función de mejorar las condiciones de esfuerzo permisible en casi todas las mezclas y edades de la investigación, de la cual, la mezclas que contienen cal y CPC-30 brindan resultados mayores a la resistencia mínima de referencia, y mantiene el comportamiento al alza con el paso del tiempo, lo que se traduce como un mayor beneficio estructural de la capa de base estabilizada.

La selección del mejor material de filler de aportación se debe basar en los beneficios deseables a incrementar, ya que los resultados del desempeño mecánico son muy similares, pero con una ligera mejoría en las mezclas con CPC-30.

La presencia del RAP incrementa el esfuerzo a la tensión indirecta de los especímenes bajo las mismas condiciones de los agregados de aportación, lo que insinúa un mejor comportamiento a las propiedades mecánicas en la utilización de estos materiales en la construcción como alternativas de estabilización de “suelos marginales”.

Desde casi todas las aristas del tema de las resistencias, se cuenta con una mayor área de oportunidad y ventajas en la estabilización de bases mediante asfalto espumado, como lo es la posibilidad de reciclar y reutilizar material de las capas de mezclas asfálticas, lo que se ve reflejado en el incremento de la vida útil del pavimento. La utilización de material reciclado (RAP) es de gran impacto ambiental y económico, desde la implementación de un futuro plan de gestión que puede ser desarrollado para reutilizar estas capas asfálticas. Se puede aseverar que, en estos materiales, “*existe una vida después de haber cumplido su ciclo de utilidad.*”

## 7. AGRADECIMIENTOS

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Sección de Resistencia de Materiales por sus aportaciones y apoyo durante el desarrollo de la investigación.

Al Instituto Mexicano del Transporte por las facilidades brindadas para la elaboración de las mezclas de trabajo y acervo bibliográfico.

## 8. REFERENCIAS

- INEGI. (2015). *Red Nacional de Caminos*. Aguascaliente: INEGI.
- IMT (2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>.
- Gobierno Federal (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. CDMX: Gobierno Federal. Obtenido de <https://www.gob.mx/sct/articulos/programa-nacional-de-infraestructura-carretera-2018-2024-185945?idiom=es>.
- SCT (2016). *N-CMT-4-02-003/16 "Características de los Materiales; Materiales para pavimentos; Materiales para Subbases y Bases; Materiales para Bases Tratadas"*. CDMX: SCT.
- Sunarjono, S. (2013). *Performance of Foamed Asphalt under Repeated Load Axial Test*. *Procedia Engineering*, 698-710.
- Delgado Alamilla, H., García Hernández, F., & Campos Hernández, D. E. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño mecánico de una base hidráulica reciclada con asfalto espumado*. Medellín, Colombia: XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.
- Dong, F., Yu, X., Xu, B., & Wang, T. (2017). *Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder*. *Construction and Building Materials*, 595-601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.106>
- ASTM, (2012). *ASTM D1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*.
- ASTM, (2014). *ASTM-C-136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- Chomicz-Kowalska, A., & Stepien, J. (2016), *Cost and Eco-Effective Cold In-Place Recycled Mixtures with Foamed Bitumen During the Reconstruction of a Road Section Under Variable Load Bearing Capacity of the Subgrade*. *Procedia Engineering*. 161. 980-989. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.837>

- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., & Iwansky, M. M. (2016), *Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen*. Construction and Building Materials, 126. 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>
- Delgado Alamilla, H., García Hernández, F., & Campos Hernández, D. E. (2017). *Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado*. Sanfandilla, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Dong, F., Yu, X., Xu, B., Wang, T. (2017), *Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder*, Construction Build. Mater. 134 595-601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.106>
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T. (2011), *The effects of asphalt binder and granular material characteristics on foamed asphalt mix strength*, Construction Build. Mater. 25(2), 1093-1101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.067>
- Li, Z., Hao, P., Liu, H., Xu, J., Chen, Z. (2016), *Investigation of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using foamed asphalt*, Construction Build. Mater. 127, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.126>
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., Yang, X. (2017a), *A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques*, Construction Build. Mater. 152, 115-133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135>
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., Yang, X., Heiden, P. A. (2017b), *Quantification of physicochemical properties, activation energy, and temperature susceptibility of foamed asphalt binders*, Construction Build. Mater. 153, 557-568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.123>
- Abreu, L. P. F., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Palha, D., Fonseca P. V. (2017), *Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates*, Construction and Building Materials, Volume 142, Pages 342-353, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.085>.
- Wirtgen, (2012), *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Yu, X., Leng, Z., Wang, Y., Lin, S. (2014), *Characterization of the effect of foaming water content on the performance of foamed crumb rubber modified asphalt*. Construction Build. Mater. 67(Part B), 279-284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.046>

## Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas

F. Hernández<sup>1\*</sup>, H. L. Chávez<sup>1</sup>, C. Bernabe<sup>1</sup>, W. Molina<sup>1</sup>, E. Mercedes<sup>1</sup>, C. Lara<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [1238378f@umich.mx](mailto:1238378f@umich.mx)

<sup>1</sup>Laboratorio de materiales, Facultad de ingeniería civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.

### RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como finalidad exponer la eficiencia, resistencia y viabilidad de un concreto hidráulico, el cual tiene una sustitución parcial de agregado fino por desechos plásticos triturados tomados como desperdicios de los vertederos a cielo abierto de las industrias de la región de Zacapu, Michoacán, México. Se recolectó el plástico y se caracterizó por granulometría y densidad, de igual manera se obtienen los parámetros de calidad en los agregados pétreos y en el cemento, siguiendo los procedimientos de las normativas mexicanas (NMX) Posteriormente se realiza un diseño de mezclas de concreto hidráulico convencional con base en el criterio American Concrete Institute (ACI-318). Se elaboraron los especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm y prismáticos de 15 x 15 x 60 cm, para evaluar a las diferentes edades de 7, 14, 28, 45 y 60 días, y comparar entre mezclas: Testigo PET (TP), sustitución 5% de la masa de la arena (FP-5%) y sustitución 10% de la masa de la arena (FP-10%). Se realizaron pruebas al concreto fresco: Revenimiento y masa unitaria. En el concreto endurecido se evaluaron mediante pruebas destructivas: Compresión simple, tensión por compresión diametral, flexión y módulo de elasticidad estático; y no destructivas: Velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia y módulo de elasticidad dinámico. Las mezclas con sustituciones plásticas se comportaron de manera adecuada respecto a la mezcla testigo, siendo la mezcla FP-5% la más semejante. Esta mezcla obtuvo una resistencia a la compresión simple mayor a los 250 kg/cm<sup>2</sup> a los 60 días de edad, alcanzando el 100% de la resistencia de proyecto esperada, mientras que la mezcla FP-10% obtuvo un 90% de resistencia respecto a la de proyecto. El revenimiento de diseño fue de 15 cm y la resistencia de proyecto corresponde a un concreto de  $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días. Resultando factible el uso del plástico triturado en la elaboración de concreto hidráulico para uso estructural y no estructural.

**Palabras clave:** Concreto hidráulico, PET, sustituciones plásticas, pruebas destructivas, pruebas no destructivas.

## 1. INTRODUCCIÓN

En México existe una gran demanda de concreto, misma que crece de manera exponencial año tras año, las cifras indican que se producen más de 20 millones de metros cúbicos de concreto, de los cuales no se recicla ni el 1%.

La industria de la construcción produjo aproximadamente 6 millones de toneladas de residuos en promedio entre 2006 y 2012 del concreto, el 80% se depositó sin reutilización, del cual el 30% llegó a través de un centro de transferencia.

En la Ciudad de México en 2010, la cantidad de residuos de construcción se estimó en 7 mil toneladas diarias, de las cuales el 1% se reciclaron y el 80% se vertieron en vertederos. En 2015, la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México (SOBSE) recibió y procesó diariamente 33 toneladas de residuos de construcción y demolición, y 459 toneladas diarias en el Departamento de Mantenimiento e Infraestructura Urbana (DMIU) que se encuentra ubicado en cada delegación. En general, los residuos contenían un 70% de materiales inertes de origen mineral, como el concreto.

Por otro lado, se tiene también la problemática de la contaminación por el uso del plástico, este está en todas partes, en objetos de uso diario, insumos para la salud, nuestro calzado, accesorios, diversos utensilios para el trabajo u hogar, botellas para transportar líquidos, alimentos que pedimos para llevar, entre muchos otros

Los plásticos de un solo uso están por todas partes, los vemos en las calles de nuestras ciudades, bloqueando las alcantarillas, pero también en los rincones más lejanos y prístinos de nuestro planeta, el PET ha sido el más plástico más reciclado en los últimos años.

Sin embargo, en México la producción de botellas PET es de 90,000,000,000 al año y aunque posee un alto valor de reciclaje, solo se recicle el 58% de ellos.

Derivado de todo lo anterior mencionado tenemos que hacer conciencia y empezar a implementar el uso de concretos reciclados ayudando a reducir una parte de toda esta contaminación que genera el proceso desde su elaboración hasta su desecho. Sustituyendo una parte de sus agregados por plástico se estará reduciendo una gran parte de todo este material que de forma irracional se va convirtiendo en un mal que a todos nos afecta y que poco a poco se convertirá en algo irreparable.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Origen y obtención del material plástico.

Para la obtención del agregado plástico triturado se visitó el “Parque industrial” ubicado en Zacapu, Michoacán. En dicho lugar se localiza una industria dedicada al reciclaje de plástico y a la elaboración de materia prima a partir del desecho.

Una vez obtenido el material y al tratarse de diferentes tipos de plásticos combinados y triturados, se llevaron al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, donde se retiraron aquellas partículas donde su densidad fue menor que 1, esto con el fin de evitar que al momento de añadirlas al concreto estas asciendan a la parte superior de los especímenes por la diferencia de densidades en comparación con los agregados pétreos.

### 2.2 Caracterización de los agregados pétreos

Se hicieron pruebas de densidad, masa volumétrica seca suelta, masa volumétrica seca varillada, módulo de finura, absorción y granulometría, esto en agregado fino, específicamente arena negra



volcánica.

Así como también densidad, masa volumétrica seca suelta, masa volumétrica seca varillada, absorción, densidad y granulometría para el agregado grueso tratándose de grava triturada.

Para el material plástico se hizo granulometría y densidad.

Por último, para el cemento se realizaron pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado, el tipo de cementante corresponde a un cemento Tolteca CPC-30R-RS.

### 2.3 Pruebas en concreto en estado endurecido.

Las edades de prueba corresponden a 7, 14, 28, 45 y 60 días para elementos cilíndricos y 28, 45 y 60 días para elementos tipo “viga”.

En cilindros, las pruebas realizadas son de compresión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y tensión indirecta se realizaron a las edades de 7, 14, 28, 45 y 60 días. Para los ensayos de módulos de elasticidad se hicieron pruebas a 7, 28 y 60 días.

Así también para vigas, las pruebas de flexión, frecuencia de resonancia magnética, resistividad eléctrica y velocidad de pulso se hicieron a las edades de 28, 45 y 60 días.

La elaboración de especímenes, el muestreo en concreto fresco y curado, pruebas destructivas y no destructivas, cálculos y resultados se hicieron de acuerdo a las normativas vigentes (NMX)

Las dos mezclas con sustitución de arena por material plástico se compararon con las muestras testigo a las edades especificadas.

## 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Las pruebas aquí descritas se realizaron de acuerdo a las Normativas Mexicanas vigentes (NMX). Este proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería civil, “Ing. Luis Silva Ruelas”

### 3.1 Pruebas en los agregados finos.

#### 3.1.1 Cuarteo en arena.

El cuarteo se realiza con el objetivo de obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran. Para esta investigación se usó el cuarteador mecánico (NMX-C-170-ONNCCE-2019, 2019).

#### 3.1.2 Humedad actual en arena y humedad de absorción.

Esta prueba tiene como objetivo determinar la cantidad de agua que contiene el agregado en estado natural antes de ser utilizado. los resultados se emplean en la determinación de las cantidades netas de los materiales que intervienen en una revoltura de concreto, así como para realizar las correcciones por humedad en caso de ser requeridas. Derivada de la ecuación 1 (NMX-C-166-ONNCCE-2018, 2018) y (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

$$\% H. Actual = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (1)$$

#### 3.1.3 Masa volumétrica seca y suelta y masa volumétrica seca y varillada (MVSS y MVSV)

Tiene como objetivo determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural y en forma compactada, expresada en la ecuación 2 (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

$$M.V.S.S = \frac{M}{V} \quad (2)$$

### 3.1.4 Granulometría en arena y módulo de finura.

El objetivo de esta prueba es pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura de la muestra, ecuación 3, siguiendo la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) y (NMX-C-077-ONNCCE-2019, 2019).

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de malla \#8 hasta \#100}}{100} \quad (3)$$

### 3.1.5 Densidad relativa en la arena.

El objetivo de esta prueba es determinar el volumen efectivo de las partículas de arena excluyendo los vacíos que se forman entre las mismas cuando se acomodan una sobre la otra, el tamaño de las partículas no debe de pasar de 4.76 mm. Los resultados se expresan con una aproximación al centésimo siguiendo la ecuación 4 (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

$$DA = \frac{Ma}{V_f - V_i} \quad (4)$$

## 3.2 Pruebas en los agregados gruesos.

### 3.2.1 Cuarteo en grava.

El cuarteo tiene como objetivo obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran. Para esta investigación se usó el cuarteador mecánico (NMX-C-170-ONNCCE-2019, 2019).

### 3.2.2 Humedad actual en grava y humedad de absorción.

Tiene como objetivo determinar la cantidad de agua que contiene el agregado en estado natural antes de ser utilizado. Los resultados se emplean en la determinación de las cantidades netas de los materiales que intervienen en una revoltura de concreto, así como para realizar las correcciones por humedad en caso de ser requeridas, así como para determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco siguiendo la ecuación 5 de (NMX-C-166-ONNCCE-2018, 2018) y (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

$$\% H. actual = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (5)$$

### 3.2.3 Densidad en grava.

Tiene como objetivo determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen. Obtenido de la ecuación 6 y siguiendo los lineamientos adscritos en la (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

$$DA = \frac{Ma}{v_f - v_i} \quad (6)$$

### 3.2.4 Masa volumétrica seca y suelta y masa volumétrica seca y varillada (MVSS y MVSV)

Tiene como objetivo determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural y en forma compactada, expresada en la ecuación 7 tomada de la (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

$$M.V.S.S = \frac{M}{V} \quad (7)$$

### 3.2.5 Granulometría en grava y tamaño máximo.

El objetivo de esta prueba es el de obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava, así como el tamaño máximo (T.M.), valor que se utiliza para el cálculo del diseño de mezclas, obtenido de la (NMX-C-077-ONNCCE-2019, 2019).

## 3.3 Pruebas al cemento.

### 3.3.1 Consistencia normal.

Esta prueba tiene como objetivo obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con un determinado peso de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado (NMX-C-057-ONNCCE-2015, 2015).

### 3.3.2 Tiempos de fraguado.

El objetivo es determinar el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante la aguja de Vicat (NMX-C-059-ONNCCE-2017, 2017).

## 3.4 Diseño de la mezcla por el método ACI (American Concrete Institute)

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla.

El proporcionamiento de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas.

Para este método se determina la resistencia de proyecto ( $F'c$ ) y revenimiento de acuerdo al tipo de proyecto que se lleve a cabo.

## 3.5 Elaboración de los especímenes cilíndricos y prismáticos.

El objetivo es obtener las muestras representativas del concreto colado en las diferentes partes de una estructura, para ello se elaboran cilindros y elementos prismáticos tipo vigas, estos deberán ser probados a la edad requerida, pueden ser fabricados en el laboratorio para comprobar el cálculo de un proporcionamiento o en el campo para el control de calidad de una mezcla (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016).

## 3.6 Curado de los especímenes.

Este es el procedimiento empleado para evitar que el agua de la mezcla del concreto se evapore

en forma rápida o bien para reintegrar al mismo la pérdida de humedad debido a los procesos de fraguado y liberación de calor (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016) y (NMX-C-148-ONNCCE-2010, 2010).

### **3.7 Pruebas en concreto fresco.**

#### **3.7.1 Revenimiento.**

Esta práctica tiene como objetivo medir la consistencia, plasticidad y trabajabilidad del concreto fresco en término de la disminución de altura (cm) por acción del agua de mezclado, para concretos con agregados máximos nominales no mayores a 50 mm. (NMX-C-156-ONNCCE-2020, 2020).

#### **3.7.2 Masa unitaria.**

El objetivo de esta prueba es determinar la masa unitaria de la muestra de concreto, la masa unitaria es la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco ( $\text{kg/m}^3$ ) determinado bajo la (NMX-C-162-ONNCCE-2014, 2014) obtenida de la ecuación 8.

$$Mu = (Mb - Mr) F \quad (8)$$

### **3.8 Pruebas no destructivas en concreto endurecido.**

#### **3.8.1 Cabeceado de los especímenes.**

El cabeceo de especímenes tiene como objetivo obtener la planicidad y perpendicularidad en sus bases para su ensayo, es aplicable al concreto hidráulico endurecido. El fin es la homogeneidad en toda el área del cilindro para una transmisión de cargas uniforme (NMX-C-109-ONNCCE-2010, 2010).

#### **3.8.2 Velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad dinámico.**

El propósito de esta prueba es determinar la velocidad de propagación de ondas de compresión longitudinales a través del concreto. Se obtienen valores para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto para ondas longitudinales en la modalidad de inspección emisor - receptor.

El tiempo de recorrido, T, se mide electrónicamente y la velocidad del pulso, V se calcula dividiendo D/T. (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020) El módulo de elasticidad dinámico se calcula de acuerdo a la ecuación 9. Dado en m/s.

$$E = V^2 Q \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (9)$$

#### **3.8.3 Resistividad eléctrica.**

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los problemas patológicos que más afectan la vida de servicio de las estructuras de concreto. Existen varios métodos para medirla y únicamente la interpretación simultánea de varios de ellos conduce a un adecuado dictamen sobre el grado de deterioro. Uno de los métodos cualitativos e indirectos para valorar el estado de deterioro por corrosión de una estructura de concreto es el de la resistividad eléctrica. Este método es económico, rápido de interpretar y no requiere un trabajo exhaustivo previo (NMX-C-514-

ONNCCE-2019, 2019) y está dado por la ecuación 10 mostrada a continuación en Ohm-cm.

$$\rho = R_c \left( \frac{A}{L} \right) \quad (10)$$

### **3.8.4 Frecuencia de resonancia en vigas y determinación del módulo de elasticidad dinámico de Young.**

Tiene como objetivo determinar las frecuencias fundamentales transversal, longitudinal y torsional de prismas y cilindros de concreto con el propósito de calcular el módulo dinámico de elasticidad de Young siguiendo la ecuación 11, el módulo dinámico de rigidez (algunas veces designado como el módulo de elasticidad al corte) y la relación dinámica de Poisson (NMX-C-089-ONNCCE-2019, 2019). En kg/cm<sup>2</sup>.

$$E = DW (n')^2 \quad (11)$$

## **3.9 Pruebas destructivas en concreto endurecido.**

### **3.9.1 Compresión simple en cilindros.**

El objetivo de esta prueba, es determinar la resistencia que presenta el concreto al ser sujeto a una carga de compresión simple. Lo cual significa que se le aplicará una carga axial concéntrica al cilindro de concreto (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014). Con la ecuación 12 podemos determinar la resistencia a la compresión en kgf/cm<sup>2</sup>.

$$F'c = F/A \quad (11)$$

### **3.9.2 Tensión por compresión diametral.**

El objetivo de esta prueba consiste en determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral en especímenes cilíndricos de concreto, esta norma se rige bajo la normativa. (NMX-C-163-ONNCCE-2019, 2019) esto se expresa mediante la ecuación 12 dada a continuación y expresada en kgf/cm<sup>2</sup>.

$$T = \frac{2P}{\pi L d} \quad (12)$$

### **3.9.3 Módulo de elasticidad estático.**

El módulo de elasticidad es la relación que existe entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias del concreto, el objetivo de esta prueba es determinarlo.

Para llevar a cabo esta prueba es necesario contar como mínimo con dos especímenes de las mismas características de elaboración, ya que se requiere llevar uno de ellos a la falla mediante la prueba de compresión simple, esto para poder calcular el 60% del esfuerzo final, lo cual nos servirá para la obtención del módulo de elasticidad del segundo espécimen (NMX-C-128-ONNCCE-2019, 2019). Expresado en la ecuación 13 en kgf/cm<sup>2</sup>.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (13)$$

### 3.9.4 Flexión en vigas, módulo de ruptura.

El objetivo de esta prueba es la determinación a la resistencia a la flexión del concreto, usando una viga simple con cargas concentradas en los tercios del claro. Este ensayo se emplea muy frecuentemente para el control de calidad del concreto empleado en pavimentos de concreto (NMX-C-191-ONNCCE-2015, 2015) El módulo de ruptura es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión para una viga, expresado en kgf/cm<sup>2</sup> y dado por la expresión 14.

$$R = \frac{P L}{b d^2} \quad (14)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Agregados pétreos.

#### 4.1.1 Densidad de la arena y grava.

Tabla 1. Densidad de la arena.

Muestra	Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	
	Dr sss.	Promedio.
1	2.727	2.714
2	2.702	

Tabla 2. Densidad de la grava.

Muestra	Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	
	Dr sss.	Promedio.
1	2.181	2.183
2	2.185	

#### 4.1.2 Humedad de absorción en arena y grava.

Tabla 3. Humedad de absorción de la arena

Muestra	Humedad absorción (%)	
	Ha	Promedio.
1	3.27	3.45
2	3.63	

Tabla 3. Humedad de absorción en grava.

Muestra	Humedad absorción (%)	
	Ha	Promedio.
1	8.54	8.54
2	8.54	

4.1.3 MVSS y MVSV en arena y grava.

Tabla 4. Masa volumétrica seca y suelta y seca y varillada en grava y arena.

Muestra	MVSS y MVSV (g/cm <sup>3</sup> )				
	Material	MVSS	Promedio.	MVSV	Promedio.
1	Arena	1.056	1.064	1.158	1.16
2	Arena	1.072		1.162	
1	Grava	1.467	1.483	1.606	1.615
2	Grava	1.500		1.624	

4.1.4 Análisis granulométrico en arena.

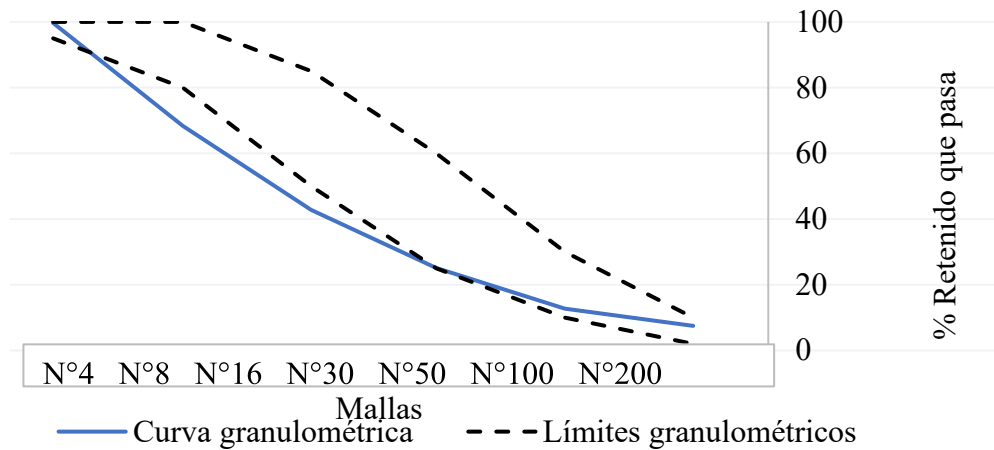


Ilustración 1 Curva granulométrica de la arena.

4.1.5 Análisis granulométrico en grava.

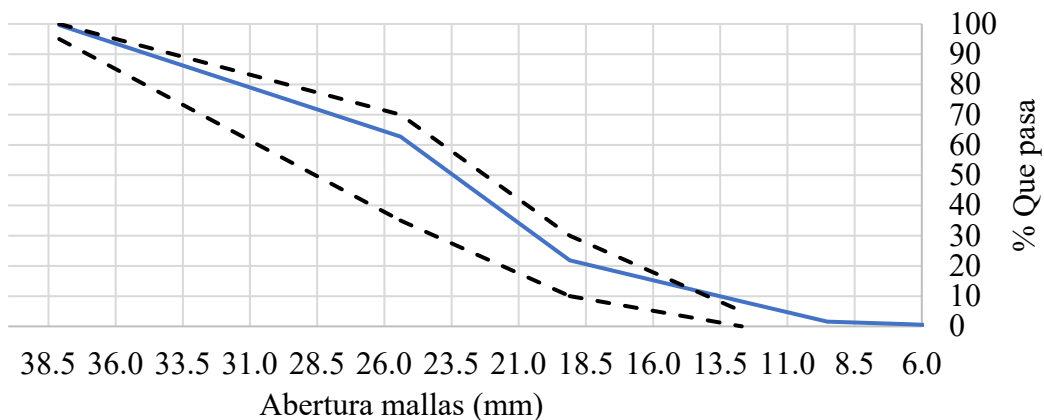


Ilustración 2 Curva granulométrica de la grava.

## 4.2 Caracterización del cemento.

### 4.2.1 Consistencia normal del cemento y tiempos de fraguado.

Tabla 5. Consistencia normal del cemento.

Muestra	Tiempos fraguado (min)	
	Inicial	Final
1	164	459
2	171	463

Tabla 6. Tiempos de fraguado del cemento

Muestra	Consistencia normal (%)	
	CN	Promedio.
1	35.0	35.0
2	35.0	

## 4.3 Diseño ACI

Tabla 7. Diseño ACI para la elaboración de las mezclas por metro cúbico.

Material.	Cantidad de material para un metro cúbico (kg)		
	Mezcla testigo	Mezcla FP-5%	Mezcla FP-10%
Cemento	349.5	349.5	349.5
Agua	216	216	216
Arena	633.67	601.98	570.3
Grava	889.06	889.06	889.06
Plástico	0	31.69	63.37

## 4.4 Pruebas en concreto endurecido.

### 4.4.1 Resistencia a la compresión.

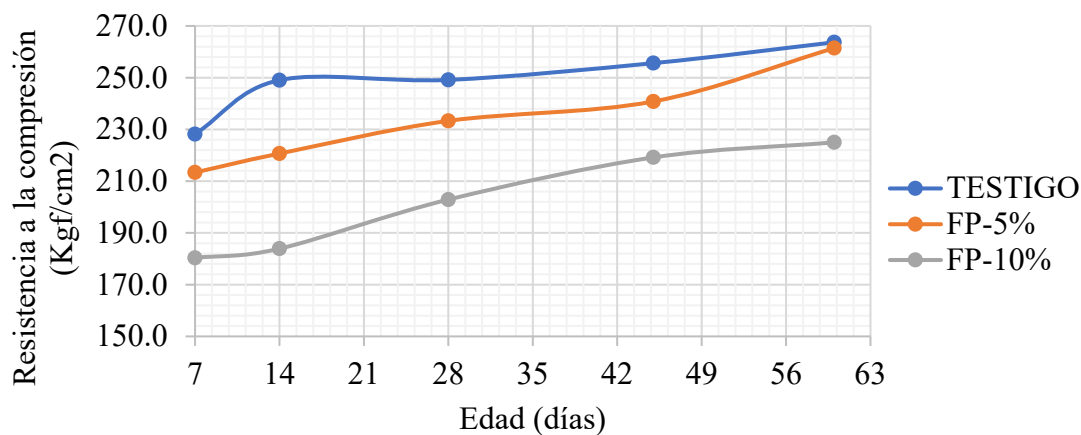


Ilustración 3. Resistencia a la compresión de las mezclas.



#### 4.4.2 Tensión por compresión diametral.

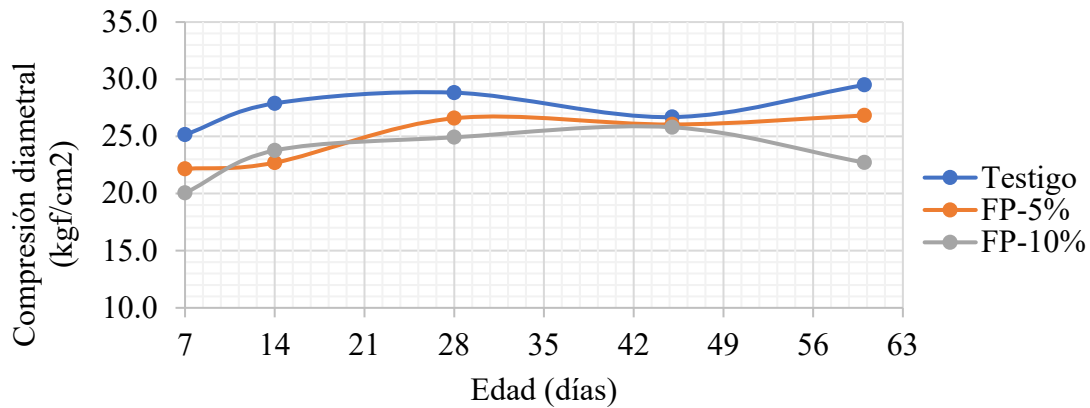


Ilustración 4. Tensión por compresión diametral de las mezclas.

#### 4.4.3 Módulo de ruptura por flexión.

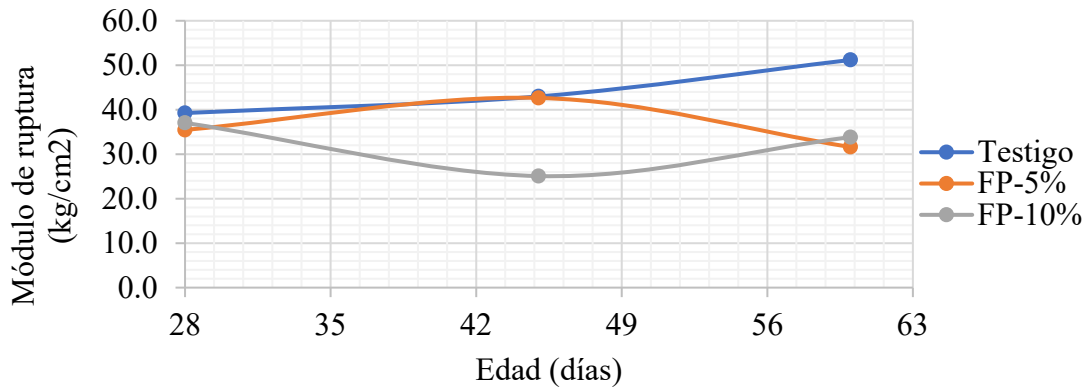


Ilustración 5. Módulo de ruptura en vigas

#### 4.4.4 Resistividad eléctrica.

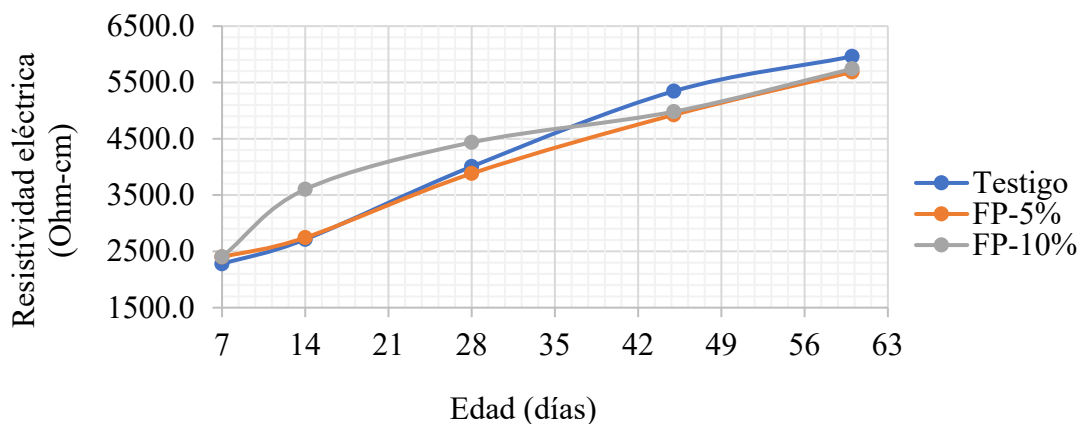


Ilustración 6. Resistividad eléctrica de los cilindros

#### 4.4.5 Velocidad de pulso ultrasónico.

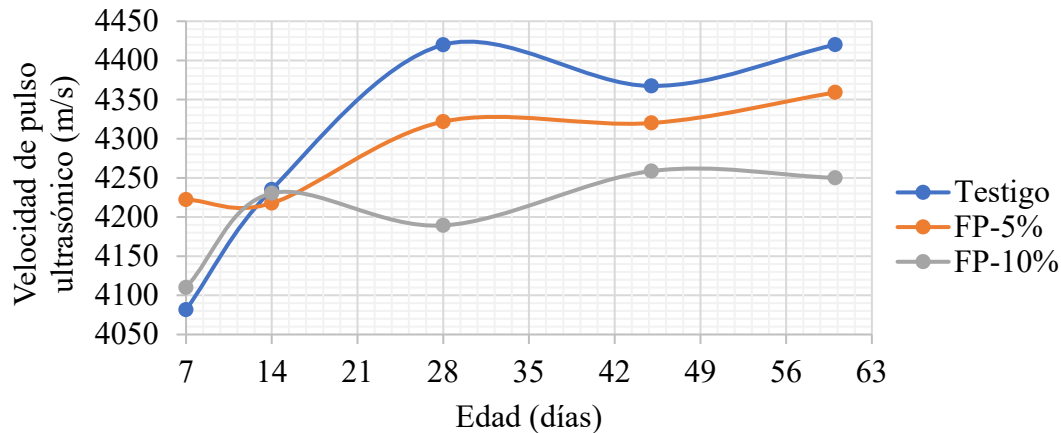


Ilustración 7. Velocidad de pulso de las mezclas.

## 5. CONCLUSIONES

Las mezclas con sustituciones plásticas se comportaron de manera adecuada respecto a la mezcla testigo, siendo la mezcla FP-5% la más semejante. Esta mezcla obtuvo una resistencia a la compresión axial simple de 267.23 kg/cm<sup>2</sup> a los 60 días de edad, alcanzando el 106.9 % de la resistencia de proyecto, mientras que la mezcla FP-10% obtuvo un 90.75 % de resistencia respecto a la de proyecto a los 60 días de edad.

En la prueba de velocidad de pulso las mezclas testigo y FP-5% nuevamente arrojaron resultados muy similares entre sí, los criterios de durabilidad están a favor de estas mezclas considerándose como valores “buenos” y ya que este parámetro es ampliamente interrelacionado con factores del material dado es un excelente indicativo de la calidad del concreto.

Las mezclas se comportaron de manera deficiente en la prueba de resistividad eléctrica, por lo que se debe tener cuidado con el diseño de estas en lugares donde exista demasiada agresividad del ataque de sulfatos y cloruros y exista alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

En cambio las estructuras pueden ser de una durabilidad “buena” si se toman en cuenta estos factores y un periodo de retorno adecuado al tipo de edificación.

De manera general, el mejor comportamiento de las mezclas plásticas fue dado por la mezcla FP-5% la cual está por encima de las expectativas en las pruebas destructivas y estando en el límite de las pruebas no destructivas. En tanto, es posible y muy factible el uso del plástico triturado como sustitución de agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico tanto en uso estructural como en usos no estructurales, presentando una buena alternativa para el control del plástico de desecho.

## 6 REFERENCIAS.

- NMX-C-057-ONNCCE-2015. (2015). *Cementantes hidráulicos -Determinación de la consistencia normal-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-059-ONNCCE-2017. (2017). *Cementatntes hidráulicos -Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat-*. ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. (2004). *masa volumétrica-método de prueba*. México, DF.: ONNCCE.

- NMX-C-077-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción – Agregados para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (2014). *Determinación de la resistencia a la compresión en especímenes de concreto -método de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-089-ONNCCE-2019. (2019). *Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torcional de especímenes de concreto -Especificaciones y métodos de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-109-ONNCCE-2010. (2010). *Determinación del cabeceo de especímenes*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE-2018. (2018). *Agregados para concreto hidraulico -Especificaciones y métodos de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-128-ONNCCE-2019. (2019). *DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE-2010. (2010). *Gabinets, cuartos humedos y tanques de almacenamiento -Condiciones de diseño y operación-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE-2020. (2020). *DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *Elaboración y curado de especímenes de ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-163-ONNCCE-2019. (2019). *Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción - Agregados -Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE-2018. (2018). *-Agregados- Contenido de agua por secado-Método de ensayo*. México: Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-170-ONNCCE-2019. (2019). *Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los ensayos*. México: Diario oficial de la federación.
- NMX-C-191-ONNCCE-2015. (2015). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*. ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE-2020. (2020). *Determinación de la velocidad de pulso ultrasonico a traves del concreto*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *RESISITVIDAD ELECTRICA DEL CONCRETO HIDRAULICO -Especificaciones y método de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-530-ONNCCE-2018. (2018). *Industria de la construcción -Durabilidad- Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado- Criterios y especificaciones-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-569-ONNCCE-2020. (2020). *Industria de la Construcción – Durabilidad del Concreto – Diseño con Criterios de Durabilidad del Concreto Utilizado en Estructuras de Concreto con Acero de Refuerzo – Especificaciones*. México, DF.: ONNCCE.
- NXM-C-414-ONNCCE-2017 . (2017). *Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. CDMX, México.: ONNCCE.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-773-MX  
pp. CC - 134 -146



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Análisis del comportamiento térmico en áreas verdes, de acuerdo con tipo de pavimentos y vegetación para clima templado húmedo

M. Santos<sup>1\*</sup>, R. Grajeda<sup>1</sup>, M. Mondragón<sup>1</sup>, F. Lagunes<sup>1</sup>, E. Alonso<sup>2</sup>, W. Martínez<sup>2</sup>, R. Silva<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [zs19001630@estudiantes.uv.mx](mailto:zs19001630@estudiantes.uv.mx)

<sup>1</sup> Programa Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, México

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

### RESUMEN

El objetivo de la investigación es realizar un catálogo de información del comportamiento térmico en relación con la vegetación en dos parques urbanos de clima templado, que en los estudios previos de islas de calor urbano presentan diferentes isotermas. La selección de los parques se realizó con base al mapa térmico de la región, realizado con Landsat8, el software ArcGIS y metadatos gubernamentales. Utilizando una metodología de mediciones “in situ” con cámara termográfica, en un día de verano a las 12:00 horas. La limitación de este trabajo es el tamaño de la muestra, ya que solo se enfoca dos parques seleccionados con una paleta de información para un futuro análisis comparativo de los mismos espacios urbanos en otra climatología. Sin embargo, la originalidad radica en ser el primer trabajo de este tipo realizado en la zona que toma en cuenta factores de vegetación, tipo de pavimento y humedad superficial. Como resultado se comprobó que la temperatura a la sombra de la vegetación en el pavimento es menor 7°C y la temperatura ambiental es 2°C menor. Concluyendo que una manera de mitigar las temperaturas ambientales en zonas urbanas en clima templado es la implementación de la vegetación endémica, sugerida en este trabajo, así como el uso de materiales claros en pavimentos.

**Palabras clave:** temperatura ambiental; temperatura superficial; isla de calor urbano; vegetación; pavimento.

## 1. INTRODUCCIÓN

Si bien el clima urbano depende esencialmente de factores globales y regionales, factores locales y de microescala (como las diferentes características de la estructura urbana, la topografía y la superficie de las cubiertas de suelo, la vegetación, el calor antropogénico generado por el metabolismo urbano, ...) pueden modificar el clima local a escala urbana.

Existen diferencias significativas entre el clima de las áreas urbanas y rurales: la Isla de Calor Urbano (ICU) describe la influencia de las superficies urbanas en los patrones de temperatura de las áreas de las ciudades en comparación con las áreas circundantes. La superficie sellada del suelo y los materiales artificiales (especialmente el asfalto y concreto) que se usan generalmente en áreas urbanas son una de las principales causas (Arellano Ramos, 2018).

La ICU es la diferencia de temperatura a nivel de piso entre los microambientes urbanos y las áreas rurales cercanas a una ciudad, en otras palabras *“la ICU se genera por las modificaciones al balance energético causadas por la morfología de las ciudades y nuestras actividades cotidianas”* (Velasco, 2018).

Los efectos de este fenómeno se manifiestan en diferentes escalas, distinguiéndose dos tipos: "Isla de Calor a Nivel Dosel" e "Isla de Calor del Límite Urbano". El primero depende de la rugosidad del suelo generado por los edificios y altura de los árboles, con un límite superior ubicado justo por encima del nivel de los techos de los edificios. En esta capa, el flujo de aire y los intercambios de energía se rigen por procesos de microescala que dependen de las características específicas de la superficie.

El segundo está situado sobre el primero, con un límite inferior sujeto a la influencia de la superficie urbana en su conjunto. En la capa límite urbana, que es la parte de la capa límite atmosférica sobre los espacios urbanizados cuyas características se ven afectadas por la presencia de la ciudad, la ICU opera de una manera diferente, representando un fenómeno de mesoescala local. Es decir, de un fenómeno controlado por procesos que operan en una mayor escala espacial y temporal (Arellano Ramos, 2018).

La temperatura ambiental es el estado del ambiente que se manifiesta en el aire y en los cuerpos en forma de calor, en una gradación que fluctúa entre dos extremos que, convencionalmente, se denominan: caliente y frío. La temperatura superficial es la que los objetos emiten en forma de calor como resultado de su muy baja reflectancia solar, es decir, originada por su muy capacidad de absorber la radiación solar, lo que sin duda tiene implicaciones en el mayor calor que ingresa por ejemplo en los edificios y en la liberación prolongada de éste a la atmósfera, lo que produce el efecto conocido como ICU (CONACYT, 2018).

Estudios anteriores han demostrado que los espacios verdes urbanos, como los parques, pueden aliviar eficazmente los efectos de ICU. Las plantas y árboles pueden mejorar el confort ambiental interior y exterior, al tiempo que brindan muchos servicios ambientales, como almacenamiento de carbono, reducción de la contaminación del aire y creación de hábitats para la biodiversidad urbana. La vegetación urbana también puede mejorar la calidad de vida y permitir que las personas entren en contacto con la naturaleza, mejorando sus niveles de confort. La integración de los espacios verdes en la planificación urbana y el diseño arquitectónico son, por lo tanto, esenciales para adaptarse y mitigar los choques térmicos de los procesos urbanos. En la literatura se han registrado diferentes niveles de enfriamiento de las áreas verdes, con estudios de mediciones de la temperatura del aire que muestran que el efecto de enfriamiento de los parques varía de 1 a 7 °C (Xiao, 2018).

Un claro ejemplo de los efectos de la ICU es la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. La desmedida urbanización y el aumento de la población humana han llevado a generar un cambio climático en el que la diferencia máxima de temperatura entre el área urbana y rural puede ser normalmente de 3 a 5 °C. Sin embargo, en días especiales, dependiendo de las características

meteorológicas, la diferencia de temperatura puede llegar a ser de hasta 10 °C; por ejemplo, la zona centro de la Ciudad de México contra el área rural, como Xochimilco (Barradas, 2013). La respuesta a esta problemática fue colocar en puntos estratégicos dos especies arbóreas que proliferan en el área urbana: el hule (*Ficus elastica*) y el trueno (*Ligustrum lucidum*). Estas especies fueron elegidas por su capacidad transpiratoria de hasta 0.2 L/h y un índice de área foliar de 10, es decir que, durante el día, las hojas transpiran una cantidad de agua suficiente como para mantener la temperatura cerca de 7 °C por debajo de la que alcance la zona con cemento. En este proceso de transpiración, la evaporación del agua requiere de 312 W/m<sup>2</sup> y si la radiación neta es de 450 W/m<sup>2</sup>, la temperatura del aire sería de 19.2 °C, sin tomar en cuenta la ventilación por las ráfagas de viento que puedan suceder, advirtiendo que, sin este proceso de transpiración de las hojas de los árboles, la temperatura del aire se elevaría hasta 26.3 °C.

Los investigadores, nos dicen que los espacios verdes urbanos pueden contribuir a una amplia gama de necesidades en los ecosistemas, entre los cuales la mitigación de la temperatura se considera un importante servicio de regulación (Braat and Groot, 2012; Riechers et al., 2016).

La composición de los materiales usados en las envolventes edificatorias (suelos, fachadas y azoteas) es uno de los principales factores que influyen en la temperatura superficial. La literatura especializada ha enfatizado que el área edificada, la superficie permeable y provista de vegetación, así como la superficie impermeable (áreas pavimentadas y construidas) tienen un impacto significativo en la generación de la ICU. En este sentido, la reducción de la vegetación afecta no solo al aumento de la Temperatura Superficial del Suelo (TSS), sino también a la reducción de la precipitación y la evapotranspiración. La relación entre el TSS e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN) está especialmente bien documentada (Arellano Ramos, et. al., 2018).

Los espacios verdes pueden generar un efecto de enfriamiento en la TSS a través de niveles más altos de evapotranspiración en comparación con las superficies impermeables (Zhou et al., 2014; Zhao et al., 2014). Algunas investigaciones han demostrado que la TSS media fue de 6 a 12 °C más alta para las superficies impermeables en comparación con los espacios verdes (Kuang et al., 2015) (Sun, 2017).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Análisis de sitio

El presente trabajo se realizó en Morelia, como se puede observar en la Figura 1 y Figura 2 esta es la ciudad más extensa y poblada del estado de Michoacán con 743,275 habitantes en el año 2020; en su núcleo urbano, en la conurbación (la mancha urbana) cuenta con 835,214 hab., el municipio de Morelia cuenta con 849,053 hab. y su zona metropolitana con 988,704 hab., constituyéndose así como la 18ª área metropolitana más poblada de México. El clima de la capital es templado húmedo, la temperatura media anual (municipal) oscila entre 16 °C y las temperaturas extremas registradas han sido de 34 °C como máxima y de -5.2 °C como mínima.

Las zonas de estudio están ubicadas dentro del Centro Histórico de la ciudad de Morelia, Michoacán. Construida en lo alto de una colina en el siglo XVI, Morelia ofrece un ejemplo excepcional de planificación urbanística en la que se fusionan los conceptos del Renacimiento español con la experiencia mesoamericana. Sus calles, perfectamente adaptadas a las laderas de la colina, conservan su trazado primigenio. La historia arquitectónica de la ciudad puede leerse en sus más de doscientos edificios históricos. Construidos con la piedra de color rosa característica de la región, estos monumentos ponen de manifiesto la magistral y ecléctica fusión del espíritu medieval con elementos renacentistas, barrocos y neoclásicos (UNESCO, 1991).

Estudios recientes, realizados con sistemas de información geográfica a nivel de paisaje (J. Fuentes-Junco, 2001), indican que el matorral subtropical es el tipo de vegetación dominante,

abarcando poco más del 24% de la superficie total de la cuenca; en orden decreciente le siguen el bosque mixto de pino-encino (13%), el bosque de encino (7%), el bosque de pino (1%) y el bosque de oyamel (0.1%). Producto de la conversión de ecosistemas naturales a la agricultura, los campos agropecuarios son un componente importante del paisaje en la Cuenca de Cuitzeo, los cuales representan alrededor del 40% de la cobertura del terreno (Madrigal-Sánchez & Guridi-Gómez, 2002).

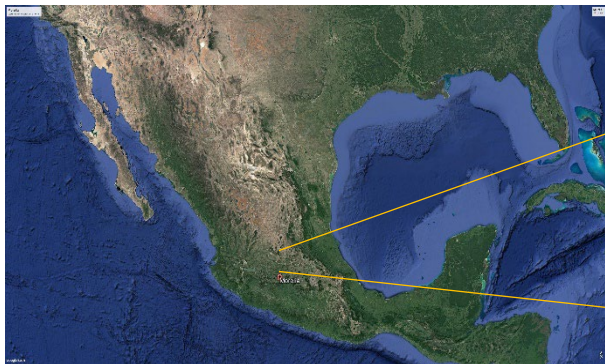


Figura 1. Ubicación del país donde se desarrolla la investigación. México.

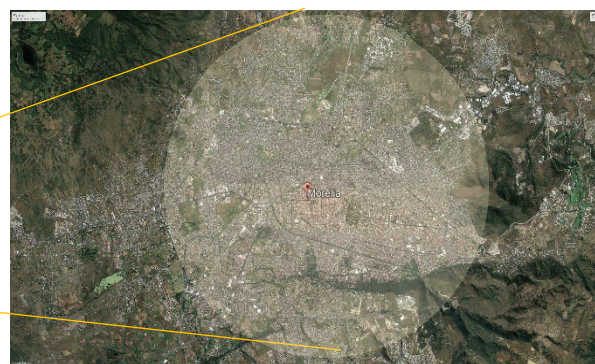


Figura 2. Estado y ciudad donde se desarrolla la investigación, Morelia, Michoacán

## 2.2 Mapa térmico

Como antesala a la investigación de campo, se elaboró por medio de técnicas de detección remota, un mapa térmico de Morelia, Michoacán. Como primer paso se ocupó el sitio de la USGS (2022) para adquirir los datos que posteriormente se ocuparían en el programa ArcGis, para generar el mapa. Los datos que se recopilaron son del 01 al 30 de julio de 2021. Se busca que sean lo más reciente y en el mismo lapso que se harán las pruebas in situ para que sean verídicos y puedan compararse. Posteriormente, se ocupó la información de Landsat 8 (por sus siglas en inglés, Landsat Data Continuity Mission), el satélite transporta Generador de imágenes terrestres operacionales (OLI, por sus siglas en inglés Operational Land Imager) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS) instrumentos. El OLI mide en las porciones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR, NIR y SWIR) del espectro. El TIRS mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Las imágenes de Landsat 8 tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multiespectrales de 30 metros a lo largo de una franja de 185 km (115 millas) se consiguió la información necesaria para el software ArcGIS y metadatos gubernamentales, se elaboró un mapa térmico de la región de estudio (USGS, 2022).

Teniendo los datos anteriores, se empleó el programa ArcGis, se ocuparon únicamente las bandas B10, B5 y B4 en un procedimiento de múltiples pasos, comandos y fórmulas, para conseguir los datos: Porcentaje de Vegetación, Áreas de Vegetación y Temperatura de la Superficie.

Con el mapa que se observa en la Figura 3, se detecta y comparara las áreas verdes dentro del Centro Histórico de Morelia. Se distinguen mediante el color, las partes rojas muestran las temperaturas más altas y las azules las más bajas o confortables. El presente documento se basa en el análisis de dos espacios urbanos que en los estudios de ICU presentaran diferentes isotermas.

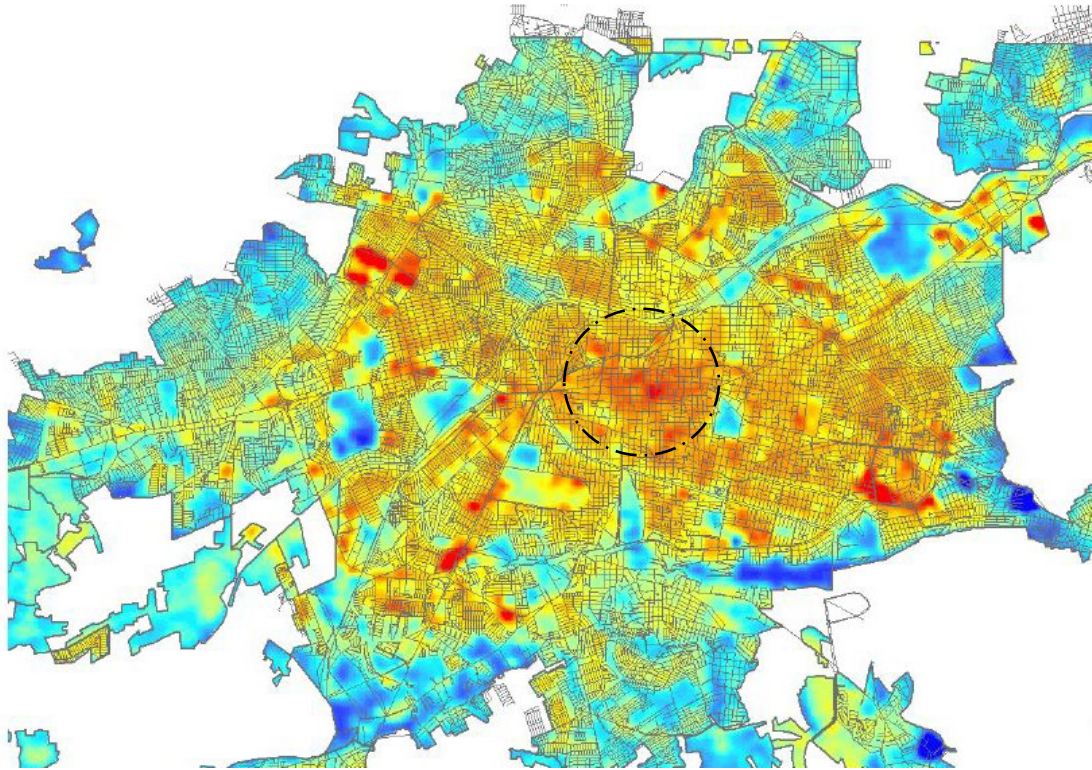


Figura 3. Mapa térmico de la Ciudad de Morelia, Michoacán. Señala el área de estudio, el Centro Histórico, donde se muestran temperaturas muy altas.

### 2.3 Zonas de estudio

Mediante el análisis del mapa térmico se eligieron dos áreas urbanas arboladas, las cuales se muestra en la Figura 4, las presentan un contraste en la TSS.

La zona arbolada uno (Figura 5), elegida por su variante isotérmica en el mapa térmico, es la Plaza Niños Héroe (19°42'8.76"N, 101°12'10.25"), su pavimento es de cantera y se presenta en dos distintos tipos de tonalidades, uno claro y uno oscuro. El perímetro de la plaza es de 312.68 m y el área es de 4,379.65 m<sup>2</sup>. Su forma es un polígono irregular de 4 lados, como una *cuchilla* (como coloquialmente se le conocen) yacen árboles, pinos y plantas endémicas, por lo tanto, el centro de la plaza recibe incidencia solar directa. Además, tiene una fuente de cantera en el extremo más angosto de la plaza. La plaza colinda del lado norte con una Avenida principal de asfalto, de igual forma en el lado este y oeste. La calle ubicada en el lado sur es de adoquín. La única sombra que recibe es de los árboles, ya que los edificios, todos de cantera, que lo rodean no son tan altos ni están tan próximos al parque.

El Jardín de la Soterraña (19°41'56.36"N, 101°11'47.60"O) (Figura 6), es el segundo espacio arbolado elegido y en el mapa térmico, ya antes mencionado, muestra temperaturas confortables. Su planta es rectangular su perímetro es 244.36 m y el área de 2,651.24 m<sup>2</sup>. El jardín tiene en el medio una fuente de cantera, también el pavimento y el mobiliario urbano son del mismo material, cantera. La distribución espacial, es decir, los recorridos que se pueden realizar por el peatón dentro del parque están dictada por la vegetación. El punto central es la fuente y de ella nacen líneas concéntricas que son los espacios de tránsito y el espacio sobrante es para ordenar la vegetación. Del mismo modo que el parque anterior, el Jardín Soterraña cuenta con árboles, pinos y plantas endémicas. La colindancia norte y la sur del Jardín de la Soterraña, consta de una vialidad asfáltica de dos carriles y de edificaciones de cantera, de no más de dos plantas. Al este se encuentra una calle asfáltica de tres carriles con construcciones de cantera de una sola planta. En el oeste se



encuentra un cañón urbano de cantera, con establecimientos comerciales hasta 3 plantas.



Figura 4. Ubicación de las dos áreas de estudio dentro del Centro Histórico de Morelia



Figura 5. Plaza de los Niños Héroes



Figura 6. Jardín de la Soterraña.

**2.4 Equipos de medición** Cámara térmica por infrarrojos portátil, modelo TOPDON ITC629, se observa en la Figura 7:

- Rango de temperatura:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sensibilidad  $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Resolución  $220 \times 160$  pantalla a color de  $3.2''$  ( $8.13\text{ cm}$ )
- Resolución térmica de  $220 \times 160$  con un rango de temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Cinco paletas de colores y 4 modos de medición
- Emisividad ajustable de  $0.01$  a  $1.00$  con 4 tipos de modos de medición de objetos
- Amplio campo de visión de  $35 \times 26$  grados
- Memoria adicional incorporada de  $3\text{GB}$  para un almacenamiento conveniente



Figura 7. Empleo de cámara térmica en mediciones de campo

## HOBO

Registrador de datos de temperatura y humedad relativa HOBO U12-012 para TBS (Temperatura de Bulbo Seco) y HR (Humedad Relativa) (Figura 8):

- Rango en Temperatura:  $-20^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  °C ( $-4^{\circ}$  a  $158^{\circ}$  °F)
- Rango en HR: 5% a 95% RH
- Rango en intensidad de la luz: 1 a 3000 lúmenes / pie 2 (pedales)
- Exactitud, en Temperatura:  $\pm 0.35^{\circ}$  °C a  $25^{\circ}$  °C
- Exactitud en HR:  $\pm 2.5\%$  RH sobre 10 a 90% típico
- Resolución en Temperatura:  $0.03^{\circ}$  °C a  $25^{\circ}$  °C ( $0.05^{\circ}$  °F a  $77^{\circ}$  °F)
- Resolución en RH: 0.03%
- Temperatura de funcionamiento:  $-20^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  °C ( $-4^{\circ}$  a  $158^{\circ}$  °F)
- Memoria de 64K bytes (43,000 mediciones de 12 bits)
- Arranque programable y con botón pulsador
- Interfaz USB directa para una descarga rápida de datos, compatible con HOBO U-Shuttle de Onset para un transporte de datos conveniente
- El registrador de datos U12-012 es para uso en ambientes interiores



Figura 8. Mediciones in situ con HOBOS

### 2.5 Recorridos in situ para obtención de datos

La metodología que se empleó es de mediciones “in situ” con una cámara termográfica, 4 registradores de datos para temperatura y humedad HOBO. Las mediciones se realizaron el 24 de julio de 2022. La medición al primer parque se realizó en el lapso de las 12:24 PM a las 12:34 PM y en la segunda área de estudio se desarrollaron de 1:31 PM a 1:50. Se eligieron estos horarios porque es cuando el sol está en la posición más idónea y la radiación es mayor.

Los HOBOS midieron en pares y se programaron para tomar lecturas cada 10 segundos. Midieron a 1.50 metros aproximadamente, del nivel del suelo y a 1 metro de los muros de los edificios y autos, si estos se presentaban, para que la radiación de los muros no alterara los resultados. Con el mismo objetivo de no alterar los resultados, se le colocó en la parte superior a los HOBOS, una protección contra el sol. Se llevaron a cabo recorridos (de los dos espacios arbolados elegidos) en todo el perímetro, en las zonas con sombra de vegetación y en donde había incidencia solar directa al pavimento; también midieron la periferia de las fuentes. En total, proporcionaron los 4 HOBOS, 736 datos, de temperatura, humedad y luxes.

La cámara termográfica por infrarrojos portátil capturó la copa de los árboles, el césped, las plantas, el pavimento de los dos parques, los edificios y calles colindantes, las bancas, las fuentes. Todo lo anterior se registró en dos situaciones, a la sombra de la vegetación o a sol directo. Debido a que la cámara termográfica es muy sensible, para no modificar los datos, se ocuparon unos guantes especiales para que la temperatura corporal no interfiriera. Por otro lado, la cámara brindó datos de temperatura superficial: mínima, promedio y máxima.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados temperatura ambiental

Los datos obtenidos en las in situ de cada una de las áreas de estudio, se observan en la Tabla 1 y Tabla 2. Están clasificados de acuerdo con los minutos que duró cada parte del recorrido.

Tabla 1. Muestra un promedio de las temperaturas que se obtuvieron en los distintos recorridos dentro espacio urbano arbolado. Describe las condiciones en las que tomaron las mediciones con los HOBOS.

Plaza Niños Héroe	Temperatura ambiental	
	Hora	°C
Perímetro de la zona - bajo la sombra de los árboles	12:24:00 - 12:29:30	26.17
Transición del perímetro del parque al centro – bajo la sombra de los árboles	12:29:40 - 12:31:10	25.49
Centro del parque- con incidencia directa del Sol	12:31:20 - 12:33:40	25.45
Recorrido junto a la fuente – con incidencia directa del sol	12:33:50 - 12:34:50	25.02
	<b>Promedio</b>	25.53

Tabla 2. Muestra un promedio de las temperaturas que se obtuvieron en los distintos recorridos por el espacio urbano arbolado. Describe las condiciones en las que tomaron las mediciones con los HOBOS.

Jardín de la Soterraña	Temperatura ambiental	
	Hora	°C
Perímetro del parque - bajo la sombra de los árboles	13:31:00 - 13:35:00	26.30
Recorrido en el corredor urbano, orientación norte - bajo incidencia solar directa	13:35:40 – 13:36:50	26.01
Recorrido en la calle colindante, orientación este – bajo la sombra de los edificios	13:37:10 – 13:40:40	26.91
Recorrido en la calle colindante, orientación sur – bajo la sombra de los edificios	13:41:10 – 13:44:10	26.38
Recorrido en la calle colindante, orientación oeste – bajo incidencia solar directa	13:44:20 – 13:47:20	25.82
Recorrido junto a la fuente – bajo la sombra de los árboles	13:47:30 – 13:50:30	25.52
	<b>Promedio</b>	26.16

#### 3.2 Resultados temperatura superficial

Con la cámara termográfica se captaron las copas de árboles, los arbustos y césped. Además, los pavimentos de cantera de los parques y los pavimentos colindantes, de las vialidades y/o corredores urbanos (Figura 9 a 42).

3.2.1 Plaza de los Niños Héroeos (Figura 9 a Figura 26)

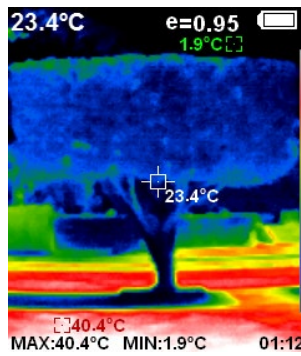


Figura 9. El árbol Ficus muestra una temperatura superficial de 23.4°C

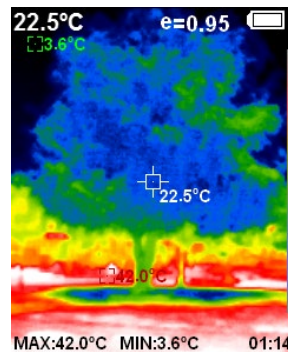


Figura 10. La copa del árbol muestra una temperatura superficial de 22.5°C

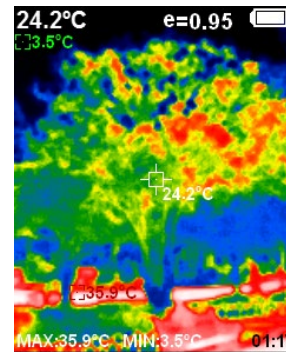


Figura 11. La copa del árbol Ficus muestra una temperatura superficial de 24.2°C

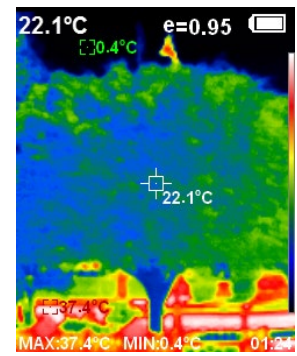


Figura 12. La copa del árbol muestra una temperatura superficial de 22.1°C

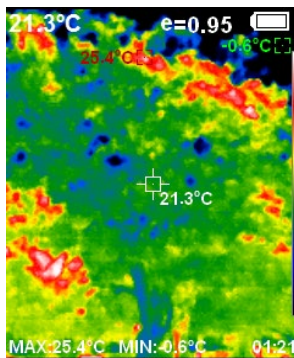


Figura 13. La copa del árbol Tepehuaje muestra una temperatura superficial de 21.3°C

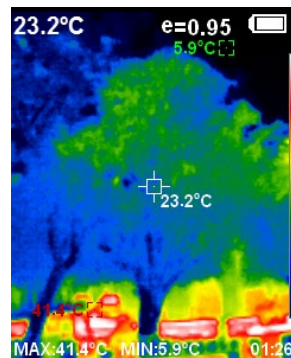


Figura 14. El árbol Madroño muestra una temperatura superficial de 23.2°C

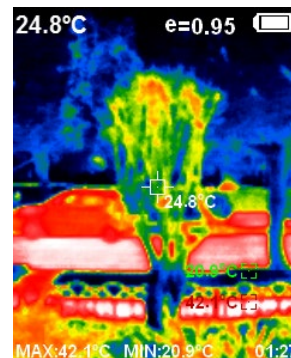


Figura 15. La copa del árbol Ficus muestra una temperatura superficial de 24.8°C

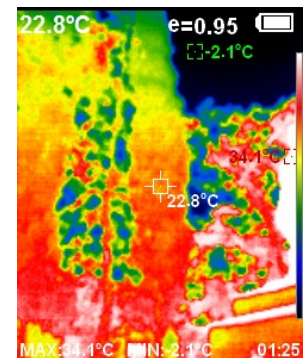


Figura 16. La copa del pino muestra una temperatura superficial de 22.8°C

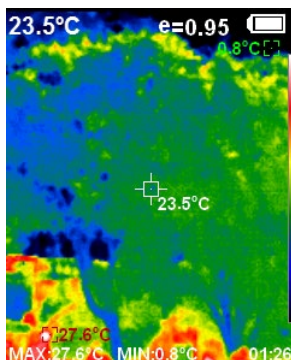


Figura 17. La copa árbol muestra una temperatura superficial de 23.5°C

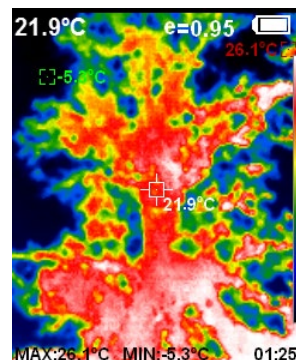


Figura 18. La copa del pino michoacano muestra una temperatura superficial de 21.9°C

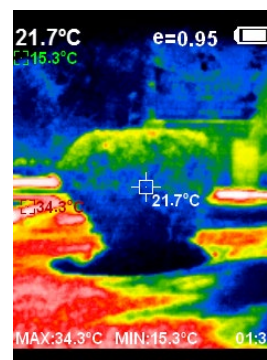


Figura 19. El arbusto muestra una temperatura superficial de 21.7°C

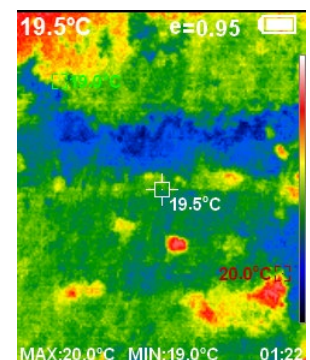


Figura 20. El césped muestra una temperatura superficial de 19.5°C

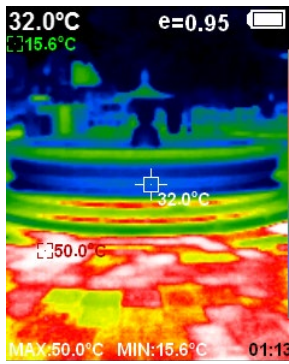


Figura 21. La fuente de cantera rosa tiene una temperatura superficial de 32.0°C

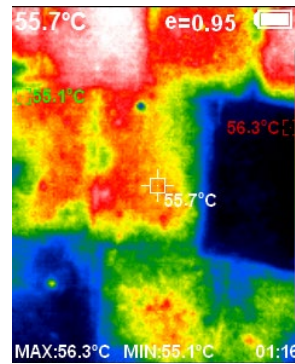


Figura 22. Pavimento de cantera oscura bajo incidencia solar directa presenta 55.7°C

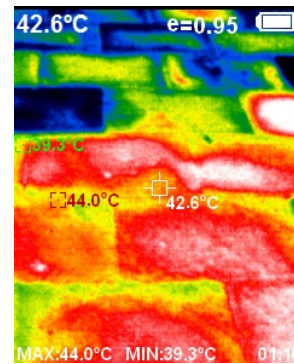


Figura 23. Pavimento de cantera clara bajo incidencia solar directa presenta 42.6°C

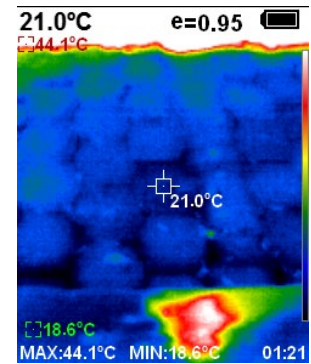


Figura 24. Pavimento de adoquín bajo sombra de un árbol 21.0°C

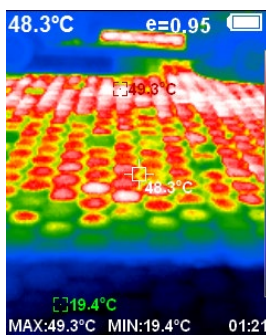


Figura 25. Pavimento de adoquín bajo incidencia solar directa 48.3°C

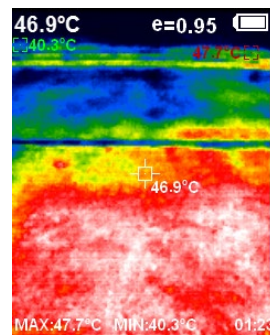


Figura 26. Pavimento de asfalto bajo incidencia solar directa presenta 46.9°C

### 3.2.2 Jardín de la Soterraña (Figura 25 a Figura 42)

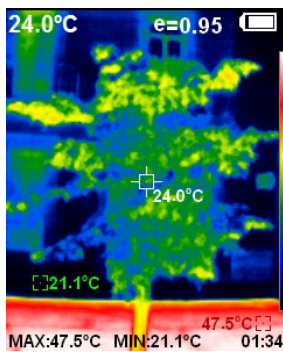


Figura 25. Copa de árbol presenta una temperatura superficial 24.0°C

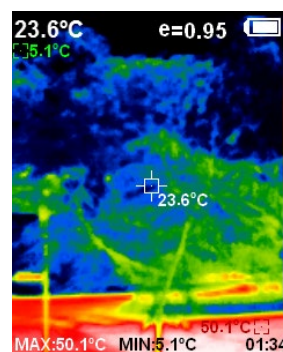


Figura 26. Copa de árbol presenta una temperatura superficial 23.6°C

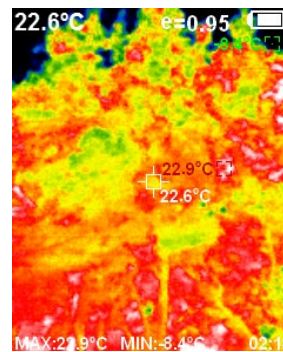


Figura 27. Copa de árbol presenta una temperatura superficial 23.6°C

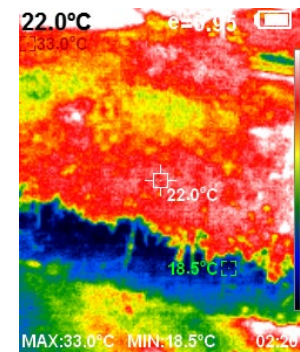


Figura 28. Copa de árbol presenta una temperatura superficial 22.0°C

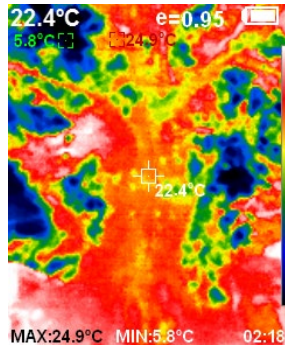


Figura 29. La copa del pino michoacano tiene una temperatura superficial de 22.4°C

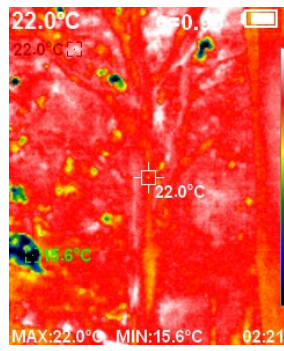


Figura 30. El árbol Parotilla muestra una temperatura superficial de 22.0°C

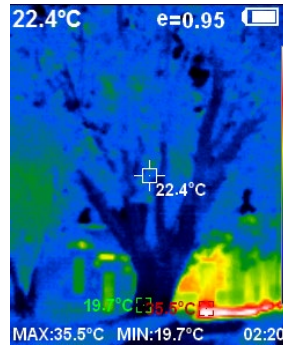


Figura 31. La copa del árbol muestra una temperatura superficial de 22.4°C

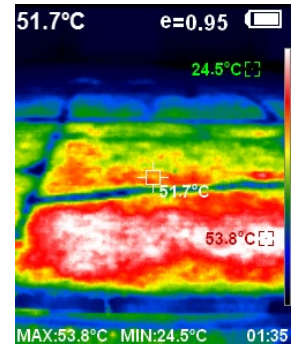


Figura 32. Pavimento de cantera rústica bajo incidencia solar directa temperatura superficial de 51.7°C

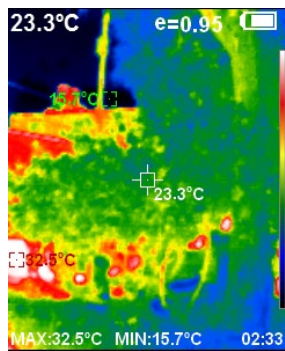


Figura 33. Copa de árbol presenta una temperatura superficial 23.3°C

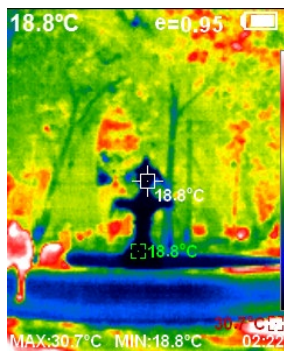


Figura 34. Fuente de cantera clara bajo la sombra de árboles presenta 18.8°C

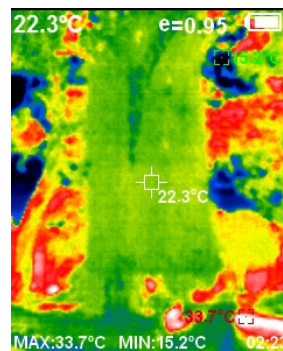


Figura 35. Tronco de árbol presenta una temperatura superficial 22.3°C

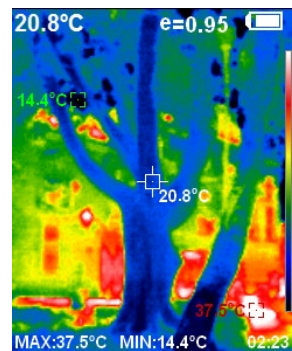


Figura 36. Tronco de árbol presenta una temperatura superficial 20.8°C

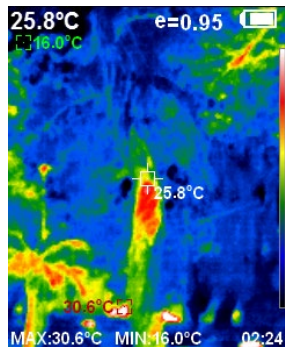


Figura 37. Temperatura superficial de la copa de un árbol 25.8°C

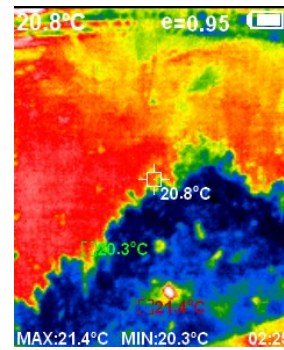


Figura 38. Temperatura superficial de un arbusto 20.8°C

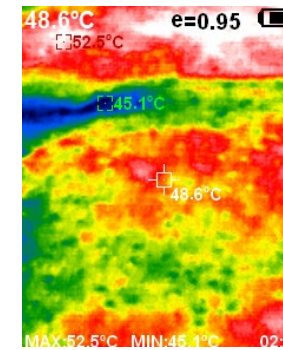


Figura 39. Pavimento de asfalto bajo incidencia solar directa presenta 52.5°C

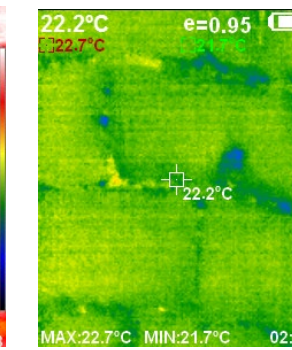


Figura 40. Pavimento cantera clara bajo sombra de árbol presenta 22.2°C

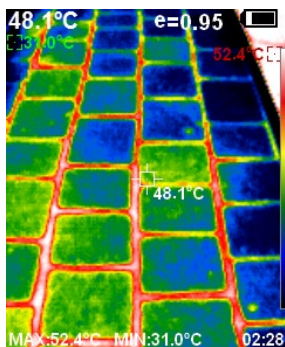


Figura 41. Pavimento cantera clara bajo incidencia solar presenta 48.1 °C

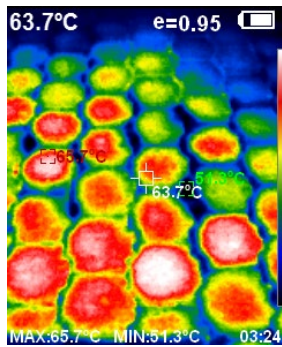


Figura 42. Adoquín bajo incidencia solar presenta una temperatura superficial de 63.7 °C

- Los árboles que mostraron una menor temperatura superficial son el árbol Tepehuaje (Figura 13) con 21.3 °C, el árbol Modroño (Figura 14) con 23.2 °C, el pino michoacano (Figura 18) con 21.9 °C y el árbol Parotilla (Figura 30) con 22.0 °C. Los cuatro árboles son endémicos de Michoacán.
- El árbol Ficus, ubicado únicamente en la Plaza de los Niños Héroes, presentó la temperatura más desfavorable en comparación a los mencionados anteriormente. Sin embargo, es la especie que más se repite en la zona arbolada. Presenta un rango de temperatura superficial, en 2 árboles distintos (Figura 9, Figura 15), que va de los 22.6 °C a 25.0 °C.
- El pavimento de adoquín presentó en una temperatura superficial promedio bajo incidencia solar de 56.0 °C y bajo la sombra de un árbol presentó 20.0 °C (Figura 24). Existe una diferencia de 36.0 °C.
- La cantera clara, un material propio de la región, se comporta en promedio ante la incidencia solar con una temperatura de 47.47 °C y bajo la sombra de vegetación, refleja una temperatura de 22.2 °C (Figura 24). La cantera de color oscuro llega a 55.7 °C. La diferencia de grados, únicamente por el color de material es de 8.2 grados, aproximadamente.
- El pavimento asáltico, en promedio registró una temperatura superficial de 51.2 °C. (Figura 24 y Figura 39).

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo está enfocado en un sitio con clima templado húmedo y con su vegetación endémica, no todos los lugares del país cuentan con estas características, aun así se experimenta el fenómeno de ICU. Es pertinente, que los análisis e investigaciones enfocados en las zonas arboladas y su relación con ICU, como este documento, se intente realizarlos en la mayor cantidad de ciudades. La literatura especializada reconoce que la vegetación dentro de los espacios urbanos es sumamente relevante, para el control de ICU, debido a su superficie permeable y que la vegetación es uno de los principales componentes del espacio urbano, que causa el confort térmico. Dentro del Centro Histórico de Morelia Michoacán, se propone la forestación, con especies endémicas, como una estrategia de enfriamiento en espacios urbanos. Con base a los datos de la investigación, es adecuada la implementación del Tepehuaje, el árbol Modroño, el pino michoacano y el árbol Parotilla; ya que logran bajar 2 °C la temperatura ambiental bajo la sombra de su follaje. Además, esta misma sombra consigue disminuir 36 °C la temperatura superficial del adoquín, mismo material que se encuentra como pavimento en variadas calles del Centro Histórico de Morelia. Por otro lado, logran un efecto similar con la cantera rosa, disminuyen su temperatura

superficial 25 °C, teniendo en cuenta que muchos de los edificios y calles del Centro Histórico son actualmente de cantera rosa, se puede lograr un confort térmico en las zonas peatonales, las vialidades y dentro de los mismos edificios.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo financiero de CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También, el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, es especial al Dr. Wilfrido Molina Martínez y a la Dra. Elia Alonso. Agradezco la Dra., Ruth María Grajeda Rosado, por su tiempo y por transmitirme sus conocimientos, de igual forma al Mtro. Max Mondragón Olán, investigadores de la Universidad Veracruzana, que a través del Programa Delfín me permiten llevar a cabo esta investigación. Del mismo modo, doy gracias a mis compañeros de movilidad de la Universidad Veracruzana, Pedro Cano, Fernanda Lagunes, Monserrat Saucedo e Ian Tapia, por ser mi equipo de trabajo para realizar las mediciones in situ.

## 6. REFERENCIAS

- AccuWeather. (s.f.). URL: <https://www.accuweather.com/es/mx/morelia/244418/july-weather/244418>
- Arellano Ramos, B. &. (2018). *Áreas verdes e isla de calor urbana. CTV 2018: XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual: “Ciudades y Territorios Inteligentes”*. UNCuyo, Mendoza: In Libro de proceedings.
- Barradas, V. L. (2013). *La isla de calor urbana y la vegetación arbórea*. Oikos, 14-16.
- L., M.-S. X. (2002). *Los árboles silvestres del municipio de Morelia, Michoacán, México*. Ciencia Nicolaita, 29:55.
- Sun, R. &. (2017). *Effects of green space dynamics on urban heat islands: Mitigation and diversification*. Ecosystem Services, 38-46.
- UNESCO (1991). URL: <https://whc.unesco.org/es/list/585>
- USGS (2022). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- Xiao, X. D. (2018). *The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park*. Sustainable Cities and Society, 428-439.





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-781-MX  
pp. CC- 147 - 157



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Análisis de propiedades mecánicas y electroquímicas en concreto con fibra de coco durante su curado

J. Cabanillas<sup>1\*</sup>, T. Pérez<sup>2</sup>, J. Gonzalez<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [jesuscabanillas.fic@uas.edu.mx](mailto:jesuscabanillas.fic@uas.edu.mx)

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México

### RESUMEN

En el presente trabajo se analizan y comparan las propiedades mecánicas y electroquímicas de un concreto con fibra de coco respecto al concreto convencional. Se buscó un diseño y propusieron las variables necesarias. Las propiedades mecánicas mejoraron con la fibra de coco, en los estudios electroquímicos aumentó la resistividad eléctrica y el potencial de corrosión se mantuvo en un rango de severo y alto de acuerdo con la ASTM C876, todo a 21 días debido al tiempo que se dispuso. Existen estudios similares, sin embargo, el añadirle los estudios electroquímicos es lo que lo distingue de los demás. Se determinó que la fibra de coco mejoró las propiedades mecánicas a los 21 días, por lo cual sería relevante darle seguimiento a los 28 y 90 días para observar el comportamiento del concreto.

**Palabras clave:** concreto; material alternativo; fibra de coco; corrosión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los materiales de construcción más utilizados es el concreto. El concreto es una mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades de interés, en las cuales destaca la resistencia a compresión y tensión por flexión. De acuerdo con las distintas necesidades que se presentan en la industria de la construcción, el concreto ofrece variadas soluciones gracias a su versatilidad. Con el desarrollo de las nuevas tecnologías, se ha estado buscando crear concretos bajos en emisiones o con bajo porcentaje de cemento, para acercarse a los objetivos de la agenda 2030. El uso de fibras en mezclas de concreto es con la finalidad de aumentar ciertas propiedades mecánicas, y así disminuir el agrietamiento, fisuras y agregar capacidad de carga posterior a su agrietamiento. En busca de utilizar alguna fibra natural como material alternativo, se reutilizaron los desperdicios en la producción y comercialización del coco, que es la fibra de este mismo. En el 2022, México ocupa el 7mo productor mundial de coco, produciendo y exportando miles de toneladas obteniendo distintos productos como lo son; alimentos, bebidas, cosméticos, fibras textiles, entre otros más que a su vez generan ciertos desperdicios. Se realizaron 3 mezclas, un concreto convencional o de referencia (M1), un concreto con 0.5% de fibra de coco respecto al cemento utilizado (M2) y un concreto con 1.0% de fibra de coco respecto al cemento utilizado (M3), para analizar y comparar los resultados en sus propiedades mecánicas y electroquímicas.

Por definición, la corrosión metálica puede entenderse como un proceso de transformación de un metal en un ion del mismo metal por la interacción química o electroquímica con el medio que lo rodea (Fontana et al., 2018). Este es un fenómeno que se pueden visualizar en construcciones donde se utiliza acero, en este caso se enfoca en el acero de refuerzo utilizado en estructuras de concreto.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Agregados

Previo a la realización del diseño de mezcla, se realizaron las pruebas a los agregados para obtener datos reales al momento de realizar la investigación. La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Campeche, Campeche, en esta zona el tipo de agregado que se utiliza es el triturado de roca para el agregado grueso y polvo de roca para el agregado fino, ambos derivados de la caliza. Se obtuvieron los agregados de una trituradora local, a los cuales se les hizo un muestreo de acuerdo con la NMX-C-030-ONNCCE-2004 Muestreo y reducción de acuerdo con la NMX-C-170-ONNCCE-2019 Reducción. Posteriormente se realizó la prueba de granulometría al agregado grueso de acuerdo con la NMX-C-111-ONNCCE-2018 (Figura 1) y al agregado fino de acuerdo con la NMX-C-077-ONNCCE-2019 (Figura 2), de aquí también se obtuvo el módulo de finura. Se determinó la absorción de los agregados de acuerdo con NMX-C-164-ONNCCE-2014 y NMX-C-165-ONNCCE-2014 y el contenido de agua de acuerdo con NMX-C-166-ONNCCE-2018 (Figura 3). Por último, el peso volumétrico suelto y compactado de ambos agregados, donde el tamaño máximo del agregado (TMA) fue de 9.5mm.

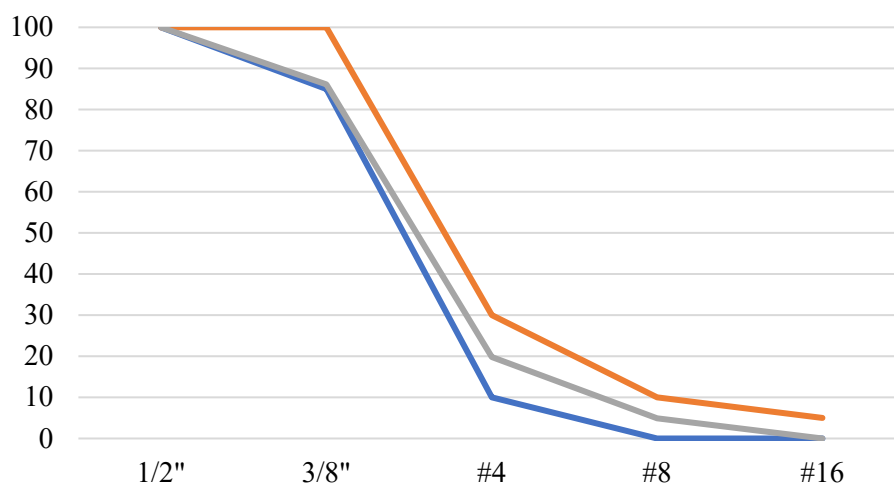


Figura 1. Curva granulométrica del agregado grueso

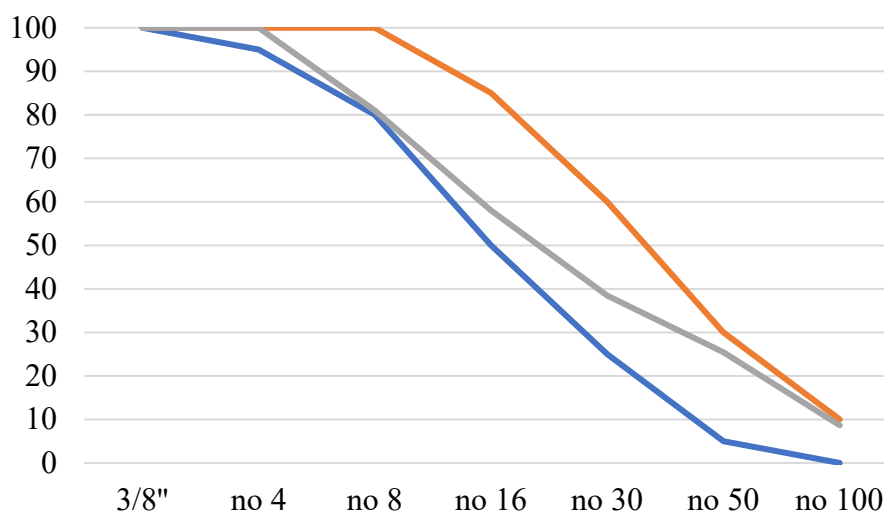


Figura 2. Curva granulométrica del agregado fino



Figura 3. Obtención de contenido de agua de los agregados

## 2.2 Fibra de coco

La fibra de coco se obtiene como residuo de los frutos cocoteros, estas fibras se extraen de manera manual. Es una materia prima muy interesante, ya que tiene la ventaja de ser abundante, disponible, renovable y barato. Los restos de frutos cocoteros se obtuvieron de un negocio ubicado en el mercado municipal de Campeche. Para su extracción, se retiró el material excedente del mesocarpio dejando así la pura fibra del fruto para después cortarla (Figura 4). Una vez retirada la fibra a utilizar se le dio un lavado y se recortaron a una longitud de 4 cm. Una vez secas las fibras se tamizaron para conocer su diámetro, el cual dio un valor de 0.63 mm. Hecho todo lo anterior, se almacenaron para su posterior uso.



Figura 4. Proceso de extracción de la fibra de coco

## 2.3 Diseño y elaboración de mezcla

Una vez ya definidas las pruebas a realizar (resistencia a la compresión, resistencia a la tensión por flexión, resistividad eléctrica y potencial de corrosión), se determinó la cantidad de especímenes a requerir, para saber la cantidad total de material a necesitar. Después, se realizó el diseño de mezcla a utilizar en el desarrollo de esta investigación, el cual se basó en el método planteado en el manual del American Concrete Institute (ACI) 211.1 y con los estudios realizados a los agregados anteriormente para un  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  (27.46Mpa). Se realizaron 3 mezclas, un concreto convencional o de referencia (M1), un concreto con 0.5% de fibra de coco respecto al cemento utilizado (M2) y un concreto con 1.0% de fibra de coco respecto al cemento utilizado (M3), para analizar y comparar los resultados en sus propiedades mecánicas y electroquímicas.

Una vez elaboradas las mezclas de manera manual, se le hizo la prueba de revenimiento de acuerdo con NMX-C-156-ONNCCE-2010 (Figura 5), cumpliendo con el revenimiento de diseño, se procedió a muestrear de acuerdo con la NMX-C-161-ONNCCE-2013 y la elaboración de especímenes para los ensayos de acuerdo con la NMX-C-159-ONNCCE-2016 (Figura 6).

Luego se realizaron pruebas de resistencia a la compresión (Figura 7a), resistividad eléctrica y potencial de corrosión (Figura 7b) a la edad de 7, 14 y 21 días, mientras que el ensaye de tensión por flexión a la edad de 21 días (Figura 7c). Las cantidades y materiales utilizadas en la M1 se muestran en la Tabla 1, la M2 en la Tabla 2 y la M3 en la Tabla 3.



Figura 5. Prueba de revenimiento



Figura 6. Elaboración de especímenes



a)



b)



c)



Figura 7. a) ensaye de compresión, b) pruebas electroquímicas y c) ensaye de tensión por flexión

Tabla 1. Materiales y cantidades utilizadas en la mezcla de referencia o blancos (M1).

M1	
Material	Cantidades (para 28L)
Cemento	12.2 kg
Agua	6.9 L
Grava	16.3 kg
Polvo de arena	28.7 kg
Aditivo fluidificante	48.8 mL

Tabla 2. Materiales y cantidades utilizadas en la mezcla con 0.5% de fibra de coco (M2).

<b>M2</b>	
<b>Material</b>	<b>Cantidades (para 28L)</b>
Cemento	12.2 kg
Agua	6.9 L
Grava	16.3 kg
Polvo de arena	28.7 kg
Aditivo fluidificante	48.8 mL
Fibra de coco	61 g

Tabla 3. Materiales y cantidades utilizadas en la mezcla con 1.0% de fibra de coco (M3).

<b>M3</b>	
<b>Material</b>	<b>Cantidades (para 28L)</b>
Cemento	12.2 kg
Agua	6.9 L
Grava	16.3 kg
Polvo de arena	28.7 kg
Aditivo fluidificante	48.8 mL
Fibra de coco	122 g

### 3. RESULTADOS

Se recolectaron todos los resultados en la Tabla 4 y se elaboró una gráfica para observar los comportamientos de desarrollo de las resistencias a compresión de las mezclas en estudio (Figura 8).

Tabla 4. Concentrado de resultados de los ensayos a compresión a 7, 14 y 21 días de edad

<b>Ensayos a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>7 días</b>	<b>14 días</b>	<b>21 días</b>
M1	175	188	201
M2	176	190	201
M3	197	214	222

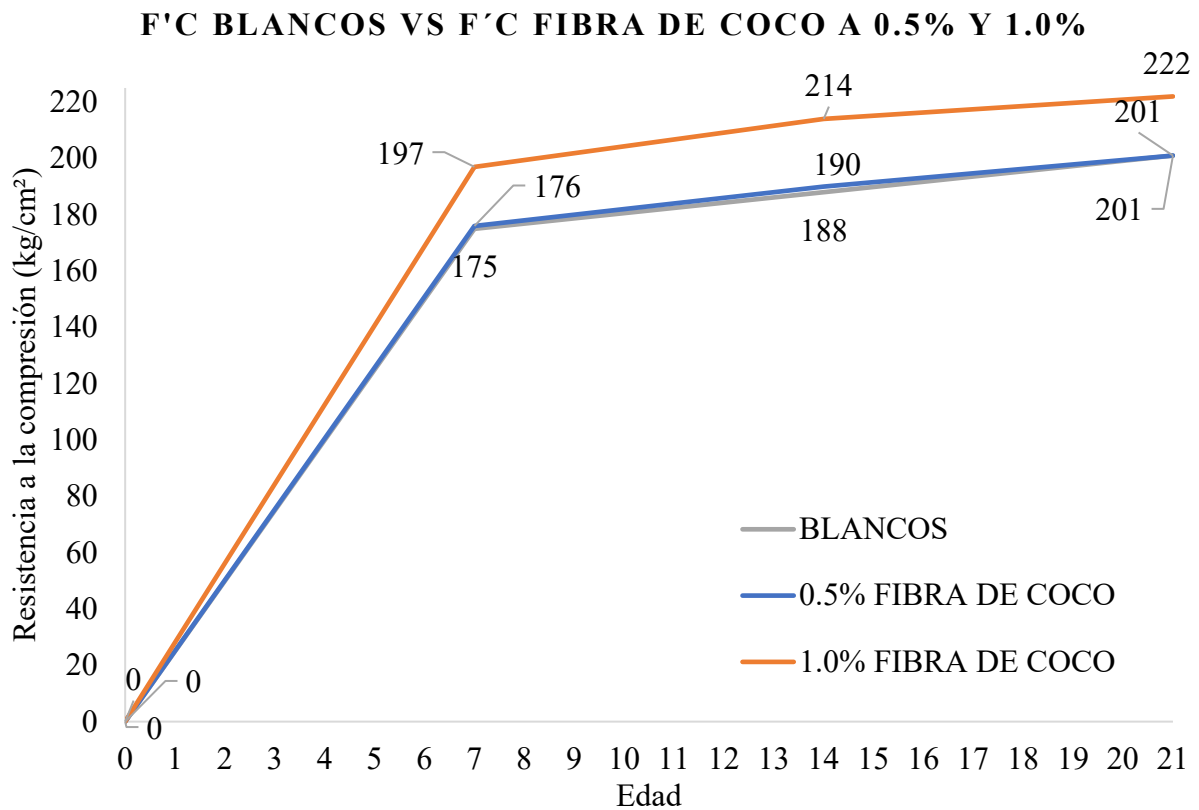


Figura 8. Resultados obtenidos en los ensayos de compresión de M1, M2 y M3.

La resistencia a compresión del concreto con fibra de coco mejoró, a los 21 días la M3 (1.0% de fibra de coco) obtuvo una  $f'c=222$  kg/cm<sup>2</sup> la cual es el 110% de la resistencia de la mezcla de referencia (concreto convencional) con un  $f'c=$ . Mientras que la M2 (0.5% de fibra de coco) a los 14 días mostró un incremento del 101% respecto a la M1. En la resistencia de tensión por flexión a los 21 días, la M2 obtuvo un módulo de ruptura del 103% y la M3 un módulo de ruptura del 136% respecto al concreto convencional, dicha información se puede ver en la Figura 9.

CLAVE	EDAD (DIAS)	ANCHO (Cm)	PERALTE (Cm)	L (Cm)	P <sub>máx</sub> (Kg)	MÓDULO DE RUPTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	MODULO DE RUPTURA (prom)
M1-V1	21 DIAS DE CURADO	5.00	5.2	20.2	152.53	34	39
M1-V2	21 DIAS DE CURADO	5.00	5.1	19.8	191.72	44	
M2-V1	21 DIAS DE CURADO	5.00	5	20	166.25	40	40
M2-V2	21 DIAS DE CURADO	4.97	5	20.2	162.33	40	
M3-V1	21 DIAS DE CURADO	5.33	5.13	20.3	240.712	52	53
M3-V2	21 DIAS DE CURADO	5.30	5.2	20	260.308	54	

Figura 9. Resultados obtenidos de la prueba de tensión por flexión

En cuanto a las propiedades electroquímicas, la resistividad aumentó, sin embargo, se siguió manteniéndose en un riesgo de corrosión de la varilla muy alto como se muestra en la Figura 10.

ESPECÍMENES BLACOS A 7 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M1-D1	6.7	10	2.54	1,069	-	-	-	X
	M1-D2	7.8	10	2.54	1,245	-	-	-	X
	M1-D3	8.7	10	2.54	1,388	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 0.5% DE FIBRA DE COCO A 7 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M2-D1	0.75	100	2.54	1,197	-	-	-	X
	M2-D2	0.7	100	2.54	1,117	-	-	-	X
	M2-D3	0.8	100	2.54	1,277	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 1.0% DE FIBRA DE COCO A 7 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M3-D1	7.95	10	2.54	1,269	-	-	-	X
	M3-D2	7.05	10	2.54	1,125	-	-	-	X
	M3-D3	6.3	10	2.54	1,005	-	-	-	X
ESPECÍMENES BLACOS A 14 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M1-D1	10.9	10	2.54	1,740	-	-	-	X
	M1-D2	9.3	10	2.54	1,484	-	-	-	X
	M1-D3	1.1	100	2.54	1,756	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 0.5% DE FIBRA DE COCO A 14 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M2-D1	9.5	10	2.54	1,516	-	-	-	X
	M2-D2	0.9	100	2.54	1,436	-	-	-	X
	M2-D3	1.3	100	2.54	2,075	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 1.0% DE FIBRA DE COCO A 14 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M3-D1	1.1	100	2.54	1,756	-	-	-	X
	M3-D2	1.8	100	2.54	2,873	-	-	-	X
	M3-D3	1.6	100	2.54	2,553	-	-	-	X
ESPECÍMENES BLACOS A 21 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M1-D1	8.4	10	2.54	1,341	-	-	-	X
	M1-D2	7.9	10	2.54	1,261	-	-	-	X
	M1-D3	10.6	10	2.54	1,692	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 0.5% DE FIBRA DE COCO A 21 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M2-D1	10.9	10	2.54	1,740	-	-	-	X
	M2-D2	8.7	10	2.54	1,388	-	-	-	X
	M2-D3	9.2	10	2.54	1,468	-	-	-	X
ESPECÍMENES CON 1.0% DE FIBRA DE COCO A 21 DÍAS DE CURADO					RIESGO DE CORROSIÓN				
Característica	ESPECÍMEN	Perilla de precisión	Multiplo	Distancia (cm)	$\Omega$ -cm	Despreciable	Bajo	Alto	Muy alto
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIA A SU USO.	M3-D1	1.2	100	2.54	1,915	-	-	-	X
	M3-D2	0.8	100	2.54	1,277	-	-	-	X
	M3-D3	0.9	100	2.54	1,436	-	-	-	X

Figura 10. Valores obtenidos de las pruebas de resistividad eléctrica

La prueba de potencial de corrosión se basó en los valores de la Tabla 1 del ASTM-C876 como se muestra en la Figura 11 y los resultados en la Figura 12.

Tabla 1: Condición de la corrosión de acuerdo al potencial eléctrico (ASTMC876-91 1999)

Valores de Potencial Eléctrico ASTM C876		Condición de la Corrosión
(mV vs SCE)	(mV vs CSE)	
< -476	< -500	Corrosión Severa
< -276	< -350	Alta (<90% de Riesgo de Corrosión)
-126 a -275	-350 a -200	Riesgo Intermedio de Corrosión
> -125	> -200	Bajo (10% de Riesgo de Corrosión)

Figura 11. Condiciones de corrosión de acuerdo con el ASTM-C876



		<b>blancos</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M1-D1	-521	X	-	-	-	
	M1-D2	-565	X	-	-	-	
	M1-D3	-602	X	-	-	-	
		<b>0.5 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M2-D1	-239	-	-	X	-	
	M2-D2	-311	-	X	-	-	
	M2-D3	-415	-	X	-	-	
		<b>1.0 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 7 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M3-D1	-462	-	X	-	-	
	M3-D2	-548	X	-	-	-	
	M3-D3	-385	-	X	-	-	

		<b>blancos</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M1-D1	-290	-	X	-	-	
	M1-D2	-400	-	X	-	-	
	M1-D3	-310	-	X	-	-	
		<b>0.5 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M2-D1	-290	-	X	-	-	
	M2-D2	-300	-	X	-	-	
	M2-D3	-300	-	X	-	-	
		<b>1.0 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 14 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M3-D1	-348	-	X	-	-	
	M3-D2	-429	-	X	-	-	
	M3-D3	-426	-	X	-	-	

		<b>blancos</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M1-D1	-423	-	X	-	-	
	M1-D2	-487	X	-	-	-	
	M1-D3	-412	-	X	-	-	
		<b>0.5 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M2-D1	-451	-	X	-	-	
	M2-D2	-308	-	X	-	-	
	M2-D3	-366	-	X	-	-	
		<b>1.0 % fibra de coco</b>		<b>Riesgo de corrosión</b>			
Característica	ESPECÍMEN	mv	Severo	Alto	Intermedio	Bajo	
ESP. A 21 DÍAS DE CURADO CON VARILLA ACONDICIONADA PREVIO A SU USO.	M3-D1	-394	-	X	-	-	
	M3-D2	-424	-	X	-	-	
	M3-D3	-394	-	X	-	-	

Figura 12. Resultados obtenidos de la prueba de potencial de corrosión

## 4. CONCLUSIONES

En base a la investigación y los resultados obtenidos se pudo concluir que:

- Un concreto con fibras de coco mejora sus propiedades mecánicas, lo cual es interesante observar a tempranas edades, se recomienda darle mayor duración para seguir monitoreando las propiedades a mayores edades y ver si sigue aumentando o disminuye, y así poder obtener una mejor respuesta en el aspecto de durabilidad.
- A la edad de 21 días no es suficiente para monitorear propiedades electroquímicas, por lo cual se harán estudios a edades mayores.

## 5. AGRADECIMIENTOS

A mis asesores, el Dr. Tezozomoc Pérez López y el M.C. Julio Cesar González Félix por sus asesorías a lo largo de esta investigación, siempre pendientes a las necesidades que se presentaban para poder llevarla con éxito. A la M.C. Josefa de los Ángeles Paat Estrella por el apoyo y asesoría brindado durante mi estancia de verano. Al Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) por abrirme las puertas en sus instalaciones.

A la Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas e Infraestructura (SEDUOPI) de Campeche por el apoyo brindado para la realización de las pruebas mecánicas de la investigación. A mis compañeros de la estancia de verano por su amistad, apoyo y intercambio de ideas. A todas las personas que hicieron posible el realizar mi estancia de verano. Por último y no menos importante, a mi familia por estar presentes en cada paso y por su apoyo incondicional.

## 6. REFERENCIAS

- ASTM International (2002). *ASTM C876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-de-copra-y-coco-en-mexico?idiom=es> Fecha de consulta: 6 de agosto del 2022.
- Fontana, M. G., Greene, N. D., & Dentistry, T. O. S. U. D. of M. E. U. of C. D. of M. and D. of R. (2018). *Corrosion Engineering*. xiii, 465 p.: <https://modps71.lib.kmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/310>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2004). *NMX-C-030-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Agregados – Muestreo*. ONNCCE
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2019). *NMX-C-170-ONNCCE-2019 Industria de la Construcción – Agregados – Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los ensayos*. ONNCCE
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2018). *NMX-C-111-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2014). *NMX-C-164-ONNCCE-2014 Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. ONNCCE
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2014). *NMX-C-165-ONNCCE-2014 Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. ONNCCE

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2019). *NMX-C-077-ONNCCE-2019 Industria de la Construcción – Agregados para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Ensayo*. ONNCCE

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2018). *NMX-C-166-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción - Agregados – Contenido de Agua por Secado - Método de Ensayo*. ONNCCE

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2010). *NMX-C-156-ONNCCE-2010 Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco*. ONNCCE

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2016). *NMX-C-159-ONNCCE-2016 Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. ONNCCE

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2013). *NMX-C-161-ONNCCE-2013 Industria de la Construcción – Concreto Fresco – Muestreo*. ONNCCE



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-791-MX  
pp. CC – 158 – 164



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Evaluación de la resistividad eléctrica y compresión simple en concreto hidráulico con sustitución de ceniza de bagazo de caña a edades tardías

Y. G. Rojas Olayo<sup>1\*</sup>, J. A. Velázquez Pérez<sup>1</sup>, W. Martínez Molina<sup>1</sup>, H. L. Chávez García<sup>1</sup>,  
E. M. Alonso Guzmán<sup>1</sup>, S. Zapata Giraldo<sup>2</sup>, M. Arreola Sánchez<sup>1</sup>, D. García Romero<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [1718286b@umich.mx](mailto:1718286b@umich.mx)

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, México.

<sup>2</sup> Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia-Colombia, Colombia.

### RESUMEN

Una de las industrias que más contamina es la construcción, empleando el cemento como principal material para desarrollar proyectos constructivos. Durante el proceso de elaboración del cemento se producen grandes cantidades de gases tóxicos como el CO<sub>2</sub>, por esto se han estado investigando materiales alternativos que permitan sustituir parcialmente al cemento y ayuden a mejorar sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad, un ejemplo de ello es la ceniza de bagazo de caña (SCBA), claramente esta sustitución debe hacerse sin poner en decremento las propiedades mecánicas de las mezclas. En el presente estudio se analizó la sustitución (en peso) de un 10% de Cemento Portland Compuesto por SCBA en la mezcla de concreto hidráulico; se analizaron las pruebas de resistencia a compresión y resistividad eléctrica a las edades de 28, 45, 60, 90, 504 y 1400 días, con diferentes relaciones a/c (0.45 y 0.65). Las mezclas estudiadas obtuvieron resultados favorables, sobrepasando los valores de las mezclas control, en el caso de resistencia a la compresión para la mezcla de 0.65 en un 7% y para la de 0.45 en un 16%, en la prueba de resistividad eléctrica en un 21% y en la otra inferior a la control respectivamente, esto a la edad de 1400 días; lo que se interpreta como un aumento de sus propiedades físico-mecánicas. Comprobando la factibilidad de uso de la SCBA en las mezclas de concreto hidráulico y permitiendo usar mayores relaciones a/c lo que permitiría reducir los costos de construcción de este tipo de concretos.

**Palabras clave:** concreto; puzolana; sustitución; resistividad eléctrica; compresión simple.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos para la elaboración de uno de los materiales más utilizados en la construcción como lo es el cemento portland causan graves consecuencias en el medio ambiente, ya que esta industria es responsable del 5% al 8% de las emisiones totales mundiales de CO<sub>2</sub>. Aproximadamente la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la combustión de fósiles, mientras que el resto es emitido por la calcinación de piedra caliza con la que se elabora el Clinker para el cemento portland (Velez, 2020).

El crecimiento de una población no se puede detener y uno de los pilares de este desarrollo de las naciones es precisamente la infraestructura, algo que está estrechamente relacionado con este desarrollo es la sostenibilidad, que de acuerdo a la definición se debe procurar un desarrollo equilibrado, donde así como la sociedad necesita un progreso también se debe procurar un progreso económico y cuidado del medio ambiente. Siguiendo esta idea es que se ha estado buscando innovar con nuevos materiales que sean residuos que ayuden a disminuir esta problemática y que se comporten de manera similar a las propiedades de los materiales tradicionales. Los materiales puzolánicos son una opción para realizar una sustitución de cemento portland en variados porcentajes, dado que la puzolana es un material sílicoso, que por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente dividido y en medio húmedo a temperatura ordinaria, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes (Marroquin, 2008) (Pritish Gupta Quedoua, 2021) (Amany Micheal, 2021).

La actividad puzolánica depende principalmente de la temperatura de combustión, que debe de oscilar entre 400 °C–800 °C para evitar fases cristalinas de sílice producto de las altas temperaturas de combustión (Hernandez, 2000) (Veronica Torres de Sande, 2021).

Actualmente, diversos materiales puzolánicos, como ceniza volante, sílica activa, metacaolín y ceniza de cáscara de arroz, son utilizados como sustitución parcial del cemento Portland en pastas, argamasas y concretos (Chagas Cordeiro, Dias Toledo Filho, & Moraes Rego Fairbairn, 2009) (Arun KumarParashar, 2021) (Gabriela Pitolli Lyra, 2021).

Dentro de la clasificación de las puzolanas se encuentra la ceniza de bagazo de caña (SCBA) por su composición química, ya que este producto es derivado de las industrias azucareras alcanzando las temperaturas adecuadas para que se pueda catalogar de esta manera. Al realizar un porcentaje de sustitución de SCBA se pretende al menos igualar o mejorar las propiedades mecánicas y físicas, así como también aprovechar los desechos que se generan.

## 2. PROCEDIMIENTO

Se realizó una mezcla de concreto hidráulico base cemento portland, con dos relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65, sustituyendo el cemento portland por un 10% de ceniza de bagazo de caña, y una mezcla control con agua, arena y cemento. Se elaboraron dos mezclas con la finalidad de realizar una comparativa y probar si estas sustituciones favorecen el comportamiento de la mezcla testigo al incorporar un cierto porcentaje del material con potencial puzolánico.

Para elaborar las mezclas con las sustituciones se realizaron una serie de procedimientos en la ceniza de bagazo de caña, ya que debe de tener algunas consideraciones antes de usarse para que la mezcla tenga las menos variables posibles y los resultados sean confiables.

Lo primero que se realizó fue el secado de la ceniza de bagazo de caña con el objetivo de eliminar la humedad que contenía el material, ya que si la ceniza contiene humedad puede que se presente variabilidad en los resultados. Después del secado se realizó la pulverización de la ceniza, para que el porcentaje de la ceniza sea un poco mayor y esta pueda ser aprovechada de una mejor manera, seguido de esto se hizo la granulometría de las cenizas para que estas sean uniformes, para esto el tamaño de mallas que se implementaron fueron las siguientes, malla No. 100 y No. 200. Ya que la

ceniza de bagazo de caña estaba en óptimas condiciones se procedió a realizar la mezcla con el porcentaje de adición ya antes mencionado, cabe destacar que a la mezcla se le agregó un fluidificante debido a que la mezcla con relación a/c 0.45 es menos trabajable cuando se le adiciona la ceniza de bagazo de caña.

El diseño y la elaboración de las mezclas fue el mismo, tanto para la mezcla control como para la que contiene sustitución por CBC, con la diferencia de que a una mezcla se le agregó una puzolana, el método de diseño de estas mezclas fue el del ACI 211.1. Con este método se seleccionó el revenimiento, el tamaño máximo del agregado, la cantidad de agua de mezclado así como el contenido de aire.

Para las diferentes pruebas que se llevaron a cabo se elaboraron especímenes con diferentes geometrías, para las pruebas destructivas y las no destructivas.

## 2.1. Pruebas destructivas

### 2.1.1. Compresión simple

Las pruebas destructivas se realizaron en los especímenes cilíndricos con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto que fueron previamente cabeceados de acuerdo a la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013. Se les aplicó la carga con una velocidad uniforme y continua, ya que si se aplica de una manera brusca puede causar fallo por impacto y pérdida de carga. La carga fue en intervalos de 84 kgf/cm<sup>2</sup>/min a 210 kgf/cm<sup>2</sup>/min, según la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014.

## 2.2. Pruebas no destructivas.

### 2.2.1. Resistividad eléctrica

Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019. Esta norma cuenta con varios rangos, los cuales clasifican a las muestras. Estos parámetros indican qué tanta porosidad interconectada existe en la mezcla de acuerdo al grado de saturación de los poros, así como también predice el riesgo de corrosión en caso que exista acero, así como la durabilidad.

Esta prueba se llevó a cabo en especímenes prismáticos con dimensiones de 6x6x26 cm, a edades tardías de 1500 días. Primeramente, se enumeraron los especímenes y se determinaron sus dimensiones, seguido de esto se humedecieron las almohadillas con agua para colocarlas en los especímenes, se conectaron las placas al resistómetro y se revisó la conexión. Después de esto se conectaron las placas y se colocaron en los especímenes para someterlos a una corriente y registrar su voltaje.

## 3. ECUACIONES

Las ecuaciones que se utilizaron fueron las siguientes:

Resistencia de compresión

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

fc= Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)

F= Carga máxima (Kgf)

A= Área de espécimen (cm<sup>2</sup>)

Resistividad eléctrica

$$R_e = \frac{E}{I} \quad (2)$$

Donde:

Re= Resistencia eléctrica (Kohm)

E= Tensión o diferencia de potencial eléctrico, volt, con aproximación de una décima.

I= Corriente aplicada, amperio, con aproximación de un décima.

$$K = \left[\frac{A}{L}\right]$$

$$\rho = Re * k \quad (3)$$

Donde:

$\rho$ = Resistividad eléctrica (Kohm-cm)

K= Constante de celda en cm o m

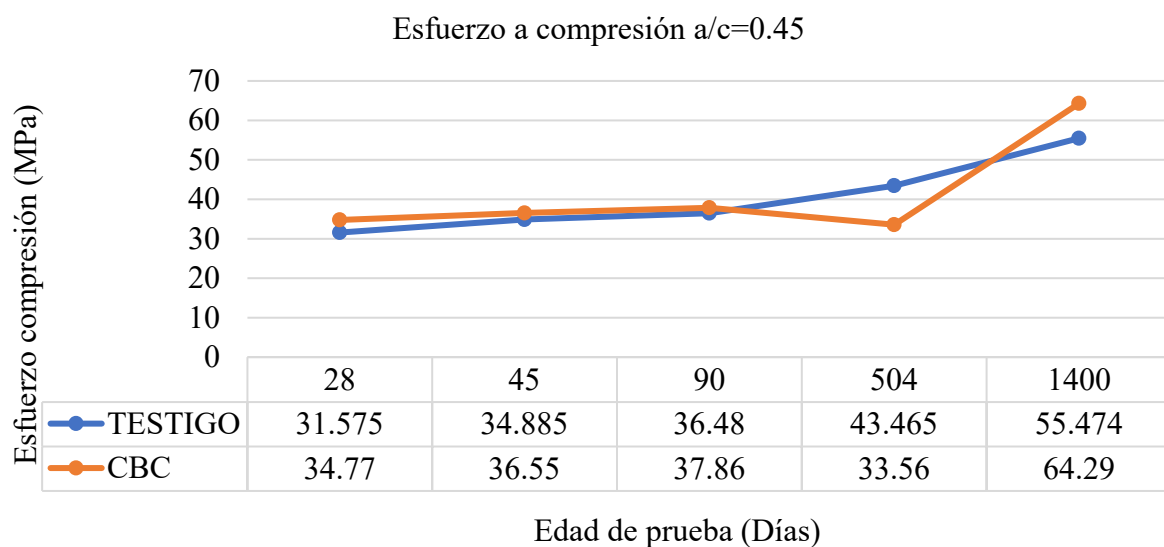
Re= Resistencia eléctrica (Kohm)

A= Área transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>)

L= Longitud del espécimen (cm)

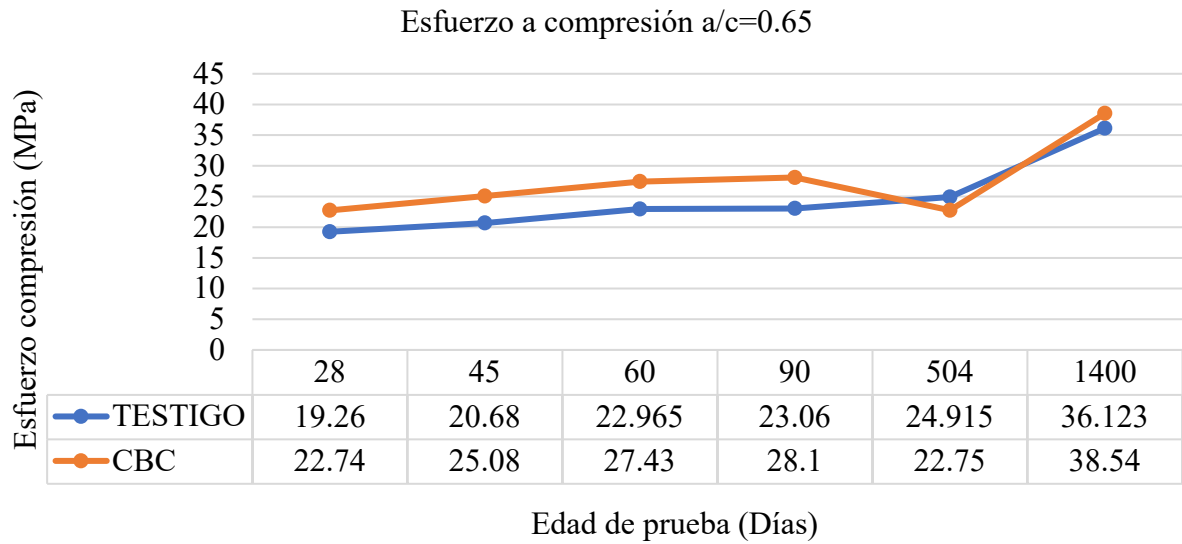
#### 4. RESULTADOS

La resistencia de proyecto del concreto para la relación a/c=0.45 fue de un  $f'c=300 \text{ kgf/cm}^2$  (30 MPa) y para la relación a/c=0.65 de  $f'c=180 \text{ kgf/cm}^2$  (18 MPa).



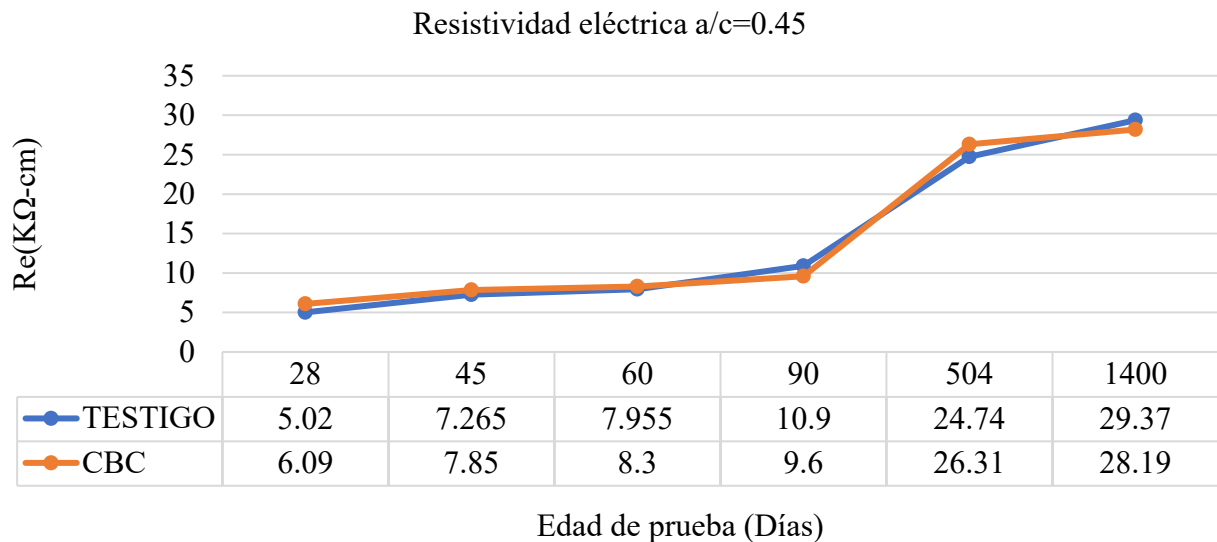
Gráfica 1. Comparación de mezclas en prueba “Esfuerzo a Compresión” relación a/c=0.45.

Como se puede observar la mezcla con un 10% de sustitución de CBC a la edad de 1400 días fue la que obtuvo mejores resultados, teniendo un valor de 64 MPa.



Gráfica 2. Comparación de mezclas en prueba “Esfuerzo a Compresión” relación a/c=0.65.

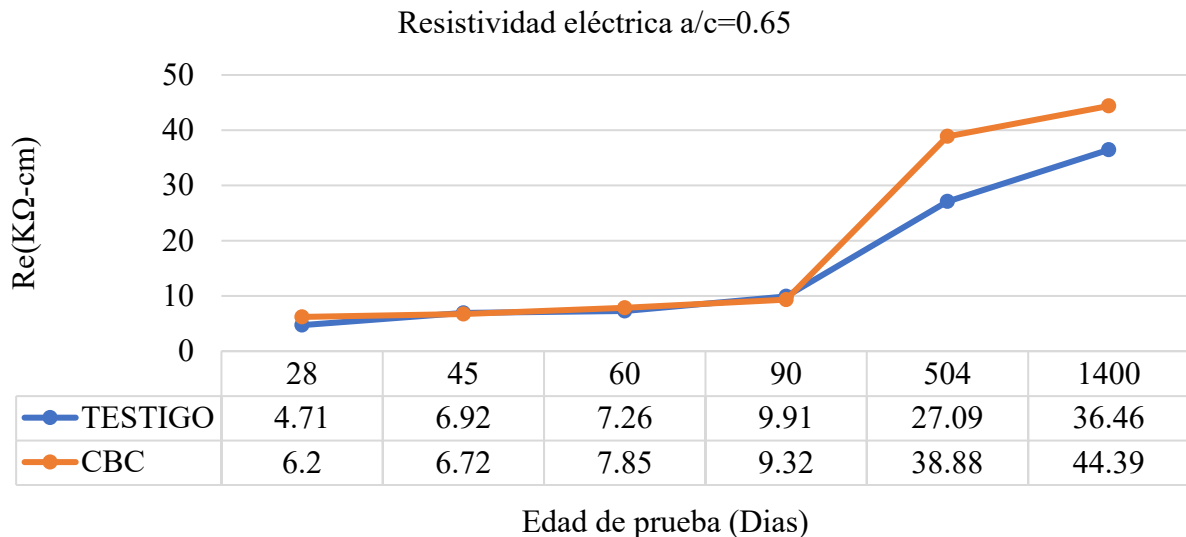
Como se puede observar la mezcla con un 10% de sustitución de CBC alcanzó mejores resultados casi en todas las edades, superando la de proyecto.



Gráfica 3. Comparación de mezclas en prueba Resistividad eléctrica a relación a/c=0.45.

Se puede observar que las dos mezclas llevan más o menos un comportamiento similar, en la cual la mezcla con un 10% de CBC a la edad de 504 días obtuvo el mejor comportamiento.





Gráfica 4. Comparación de mezclas en prueba Resistividad eléctrica a relación a/c=0.65.

Finalmente la mezcla con relación a/c=0.65 con un 10% de CBC obtuvo el mejor resultado a la edad de 1400 días. Con base en la norma NMX-C-530-ONNCCE-2018, a edades tardías de 504 y 1400 días las mezclas se encuentran en rangos de 10 KΩ-cm a 50 KΩ-cm, lo que se considera como porosidad de consideración ya que para que la estructura sea durable los valores de resistividad deben ser mayores a 50 KΩ-cm.

## 5. CONCLUSIONES

La mezcla que obtuvo mejores resultados en la prueba de resistividad eléctrica fue la mezcla que contiene un 10% de sustitución de CBC con relación a/c=0.65 con un valor de 44 KΩ-cm, lo que indica que, aunque fue la mejor de todas, aún se le considera como una mezcla con porosidad alta, según la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2016).

En la prueba de compresión simple la que obtuvo mejores resultados fue la mezcla con un 10% de sustitución de CBC con relación a/c=0.45 con un valor de 64 MPa, lo cual se concluye que la ceniza de gabazo de caña si mejora las propiedades, disminuyendo la porosidad y aumentando la resistencia.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También agradecen el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

## 7. REFERENCIAS

Amany Micheal, R. R. (2021). *Investigating the Economic and Environmental Effect of Integrating Sugarcane Bagasse (SCB) Fibers in Cement Bricks*. Architectural Engineering, 3297-3303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.012>

- Arun KumarParashar, A. (2021). *Investigation of the effect of bagasse ash, hooked steel fibers and glass fibers on the mechanical properties of concrete*. Materials Today: Proceedings, 44, 801-807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.711>
- Chagas Cordeiro, G., Dias Toledo Filho, R., & Moraes Rego Fairbairn, E. d. (2009). *Caracterización de la ceniza del bagazo de caña de azúcar para su uso como puzolana en materiales cementosos*.
- Gabriela Pitolli Lyra, M. V. (2021). *Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials*. Construction and Building Materials, 122001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122001>
- Hernandez, J. M. (2000). *Propiedades puzolánicas de desechos de la industria*.
- Marroquin, J. B. (2008). *Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento*.
- Pritish Gupta Quedoua, E. W. (2021). *Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry*. Case Studies in Construction Materials, 14, 545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545>
- Travis D. Garrett, H. E. (2020). *Sugarcane bagasse and rice husk ash pozzolans: Cement strength and corrosion effects when using saltwater*. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 1-2, 7-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.003>
- Velez, A. L. (2020). *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. SciELO.
- Velez, A. L. (2020). *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. SciELO.
- Veronica Torres de Sande, M. S. (2021). *Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete*. Journal of Building Engineering, 102277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102277>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-796-MX  
pp. CC – 165 – 171



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Comportamiento mecánico de arcillas estabilizadas con cementantes y mucilago de nopal

J. A. Velázquez Perez<sup>1\*</sup>, H. L. Chávez García<sup>1</sup>, L. A. Molina Gonzalez<sup>1</sup>, R. Ruiz Ruiz<sup>1</sup>,  
E. M. Alonso Guzmán<sup>1</sup>, W. Martínez Molina<sup>1</sup>, M. A. Navarrete Seras<sup>1</sup>.

\*Autor de Contacto: [Judith.velazquez@umich.mx](mailto:Judith.velazquez@umich.mx)

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

### RESUMEN

La presente investigación analiza diferentes estabilizadores (cemento Portland, cal, yeso y mucilago de nopal) aplicados en arcilla, con la intención de mejorar su comportamiento mecánico. Se determinó el comportamiento bajo sollicitaciones de resistencia a compresión, tensión directa, flexión y velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a las edades de 14 y 50 días. Los resultados muestran mejoras en el comportamiento de las mezclas estabilizadas con yeso y mucilago de nopal, logrando superar al testigo en todas las pruebas realizadas y una mejor homogeneidad según la prueba de VPU, aunque se observa variabilidad en el comportamiento de todos los estabilizadores y cambios volumétricos considerables. Esta investigación comprueba que el mucilago de nopal incrementa la resistencia mecánica de la arcilla.

**Palabras clave:** arcillas; estabilizadores; cementantes; mucilago de nopal.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las arcillas expansivas sedimentarias naturales están ampliamente distribuidas en zonas costeras, lagos, pantanos, ríos y otras zonas de todo el mundo. Dichas arcillas suelen tener un alto contenido de agua, gran compresibilidad, baja resistencia, escasa permeabilidad, alta sensibilidad, y notables propiedades reológicas (Mesri and Godlewski, 1977; Yin et al., 2011, 2014, 2017; Zhu et al., 2016; J. Wu et al., 2021).

La mejora de los suelos problemáticos y marginales in situ para la construcción de carreteras ha sido durante mucho tiempo un reto para los ingenieros geotécnicos y de pavimentos para reducir el coste de transporte de suelo de alta calidad desde una distancia lejana. Los cimientos de arcilla de alta plasticidad se deforman notablemente debido a su baja resistencia a la compresión cuando se someten a presiones de carga y, por lo tanto, se reduce su vida útil (Petry and Little, 2002). La estabilización química es un método comúnmente reconocido para mejorar las características de ingeniería de los suelos problemáticos. Esta técnica ayuda a mejorar la resistencia y la estabilidad y se utiliza ampliamente sobre todo para los suelos blandos arcillosos y expansivos. Los aditivos más comunes son cemento, cal y cenizas volantes (Bahrami et al, 2020; Bakhshizadeh et al. 2022). La estabilización mediante el método de mezclado profundo se adopta habitualmente en los países nórdicos para mejorar las propiedades mecánicas de las arcillas expansivas y se ha considerado una alternativa a la sustitución en masa convencional (Kitazume y Terashi, 2013; Forsman et al., 2018; Larsson, 2021). La estabilización de arcillas expansivas utiliza cal y/o cemento como aglutinantes, ambos productos de la calcinación de materias primas como las calizas (Bell, 1996; Uddin et al., 1997; Larsson et al., 2005; Sakr et al., 2009; Fatahi et al., 2012). Debido al elevado consumo de energía y a las emisiones de CO<sub>2</sub>, estos aglutinantes se enfrentan actualmente a crecientes limitaciones medioambientales, y existe una necesidad urgente de materiales sostenibles que sustituyan a la cal y al cemento y, en última instancia, reduzcan la huella de carbono (Z.-S. Li et al., (2022). Un ejemplo son los intentos de reutilización eficiente de residuos o subproductos de yeso para reducir la huella de carbono de la mejora de los suelos (tales como, fosfoyesos, flurogiros, cítricos, desulfosyesos, borogiros y yesos de desulfuración de gases de combustión) para mejorar los suelos problemáticos como lodos (Zhao et al., 2019; Gu y Chen, 2020), arcillas expansivas (Yilmaz y Civelekoglu, 2009), y bentonitas expansivas (Ahmed y El Naggar, 2016), entre otros (J. Wu et al., 2022).

La presente investigación analiza nuevos estabilizadores de origen orgánico como el mucilago de nopal y lo compara con los ya mencionados en este capítulo y considerados como estabilizantes convencionales.

## 2. PROCEDIMIENTO

La presente investigación versa sobre el análisis de diferentes estabilizadores (cemento portland, cal, yeso y mucilago de nopal) aplicados en arcilla, con la intención de mejorar su comportamiento mecánico. La arcilla utilizada en la presente investigación tiene una clasificación SUCS de CH con las siguientes características: Límite líquido de 66, límite plástico de 24.8, índice plástico de 41.12, contracción lineal de 14.12 y contracción volumétrica de 17.5.

Los estabilizadores de tipo cementante (yeso, cemento portland y cal) usados son de uso comercial y no se realizó ninguna modificación previa a su empleo en las mezclas de arcilla, se adicionaron en polvo respecto al peso de la arcilla. Por su parte el mucilago de nopal se obtuvo mediante la cocción de pencas de nopal y posterior colado del agua con mucilago, se adiciona en líquido como parte del agua de amasado.

La elaboración de las mezclas se realizó mediante mezclado manual y el colado de los especímenes de prueba se realizó según lo indicado en la norma ASTM C 109 para prueba de compresión,

ASTM C 348 para la prueba de flexión y la norma ASTM C 597 para prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

Se determinó el comportamiento bajo las sollicitaciones de resistencia a compresión, tensión directa, flexión y velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a las edades de 14 y 50 días de edad.

### **2.1 Pruebas destructivas**

Las pruebas destructivas se realizaron en especímenes cúbicos de 5x5x5cm. Se les aplicó la carga con una velocidad uniforme y continua según la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014. Las pruebas destructivas analizadas en la presente investigación fueron: resistencia a compresión simple (cubos), resistencia a flexión (prismas de 2x2x12cm) y resistencia a tensión directa (briquetas).

### **2.2 Pruebas no destructivas**

Como prueba no destructiva o de caracterización física de las mezclas de análisis, se realizó la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a la edad de 50 días. Esta prueba se ejecutó en los mismos especímenes cúbicos en los que se determinó la resistencia a compresión simple, primero se midió la velocidad de pulso ultrasónica y después se efectuó la prueba destructiva.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la presente sección se muestran las gráficas con los comportamientos de las 4 mezclas de estudio y la respectiva mezcla de control. En la Figura 1 se observan los resultados de la prueba de compresión a dos edades diferentes, 14 y 50 días. El comportamiento de la arcilla sin aditivos es claramente ascendente con la edad, mientras que las mezclas de arcilla con mucilago y yeso muestran resistencias menores a la edad de 50 días, aunque en ambos casos son resistencias iguales o superiores al testigo. Los aditivos que muestran disminución de la resistencia mecánica de la arcilla son el cemento y la cal, los cuales muestran resultados menores a los 5 kg/cm<sup>2</sup> que es el 50% de la resistencia de la arcilla a los 14 días de edad. Lo anterior puede deberse a que estos dos cementantes son altamente rígidos en comparación con la arcilla y al reaccionar y fraguar con el agua de amasado puede generar una distribución muy heterogénea en la matriz de la muestra, con zonas de rigideces muy dispares que al momento de ejecutar las sollicitaciones mecánicas generar fallas abruptas en la zonas de alta rigidez y alta disgregación de la muestra por el contraste de rigideces entre las zonas de solo arcilla y las zonas mezcladas y rigidizadas por dichos cementantes. Respecto a la variabilidad de los resultados, se puede observar que el mucilago es el que muestra el mejor comportamiento con la menor variabilidad.

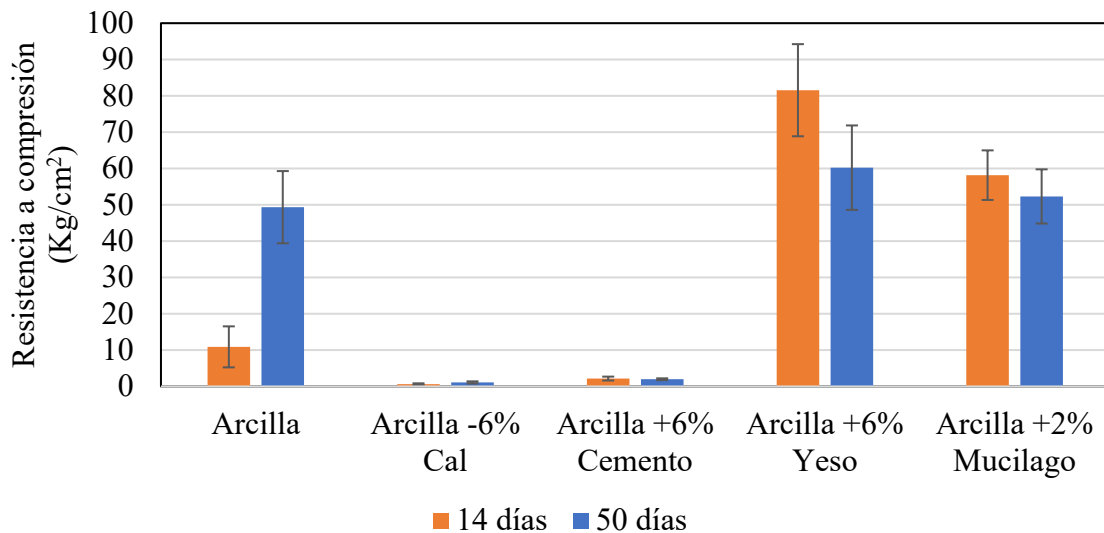


Figura 1. Resistencia a compresión de mezclas de estudio.

En las Figuras 2 y 3 se muestran los resultados de la prueba de flexión estática. Para el módulo de ruptura (Figura 2) no fue posible obtener resultados de las mezclas de arcilla con cal en ninguna de las edades de estudio y para el caso de la mezcla de arcilla y cemento Portland a la edad de 14 días, lo anterior debido a la baja resistencia presentada por dichas mezclas lo que no permitió tener lecturas fiables en la máquina de prueba (el mismo problema se presenta en la Figura 3). En el caso de la Figura 2, la mezcla con el mejor desempeño es la que incorpora yeso como estabilizante, aunque con una variabilidad considerable. El mucílago presenta un comportamiento similar al testigo a la edad de 50 días, pero con el mismo problema de la variabilidad.

Dado que la resistencia a cortante (Figura 3) se obtiene de los datos generados durante la prueba de flexión estática, la figura muestra un comportamiento exactamente igual que la Figura 2 solo que con valores de resistencia menores a los 10 kg/cm<sup>2</sup>.

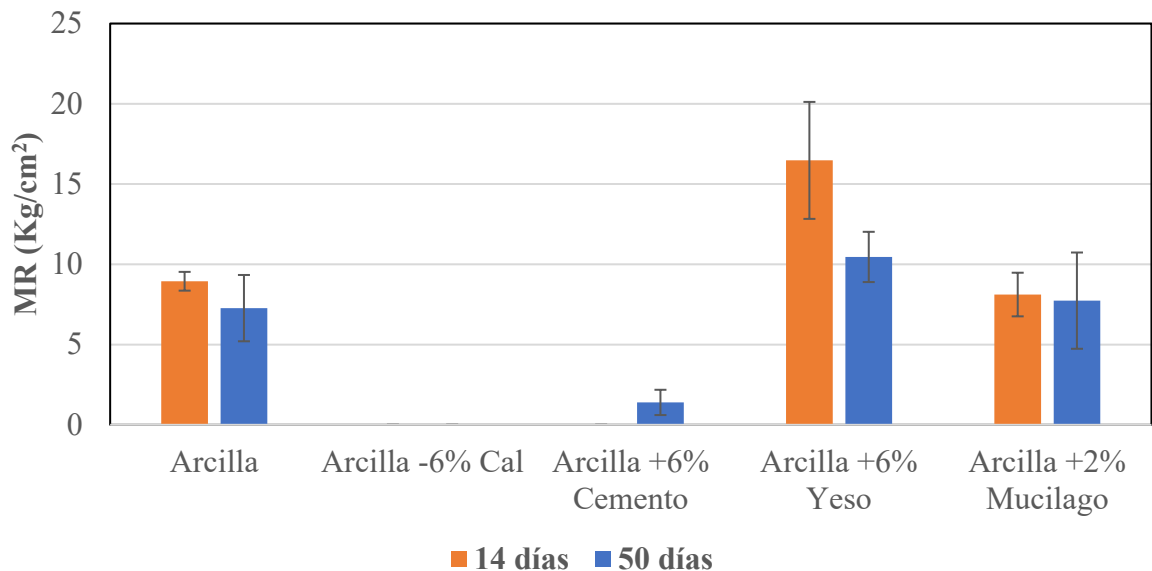


Figura 2. Resistencia a flexión estática de las mezclas de estudio.

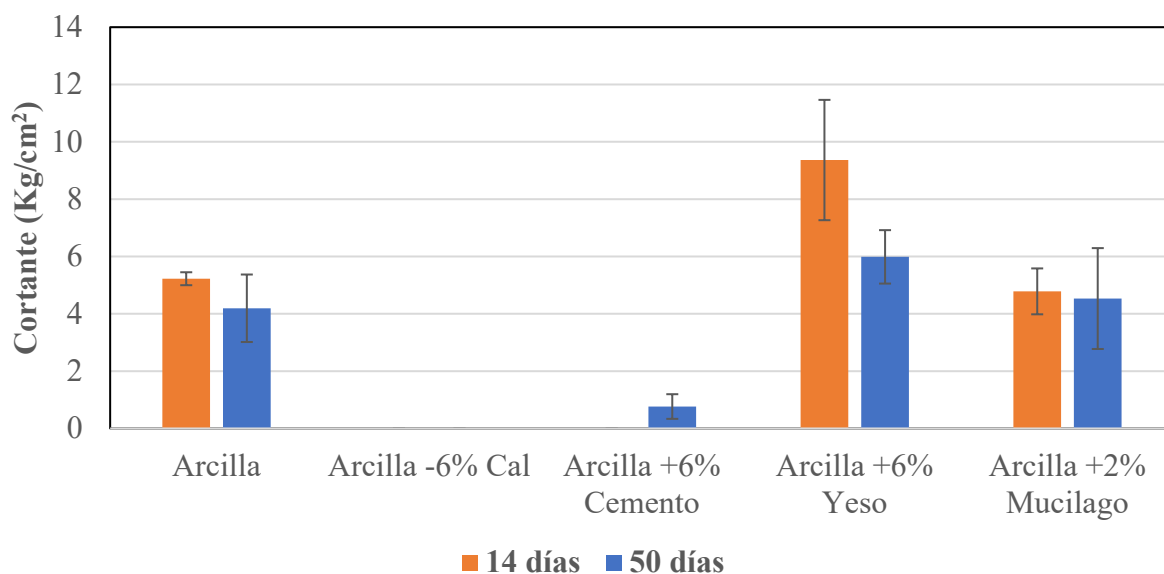


Figura 3. Resistencia a cortante de mezclas de estudio.

Al igual que la prueba de flexión, en la prueba de tensión directa (Figura 4) no fue posible determinar la resistencia de la mezcla con cal a la edad de 28 días. El comportamiento a tensión de los estabilizantes analizados nuevamente muestra que el mucilago de nopal es el que tiene el mejor desempeño en ambas edades de prueba, duplicando la resistencia mostrada por el testigo. En el caso del yeso, también supera la resistencia del testigo y en este caso muestra la menor variabilidad de la prueba, quedando como el segundo mejor estabilizante bajo la sollicitación de tensión directa.

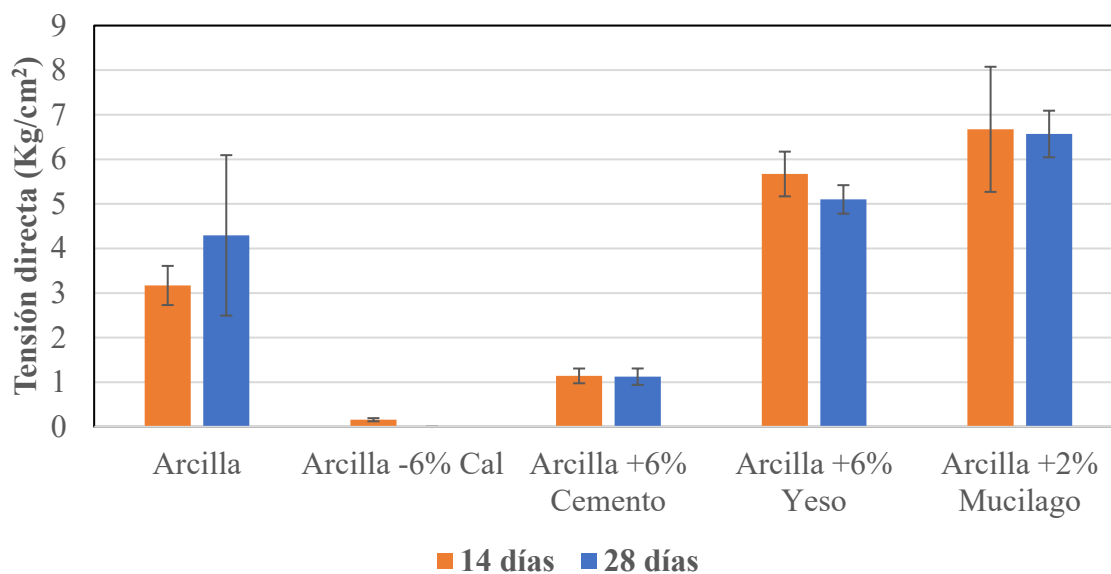


Figura 4. Resistencia a tensión directa de las mezclas de estudio.

Como última prueba se presenta la velocidad de pulso ultrasónico, esta es una prueba no destructiva que sirve para estimar la homogeneidad y densidad de los especímenes. A mayor densidad y homogeneidad de la mezcla, mayor velocidad de pulso se obtendrá. En esta prueba (Figura 5), se observa que solo tres mezclas lograron desempeños por encima de los 1000 m/s, la mezcla testigo y las que incorporan yeso y mucilago como estabilizadores; logrando estas dos mezclas anteriores

superar ligeramente el desempeño del testigo, aunque con un poco más de variabilidad en los resultados.

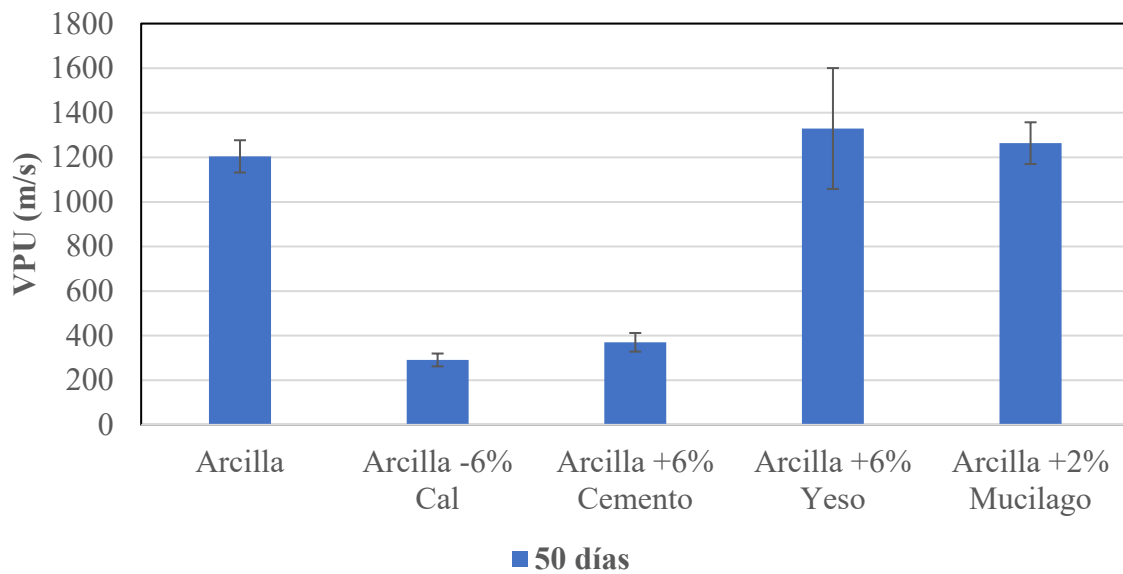


Figura 5. Velocidad de pulso ultrasónico en mezclas de estudio.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran notables mejoras en el comportamiento de las mezclas estabilizadas con yeso y mucilago de nopal, logrando superar al testigo en todas las pruebas realizadas y una mejor homogeneidad según la prueba de VPU, aunque se observa variabilidad en el comportamiento de todos los estabilizadores. Esta investigación comprueba que el mucilago de nopal incrementa la resistencia mecánica de la arcilla, reduce la variabilidad e incrementa la homogeneidad; demostrando con la presente investigación la factibilidad técnica de usar el mucilago de nopal como estabilizador de arcillas. El uso del mucilago podría tener varias ventajas constructivas ya que se aplica por vía líquida, lo que incrementará la trabajabilidad de la arcilla o del suelo arcilloso y por ende se pueden lograr resultados similares a los mostrados en esta investigación aún en condiciones de campo.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También agradecen el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

#### 6. REFERENCIAS

- Mesri, G., Godlewski, P.M., (1977), Time and stress-compressibility interrelationship. *J. Geotech. Geoenviron.* 103 (5), 417–430.
- Yin, Z.Y., Karstunen, M., Chang, C.S., Koskinen, M., Lojander, M., (2011), Modeling time-dependent behavior of soft sensitive clay. *J. Geotech. Geoenviron.* 137 (11), 1103–1113.



- Yin, Z.Y., Zhu, Q.Y., Yin, J.H., Ni, Q., (2014), Stress relaxation coefficient and formulation for soft soils. *Geotech. Lett.* 4 (1), 45–51.
- Yin, Z.Y., Zhu, Q.Y., Zhang, D.M., (2017), Comparison of two creep degradation modeling approaches for soft structured soils. *Acta Geotech.* 12 (6), 1395–1413.
- Zhu, Q.Y., Yin, Z.Y., Hicher, P.Y., Shen, S.L., (2016), Nonlinearity of one-dimensional creep characteristics of soft clays. *Acta Geotech.* 11 (4), 887–900.
- Jun W., Yifan M., Bo L., Xiyao Z., (2021), Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading. *Soils and Foundations.* 61:974–988.
- Petry, T., Little, D., (2002), Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future, *J. Mater. Civ. Eng.* 14 (6):447–460, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561)
- Bahrami, R., Khayat, N., Nazarpour, A., (2020), Effect of nano-stabilizer on geotechnical properties of leached gypsiferous soil, *Geomech. Eng.* 23(2):103–113, <https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.2.103>.
- Bakhshizadeh, A., Khayat, N., Horpibulsuk, S., (2022), Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials.* 16: e01006.
- Kitazume, M., Terashi, M., (2013). In: *The Deep Mixing Method*, vol. 21. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Forsman, J., Korkiala-Tanttu, L., Piispanen, P., (2018), Mass stabilization as a ground improvement method for soft peaty. In: *Peat*, London: IntechOpen, Eds. Bulent Topcuoglu and Metin Turan, Chapter 7, pp.107–139.
- Larsson, S., (2021), The Nordic dry deep mixing method: Best practice and lessons learned. In: *Deep Mixing-An Online Conference*. DFI Deep Foundation Institute, pp. 1219–1248.
- Bell, F.G., (1996), Lime stabilisation of clay minerals and soils. *Eng. Geol.* 42 (4), 223–237.
- Uddin, K., Balasubramaniam, A.S., Bergado, D.T., (1997), Engineering behaviour of cement-treated Bangkok soft clay. *Geotech. Eng.* 28, 89–119.
- Larsson, S., Stille, H., Olsson, L., (2005), On horizontal variability in lime-cement columns in deep mixing. *Geotechnique* 55 (1), 33–44.
- Sakr, M.A., Shahin, M.A., Metwally, Y.M., (2009), Utilization of lime for stabilising soft clay soil of high organic content. *Geotech. Geol. Eng.* 27 (1), 105–113.
- Fatahi, B., Khabbaz, H., Fatahi, B., (2012), Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International* 19 (3), 252–262.
- Zhong-Sen, L., Yinning, Z., Mateusz, J., Korkiala-Tanttu, L., (2022), Radial deformation and failure of stabilised soft clay under uniaxial compression. *Soils and Foundations* 62:101213. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101213>
- Zhao, M., Guo, W., Chen, L.Y., Wang, S.Y., (2019), Experiment on the frost resistance of modified phospho gypsum: a case used to improve baozhong railway subgrade loess. *J. Mt. Sci.* 16 (12):2920e2930.
- Gu, K., Chen, B., (2020), Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction. *Construct. Build. Mater.* 231:117195.
- Yilmaz, I., Civelekoglu, B., (2009), Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Appl. Clay Sci.* 44 (1):166e172.
- Ahmed, A., El Naggar, M.H., (2016), Swelling and geo-environmental properties of bentonite treated with recycled bassanite. *Appl. Clay Sci.* 121:95e102.
- Wu, J., Liu, L., Deng, Y., Zhang, G., Zhou, A., Xiao, H., (2022), Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 14:909-921.

## Efecto de la sílice obtenida en planta geotérmica de los azufres sobre mezclas de mortero a edades tardías

L. González Luna<sup>1\*</sup>, H. Chávez García<sup>1</sup>, F. Hernández Cisneros<sup>1</sup>, E. Alonso Guzmán<sup>1,2</sup>,  
W. Martínez Molina<sup>1</sup>, J. Guerrero Jerónimo<sup>3</sup>, R. Grajeda Rosado<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [jose.rc@zacatepec.tecnm.mx](mailto:jose.rc@zacatepec.tecnm.mx)

<sup>1</sup>Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.

<sup>3</sup>Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia.

### RESUMEN

El cemento es uno de los tantos materiales que se emplean en la industria de la construcción por su gran versatilidad al emplearse. Este material por ende tiene una gran demanda ya que es el elemento base en la elaboración del concreto que es un compuesto para hacer cualquier estructura. El constante uso del cemento genera impactos en el medio ambiente como el cambio de uso del suelo en la obtención de la materia prima para su elaboración y la emisión del dióxido de carbono a la atmosfera por la producción de este. Sin embargo, hay procesos que generan productos secundarios ya sea para bienes o servicios, un ejemplo es en la generación de la electricidad que se consume diariamente se pueden obtener subproductos como cenizas volantes en la combustión del carbón o la generación de humo de sílice en fuentes geotérmicas como un subproducto de la condensación del vapor generado por los geiseres. Se hicieron muestras de mortero base cemento empleando humo de sílice en un 5% para someterlas a un esfuerzo de compresión a edades tardías y comparándolas con cemento base cemento sin adiciones. Se logro un incremento en la resistencia en un 52.9% a la edad de 1826 días empleando este material subproducto de la generación de la electricidad.

**Palabras clave:** mezclas de mortero base cemento; puzolanas; residuo de fuentes geotermales; cemento más sílice; tratamiento de residuos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cemento es uno de los materiales más empleados en la construcción que está compuesto de varios elementos como calizas que en su fuente de origen son algunos desechos industriales, calcita, mármol, esquisto entre otros además de hierro que puede tener su origen en arcillas y minerales de hierro, sílice que su obtención tiene varios como la roca calcárea, la caliza, cuarcita. Todos estos elementos se combinan y por medio de moliendas y mezclas se someten a través de altas temperaturas formando el Clinker que es la base del cemento en la cual se muele para lo que queda como resultado el cemento portland como se conoce. Con este material se pueden hacer elemento de concreto que es una mezcla o conglomeración de varios elementos como agregados pétreos, agua, el cemento y acero. (Kosmatka, 2004)

Las mezclas de cemento son uno de los materiales más utilizado en la construcción ya que de este se hacen todo tipo de elementos estructurales para mantener las demandas tanto en edificaciones como en infraestructura y estos elementos se componen básicamente de vigas, columnas y zapatas. Cabe destacar que cada uno de estos elementos se diseñan con respecto a las demandas que puedan presentarse como por ejemplo esfuerzos cortantes, flexiones y esfuerzos a compresión de las cuales deben de soportar inclusive si contienen elementos de acero para contenerlas y que el concreto no llegue a fracturarse. (Cerna, 2010)

El factor de durabilidad es más presente en los lugares donde es más presente el entorno con los efectos del carbono como es el caso de las grandes ciudades o en lugares donde hay mucha salinidad como en las costas donde el efecto del agua de mar entra en contacto con el concreto reforzado que por los componentes de la propia agua tienden a desgastar todas las estructuras que están en contacto directo con el agua. (Rincon, 1998)

A lo largo de la historia se han hecho experimentos con materiales de los cuales hacen una mejora en el concreto para distintas solicitaciones como el mejorar la resistencia de este y de los elementos que más se utilizan son lo minerales, algunas cenizas y residuos de la producción de otras industrias. En cuanto a la producción de la energía eléctrica es una de las que más elementos residuales produce como lo es la generación de cenizas o en la extracción de productos secundarios en los que suelen extraerse debido a que estos elementos vienen mezclados con otros en la producción de la electricidad.

Por ejemplo, en las instalaciones de las geotérmicas pueden generar alrededor de 8000 MW de electricidad, en dicho proceso se tiene que no solo se extrae lo que es el vapor que hace girar las turbinas de los generadores, sino que consigo traen otros elementos que están en la tierra uno de ellos es la sílice, un compuesto que se transporta en el momento en que el líquido es extraído y transportado a los conductos que llevan la mezcla hacia las turbinas generadoras. (Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015) Esto es un problema ya que repercute a la producción o generación de la electricidad ya que este material al incrustarse suele reducir la velocidad de las turbinas y por ende la producción de la energía eléctrica es mayor. Para mitigar este problema se tiene que hacer limpieza periódica de todos los conductos por lo cual diariamente se juntan residuos. (Santillán Barragán, 2017) La cantidad aproximada de estos residuos asciende hasta las 50000 toneladas por año por lo cual se genera una cantidad de este material que se pone como un residuo ya que es reactivo. (Gómez Zamorano, 2004)

Otra de las cuestiones es la gran demanda que tiene el cemento Portland en la que se va en incremento el uso de este material el cual en el 2014 se tuvo una producción de este material de 36.6 millones de toneladas lo que repercute en impactos como el cambio del uso del suelo y la emisión de dióxido de carbono que se producen en la elaboración de

Uno de los objetivos de este trabajo es la del aprovechamiento del subproducto en la generación de la electricidad para a modo de sustitución se realicen mezclas base cemento lo cual conlleva dos aspectos: el empleo de un material que se genera en tantas cantidades que ya no puede contenerse

y por otro lado es la de mejorar las características propias de las mezclas de cemento haciéndolo más resistente y más durable.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Materiales empleados.

Para este trabajo se empleó arena de origen volcánico de la cual proviene de la localidad de “joyitas” municipio de Morelia en el occidente. Esta arena proviene de un sistema de bancos de materiales que es un método de extracción de los agregados el cual consiste en hacer trincheras o pozos a cielo abierto en cerros o montañas los cuales fueron previamente analizados para saber su contenido y descubriéndose que este tipo de cerros contienen un alto contenido de este material del cual se requiere solo excavar de algunos metros para llegar a ellos.



Figura 1. Muestra de Arena

Otro de los materiales empleados para la realización de este trabajo es el cemento portland compuesto de 30 MPA de resistencia y resistencia a los sulfatos (Rincon, 1998). Gracias a este cemento se pueden hacer todo tipo de elementos en los que entran en contacto con sustancias que pueden degradar la mezcla de concreto o mortero hecho con cualquier otro tipo de cemento y puede ser empleado en casi todos los lugares sin necesidad de que las mezclas sufran agrietamientos.

El otro material empleado es la sílice que proviene de la planta geotérmica de los azufres que de aquí se producen una importante cantidad de este material que es un subproducto de la generación de la energía eléctrica. Esta sílice se le aplico un proceso para su incorporación en las mezclas el cual consistió en un proceso de secado y trituración con el propósito de hacer un polvo muy fino el cual debe de pasar por la criba #200 para su empleo. (Santillán Barragán, 2017)



Figura 2. Residuos de Sílice obtenidos de la geotérmica Los azufres

Aditivo super fluidificante el cual beneficia a las mezclas de base cemento en las que se le coloca evitando la floculación entre las partículas de cemento que provoca una reducción en la relación agua cemento y hace las mezclas más uniformes. Este se empleó mezclándolo con el agua de tal modo que se dejó reposando durante un cierto periodo para su homogeneización empleándose alrededor del 0.5% a 0.6% con respecto a la masa del cemento.

## 2.2 Metodología

Se realizaron mezclas de mortero base cemento de las cuales se realizaron bajo los estándares del diseño por fluidez el cual consiste en hacer mezclas de mortero con distintas relaciones agua cemento que se mezclan con arena determinada a 2.75 partes de arena para una parte de cemento. El propósito de esta prueba es la determinar la consistencia ideal para la mezcla de la que se realizaron los especímenes, para ver esta consistencia se hizo en la mesa de fluidez la que consiste en una parte mecánica y una graduación, esta parte mecánica es una manivela que hace ascender y desciende más brusco la plataforma las relaciones agua/cemento empleadas fueron en un rango de 0.6 a 0.7.



Figura 3. Equipo para diseño por fluidez

El diseño consiste en hacer la mezcla de mortero en donde a la arena se le agrega el cemento, para que después de que este homogénea la mezcla se procede a agregar el agua y se mezcla para lo cual en la mesa de fluidez deberá de estar en un rango de unas 27 unidades medidas con el calibre de la mesa. El método de prueba en la mesa de fluidez consiste en colocar la mezcla en un molde de la mesa que se coloca en el centro de la misma, se llena este molde con una espátula en dos capas, a cada capa se le debe de dar una compactación con un pisón de acero en 20 ocasiones, cuando se llena el molde se enrasa y se retira el exceso de la mezcla, se procede a retirar el molde y se acciona la manivela dejando caer la plataforma en 25 veces en un tiempo de 15 segundos, finalmente la mezcla se mide con el calibrador en 4 distintas posiciones, la suma de las unidades del calibrador debe de ser de 110 con un rango de error de 5 unidades. (ONNCCE, 2015)



Figura 4. Determinación de la fluidez en mezclas base cemento.

Para las mezclas se realizaron 2 en donde una es la mezcla convencional o mezcla testigo y a la otra mezcla se le agrega el material en una sustitución con respecto al cemento de un 5%. Una vez que se obtuvo el agua ideal para la mezcla se procedió a hacer los especímenes en forma cúbica de los cuales se requirieron moldes que tienen dimensiones de 50 mm de lado que son para uso rudo. A estos se procedió a llenarlos en dos capas en las cuales se compactaron con un pisón prismático que se le aplica 32 compactaciones en cada capa, se realizan en 8 ocasiones y en 4 etapas que a cada etapa se va compactando de manera adyacente con respecto a la etapa anterior.



Figura 5. Elaboración de Especímenes de mortero base cemento portland

Cuando los especímenes con elaborados se dejaron en reposo en un tiempo de 24 horas hasta que la mezcla se pone en forma sólida, se desmoldan y se colocan en un recipiente con agua para su proceso de curado. (ONNCCE, 2015)

### 2.3 Obtención de resultados.

Las edades a las que se le hicieron las pruebas son de 28, 45, 90, 180 y 1826 días para el cálculo de los esfuerzos se empleó el proceso siguiente:

Con ayuda de un instrumento de medición se determinaron las mediciones reales de los especímenes que son requeridas en la obtención del área:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = \text{lado a (cm)} * \text{lado b(cm)} \quad (1)$$

Cabe destacar que las caras en donde se obtiene el área del cubo es necesario tomar de los lados en donde no se encuentra la cara de llenado.

Para la prueba se realizó un esfuerzo a compresión en que primeramente se obtuvieron las dimensiones reales de los especímenes para que después se sometieron a la compresión



Figura 6. Espécimen sometido a la compresión

La máquina que se empleó para la compresion tiene un manometro el cual registra las cargas en kilogramos (kg) y para conocer el esfuerzo se obtiene con la siguiente ecuación (ONNCCE, 2015):

$$\text{Esfuerzo} \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = \text{carga(kg)} / \text{area(cm}^2\text{)} \quad (2)$$

Por último estos esfuerzos para obtenerlos a mega pascales se dividen entre 10.2

## 3. RESULTADOS

Para el diseño de la fluidez se obtuvo lo siguiente:

Tabla 1. Cantidades empleadas de los materiales que dieron para el rango de la fluidez

MEZCLA	CEMENTO (g)	AZ (G)	ARENA (g)	AGUA (ml)	RELACIÓN A/C	ADITIVO%
Testigo	150	0	412.5	97.5	0.65	0.5
AZ -5%	142.5	7.5	412.5	97.5	0.65	0.6

En cuanto a las pruebas a la compresión estos fueron los resultados obtenidos:

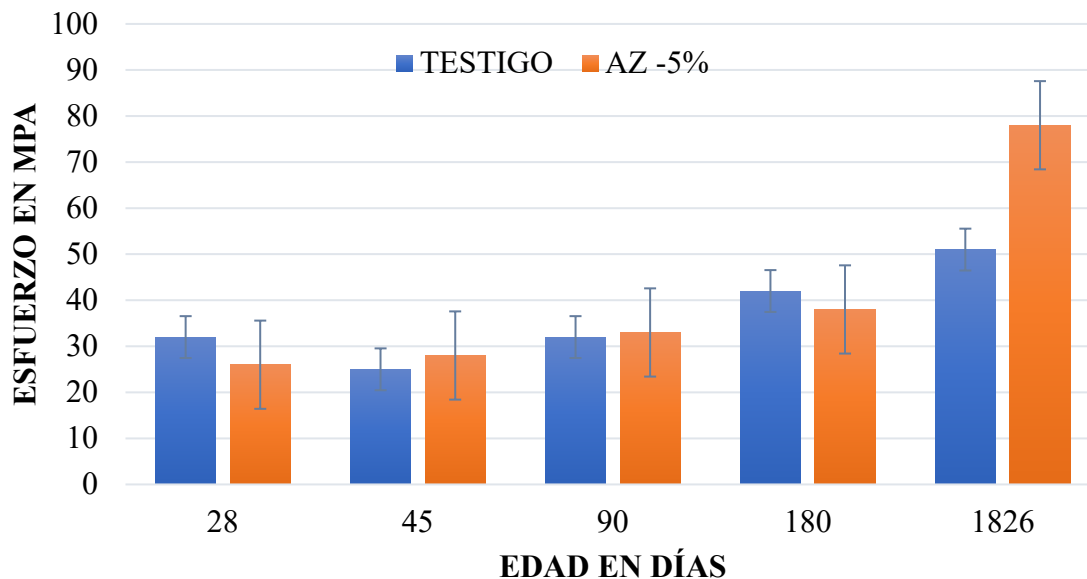


Figura 7. Resultados obtenidos del esfuerzo a compresión en mega pascales (MPA)

#### 4. CONCLUSIONES

La sílice es uno de los materiales que puede considerarse un residuo en la industria de la generación de la energía eléctrica por medios geotermales, sin embargo, esta puede usarse como un complemento en el diseño de mezclas de base cemento portland ya que suele dar buenos resultados en base a pruebas que se realizaron a edades tardías esta mezcla que se realizó con la sílice resulto beneficiada a partir de los años en donde este compuesto obtiene su reacción a edades tardías y supera a las resistencias de las mezclas de base cemento simples. Dicho esto, este material tiene un gran potencial en el empleo para el uso en las construcciones ya que el material suele obtenerse en grandes cantidades y los resultados son favorables y benéficos como el aumento de la resistencia y puede actuar como un suplemento extra del concreto lo que lo ayuda a la permeabilidad en lo que puede inhibir la corrosión de los elementos de acero que se le colocan como refuerzo. Otra de las cualidades es la de disminución del empleo del cemento y su potencial reducción del impacto que genera este producto en su elaboración y empleo con un material que es un subproducto de la generación de la electricidad.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas para el desarrollo de la experimentación, así como a su personal y el equipo de trabajo que llevo a cabo esta experimentación.

Agradezco a el residente de la CFE de la central geotérmica de los Azufres por su generosidad al acceder a dar el material para la realización de la experimentación.

#### 6. REFERENCIAS

Cerna, M. (2010). *Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material*. 86.



Gómez Zamorano, L. Y. (2004). *Geothermal waste: An alternative replacement material of portland cement*. Journal of Materials Science, 4021-4025.

Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*.

ONNCCE. (2015). *NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria de la construcción. Cementantes hidráulicos. Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. MEXICO.

Rincon, O. T. (1998). *Red Durar*.

Santillán Barragán, I. S. (2017). *Adición de geotermales para incrementar el desempeño mecánico de cerámicos base Portland*.

Universidad Autónoma de Nuevo León. (2015).



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
CC-845-MX  
pp. CC – 180 – 194



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. I, Control de Calidad de las Construcciones

## Activador alcalino a base de ceniza volante en cementos alcalinos base desecho de vidrio y cemento Portland

J. Rodríguez Morales<sup>1\*</sup>, J. I. Escalante-García<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [juliana.rodriguez@cinvestav.mx](mailto:juliana.rodriguez@cinvestav.mx)

<sup>1</sup> Ingeniería Cerámica, Cinvestav IPN Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica No. 1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Coahuila, México.

### RESUMEN

Se revalorizó la ceniza volante (PFA) para producir un activador alcalino (AAS-PFA) tipo  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  reaccionando con  $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{CO}_3$  por síntesis termoquímica de menor demanda energética comparada con la producción industrial de silicatos alcalinos. Se implementó un diseño de experimentos tipo central compuesto, considerando los siguientes factores experimentales: Módulo ( $M_s = \% \text{SiO}_2 / \% \text{Na}_2\text{O}$ ), temperatura y relación molar  $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{CO}_3$ . El AAS-PFA se usó luego en cementos activados alcalinamente (CAA) base precursores de desecho de vidrio (DV) y cemento Portland (CP). Se analizó el desarrollo de resistencia en compresión hasta 28 días; obteniendo hasta 41.3 MPa y estabilidad bajo agua. FTIR, DRX y MEB indicaron formación de gel de sílice, gel N-A-S-H y C-S-H. Los CAA estudiados son una alternativa promisoriosa y sustentable comparado con el CP.

**Palabras clave:** ceniza volante; desecho de vidrio; activadores alcalinos; cementos sustentables.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción mundial anual de cemento Pórtland (CP) involucra descomposición de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y uso de combustibles fósiles, lo que resulta en alto consumo de combustibles y altas emisiones de más de 4,000 Mt  $\text{CO}_2$  (Olivier et.al., 2016), contribuyendo con más del 8% del  $\text{CO}_2$  antropogénico. Los cementos activados por álcalis (CAA) son una alternativa sustentable para mitigar tales problemáticas sin comprometer las propiedades mecánicas requeridas para construcción.

Los CAA solidifican como resultado de la activación química de un precursor finamente pulverizado con activadores alcalinos. Los precursores pueden ser de diversos orígenes, composición química, mineralogía y contenido de fase amorfa; pueden provenir de origen natural (como las cenizas volcánicas (López-Salas y Escalante-García, 2019)); sintéticos (como el metacaolín (Arellano et.al., 2014)); de desechos industriales (como las escorias granuladas (Escalante et.al, 2003) y la ceniza volante (Pan et.al., 2018)) o los recientemente desarrollados de desecho de vidrio (Menchaca-Ballinas y Escalante-García, 2019) o el producto de combinaciones de caliza-metacaolín (Perez-Cortes y Escalante-García, 2020). Por otra parte, un activador alcalino es una sustancia soluble en agua, que puede suministrar cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos, para disolver la estructura vítrea del precursor en los CAA (Van Deventer et.al., 2010). Entre los activadores más comunes están los compuestos ROH,  $\text{R}_2\text{CO}_3$  y  $\text{R}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  (donde n es el módulo que es variable y R= Na o K). Los compuestos  $\text{R}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  (silicatos de álcalis o vidrio soluble) son los más eficientes para potenciar las propiedades mecánicas de los CAA, pero también los más caros y de mayor demanda energética (Perez y Escalante, 2020).

La ceniza volante (PFA) es un subproducto silicoaluminoso de la combustión de carbón para generar electricidad en plantas carboeléctricas. En el mundo se generan más de 900 Mt/año (Rendon, et.al., 2019) y en México son más de 2 Mt/año y hay más de 25 Mt acumuladas en tiraderos. La PFA generada en el Estado de Coahuila tiene en promedio un 60-70% de fase amorfa (Ortega-Zavala, 2019) y composición química rica en sílice y alúmina, por lo que es potencialmente susceptible de reaccionar con compuestos alcalinos para sintetizar activadores alcalinos con menores implicaciones ambientales dado que la PFA es abundante, fácilmente disponible y no quiere altas temperaturas de procesamiento. Por otra parte, el desecho de vidrio (DV) ocupa el 5.9% del volumen total de los desechos sólidos urbanos y solo se recicla el 12% (Menchaca-Ballinas, 2020). En el año 2015 se generaron alrededor de 125 Mt/año de vidrio en el mundo; La composición más común es del tipo sílice-soda-cal, que por su estructura predominantemente amorfa y composición química funciona como precursor en CAA.

Para promover la revalorización masiva de la PFA y el DV, esta investigación propone innovar en la síntesis de un activador alcalino (AAS) del tipo  $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ , basado en el tratamiento termoquímico de PFA con compuestos de NaOH/ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; dicho activador se usó posteriormente para activar CAA con precursores de DV y DV adicionado con 30 %CP. Se estudió el desarrollo de la resistencia a la compresión y aspectos microestructurales en función de la composición de los cementos.

## 2. PROCEDIMIENTO

Para la síntesis del activador alcalino (AAS-PFA) se empleó una ceniza volante (PFA) Clase F, de bajo contenido de CaO, de la planta de la Comisión Federal de Electricidad en Nava, Coahuila, México. La PFA se activó mecánicamente usando un molino rotatorio con bolas de acero, con capacidad de carga de 20 kg y 100 kg de bolas, operado a 56 rpm, el tamaño de partícula promedio medido por difracción de láser fue de 44.93 $\mu\text{m}$ . El precursor usado en CAA fue DV del tipo sílice soda cal, de envases de bebidas; este se trituró, se secó a 100°C por 24h y se molió en el molino

descrito arriba a un área superficial Blaine de 600m<sup>2</sup>/kg acorde a recomendaciones previas (Menchaca-Ballinas, 2020). Adicionalmente, se colaron pastas con adición de 30% Cemento Portland Compuesto, Clase Resistente 40 (CPC40) respecto al total de la masa del DV+AAS-PFA. La Tabla 1 presenta la composición química de las materias primas medidas por Fluorescencia de rayos X (espectrómetro Bruker modelo S4 PIONNER).

Tabla 1. Composición química de las materias primas para AAS-PFA y precursor de DV.

% en peso de óxidos del AAS							
Composición	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
PFA	62.54	23.91	5.64	5.1	1.18	1.71	-----
DV	67.37	1.11	0.848	11.16	0.041	0.2	14.26
CP	20.23	4.28	3.28	60.63	<0.10	0.49	0.19
NH	-----	-----	-----	-----	-----	-----	77.5
NC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	58.5

Los álcalis usados para la síntesis del activador alcalino de PFA (AAS-PFA) fueron NaOH y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> grado industrial; estos se mezclaron en seco y en solución con los polvos de PFA. El procesamiento termoquímico se realizó en una mufla (Brother Furnace XD 1400-S) durante 60 minutos, a temperaturas acorde con el diseño experimental propuesto por la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) basado en un Diseño Central Compuesto (DCC) de tipo (1) (Montgomery, 2004)

$$N = 2^k + 2k + C_0 \quad (1)$$

Se evaluó el efecto de 3 factores experimentales (k), cada uno con 5 niveles (Tabla 2) resultando en (2<sup>3</sup>) puntos factoriales + (2\*3) puntos axiales + (1) punto central (C<sub>0</sub>): esto resultó en un total (N) de 15 experimentos más 5 repeticiones en el punto central para reducir el error experimental. La Tabla 3 describe la matriz experimental completa para la síntesis del AAS-PFA.

Tabla 2. Factores y niveles en el diseño experimental acorde al DCC

Factores	Niveles				
Módulo/tipo del silicato de sodio (Ms o n)	0.5	1	1.5	2	2.5
Temperatura (°C)	150	200	250	300	350
%Mol NaOH (NaOH-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0.9	0.925	0.95	0.975	1

El AAS-PFA obtenido se procesó en un molino de bolas rotatorio durante 45 min para obtener tamaños de partícula <100µm y se usó posteriormente en la preparación de pastas de cementos activados por álcalis, las cuales se curaron a 60°C por 24h y luego 20°C en seco y en húmedo; se usó una relación de agua/cemento de 0.35 para precursor de DV y 0.33 para pastas DV+CP. y el AAS se añadió en un 12% Na<sub>2</sub>O relativo a la masa del precursor de vidrio. La variable de respuesta fue la resistencia a la compresión (RMC) a 1, 7, 14, 28 y 120 días de curado, usando una prensa hidráulica automatizada con una celda de carga de 250 kN a una velocidad constante de 200 N/s.

Tabla 3. Matriz de diseño experimental para la síntesis de AAS-PFA conforme MSR.

Número de formulación	Nomenclatura AAS-PFA DV / DV+CP	Ms	T (°C)	% Molar NH-NC	Distribución espacial	% e.p. Na <sub>2</sub> O en AAS-PFA
1	1-300-0.925	1	300	0.925	factorial	34
2	2-200-0.925	2	200	0.925	factorial	22
3	1.5-250-0.95	1.5	250	0.95	central	27
4	2-200-0.975	2	200	0.975	factorial	23
5	2.5-250-0.95	2.5	250	0.95	axial	19
6	1.5-250-1	1.5	250	1	axial	28
7	1.5-250-0.95	1.5	250	0.95	central	27
8	1-200-0.975	1	200	0.975	factorial	35
9	1.5-150-0.95	1.5	150	0.95	axial	27
10	2-300-0.975	2	300	0.975	factorial	23
11	1.5-350-0.95	1.5	350	0.95	axial	27
12	1.5-250-0.95	1.5	250	0.95	central	27
13	0.5-250-0.95	0.5	250	0.95	axial	47
14	1-200-0.925	1	200	0.925	factorial	34
15	1.5-250-0.95	1.5	250	0.95	central	27
16	1.5-250-0.95	1.5	250	0.95	central	27
17	1-300-0.975	1	300	0.975	factorial	35
18	2-300-0.925	2	300	0.925	factorial	22
19	1.5-250-0.9	1.5	250	0.9	axial	27

Se utilizó el software Desing Expert para analizar los promedios estadísticos de la RMC a 28 días mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un  $\alpha = 0.05$ , (95% de confianza). Se determinaron los coeficientes con significancia estadística para obtener la ecuación de regresión cuadrática (2) que describió la curvatura de la superficie de respuesta, donde:  $\beta$  son los parámetros del modelo y  $x$  son los factores (Raymond et al., 2016).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Para la caracterización cualitativa de las pastas de cemento alcalino, las muestras se tamizaron por la malla 200, con tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$ . Se usó difracción de rayos X (XRD, Phillips, XPert 3040) operado de 10-80° 2 $\theta$  y velocidad de 0.025 °/s, cada 3 segundos utilizando radiación  $K\alpha$  de Cu a 40 kV y 30 mA. La identificación de grupos funcionales se realizó por análisis de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (ATR-FTIR, PerkinElmer Frontier FT-IR/NIR) con un accesorio ATR MIRacle Diamond Frontier), a una resolución de 1  $\text{cm}^{-1}$  en un rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  sobre muestras escaneadas 16 veces.

La microestructura de pastas selectas se caracterizó por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB, Philips, XL-30 ESEM). Las muestras se montaron en resina epóxica y se sometieron al vacío en un desecador a temperatura ambiente durante 48 h. La superficie de la muestra se desbastó manualmente con las lijas de carburo de silicio gradualmente más finas; posteriormente se sometieron a pulido manual con un paño y pastas de diamante de 3, 1.25 y 0.25 micrones. Se obtuvieron imágenes por electrones retrodispersados y se realizaron de 25 a 30 análisis puntuales de espectrometría por dispersión de energía (EDS) por muestra en los productos de reacción; las condiciones de operación fueron: 40s de tiempo de medición, magnificación de 1000x, un *spot size* 4-5 y distancia de trabajo de 7.5-10 mm.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resistencia mecánica

La Figura 1 a) describe el comportamiento mecánico de las pastas AAS-PFA-DV en función del tiempo. Las pastas 1-1-300-0.925 y 19-1.5-250-0.9 presentaron las mayores RMC a 28 días para curado en seco (22.4MPa y 21.6MPa) y bajo agua de (7.66MPa y 7.0MPa), respectivamente. A 120 días la formulación 1-1-300-0.925 alcanzó 87.4MPa, lo que estaría relacionado con dos posibles fenómenos: 1) la formación de más productos de reacción a lo largo del tiempo (gel de sílice y / o CSH); y 2) una evolución de la estructura molecular del gel de sílice a través de la polimerización (Menchaca-Ballinas, 2020). La RMC más baja a 28 y 120 días (5.51MPa y 26.26MPa) se obtuvo para la pasta con Ms= 2.5 (5-2.5-250-0.95) lo que sugiere que módulos mayores que 2 reducen la RMC. La Figura 1 b) corresponde a las pastas de AAS-PFA-DV +30%CP; la mayor RMC fue para 2-2-200-0.925 y 6-1.5-250-1 con RMC a 28 días de 31.4 y 41.3 MPa, y 27.3 y 33.8 MPa bajo agua, respectivamente. A 120 días la RMC aumento a 41 MPa y 42.8 MPa respectivamente en seco.

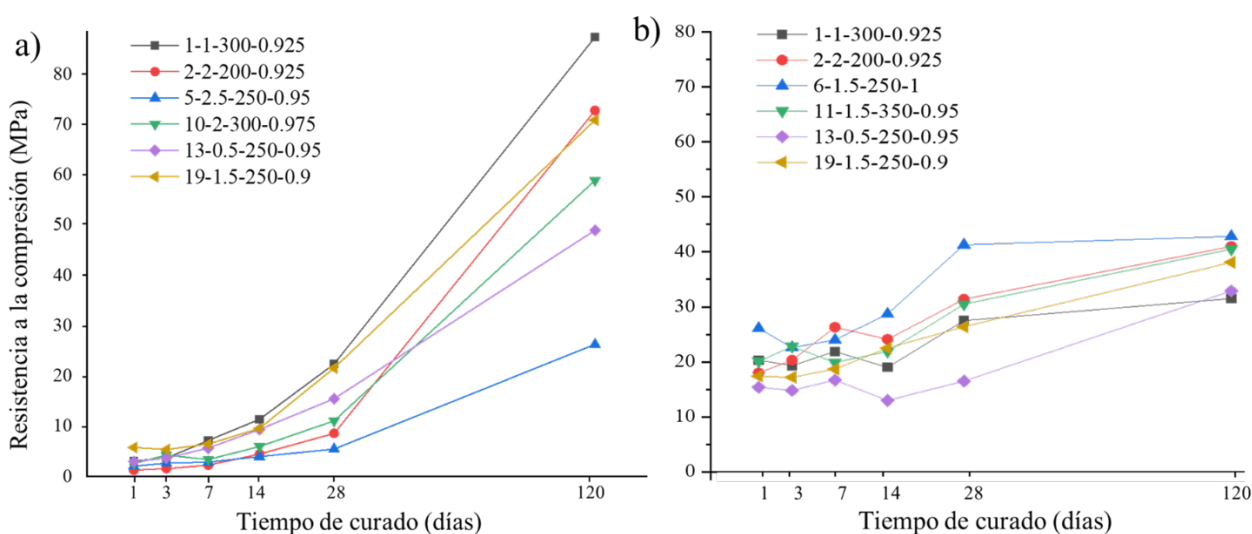


Figura 1. Resistencia a la compresión vs tiempo para las pastas de AAS-PFA con precursor de a) DV, b) DV+30%CP a 28 días.

#### 3.2 Superficie de respuesta

Los resultados del ANOVA se usaron para identificar la influencia de los factores significativos (A-Ms, B-Temperatura, C-% molar NH-NC) y sus interacciones en el comportamiento de la variable de respuesta. En la Figura 2 a) se encontró que los factores e interacciones A, B, C, AB, AC, BC, C<sup>2</sup> fueron significativos. Los factores A y C tienen pendiente negativa indicando que en pastas con precursor de DV son preferibles bajos Ms y %molar NH-NC, lo cual tendría sentido si se considera la composición sódica del vidrio, y que, al aumentar el % Na<sub>2</sub>O podría conducir a la carbonatación y decremento de RMC. Por otro lado, el factor B tuvo pendiente positiva, lo que puede indicar que mayores temperaturas en el tratamiento termoquímico del AAS-PFA promueven una mayor disolución del DV y podría explicar porque las pastas de DV activadas con AAS-PFA sintetizados a temperaturas cercanas a 300°C presentaron mejores RMC. La Figura 2 b) corresponde a los efectos de los factores en pastas AAS-PFA-DV+ 30%CP; se notó que A, B, C, AB, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup> y C<sup>2</sup> fueron significativos y que la interacción AB implica que aumentando la T y el Ms se puede mejorar la RMC.

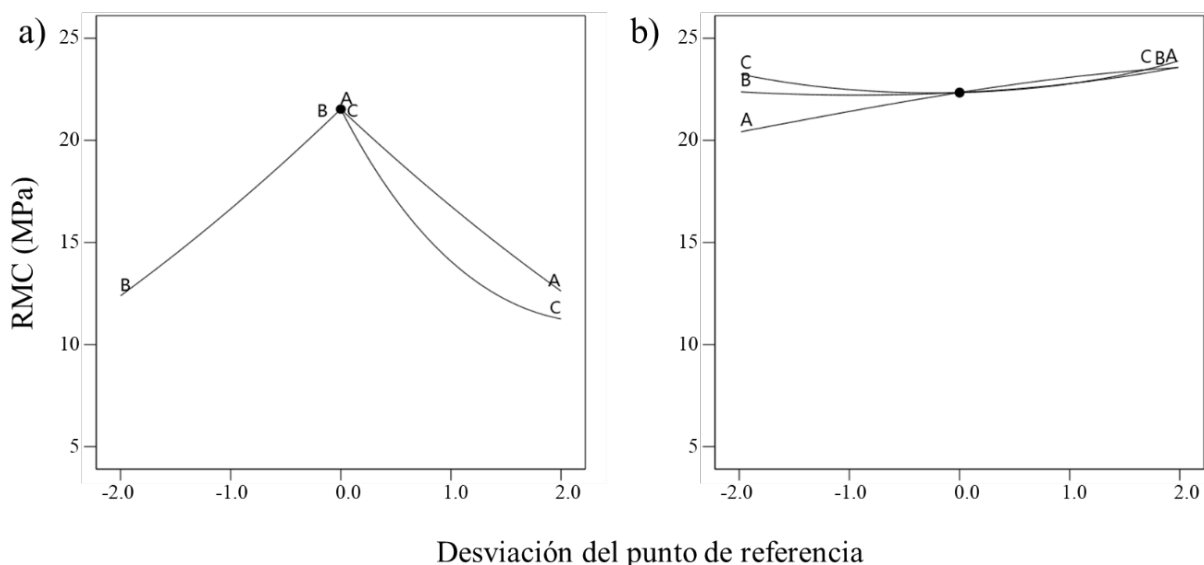


Figura 2. Efectos principales de los factores individuales en la RMC en pastas AAS-PFA con precursor de a) DV, b) DV+30%CP a 28 días.

A partir del ANOVA se obtuvieron los coeficientes de la ecuación de regresión cuadrática (3) para pastas de AAS-PFA-DV y (4) para pastas AAS-PFA-DV+30%CP, que permitieron modelar las superficies de respuesta a 28 días observadas en la Figura 3 a). La corrida evaluada en pastas de AAS-PFA-DV fue 1-1-300-0.925 (Figura 3 a) indican que la región óptima para aumentar la RMC es en  $M_s < 1.7$ ,  $T \geq 300$  °C y %molar NH-NC < 0.92. Para pastas de AAS-PFA-DV+30%CP se evaluó la corrida 6-1.5-250-1, fijando el valor %molar-NH-NC=1. En la superficie de respuesta (Figura 3 b) se observaron dos áreas en rojo correspondientes a regiones óptimas para la RMC. La región del lado izquierdo indica que puede obtenerse hasta 42 MPa tratando el AAS a  $T > 300$ °C y  $M_s$  entre 0.5 y 1.7; en contraste, el lado derecho indica que puede aumentarse la RMC con  $M_s > 2.5$  y  $150 < T < 230$ °C en la síntesis del AAS.

$$\begin{aligned} \text{MSR DV (28 días)} = \\ +328.69 - 11.21M_s + 0.22 T - 717.21\% \text{mol NHNC} - 0.004M_s * T + 12.24 M_s \\ * \% \text{mol NHNC} - 0.22 T * \% \text{mol NHNC} + 392.5(\% \text{mol NHNC})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{MSR DV + 30\%CP(28 días)} = \\ -4.68 - 0.07M_s + 0.00002 T + 10.121\% \text{mol NHNC} + 0.0001M_s * T \\ + 0.005(M_s)^2 - 6.61(T)^2 - 5.34(\% \text{mol NHNC})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

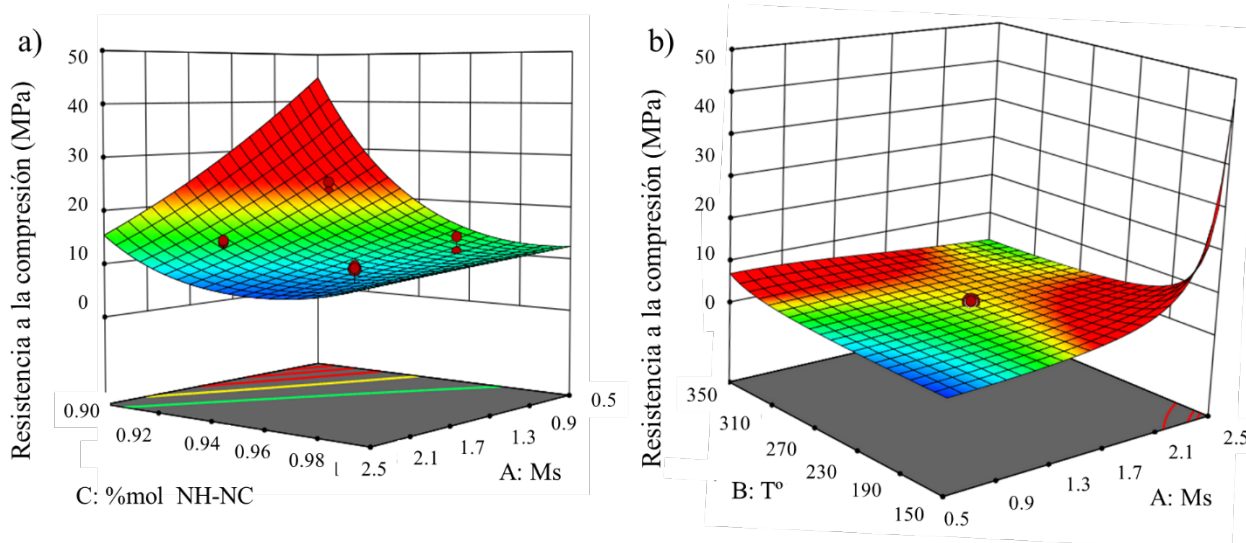


Figura 3. Superficie de respuesta a 28 días para la interacción a) AC (Ms\*%molar NH-NC) en T=300°C de la pasta DV 1-1-300-0.92 b) AB (Ms\*T) en %molar NH-NC=1 de la pasta DV+30%CP 6-1.5-250-1.

### 3.3 Caracterización de los AAS-PFA

#### 3.3.1 Análisis FTIR

La Figura 4 muestra el espectro FTIR de los AAS-PFA. La línea roja corresponde a la PFA sin tratamiento termoquímico, en la que se observaron 3 bandas anchas, características de las vibraciones internas de los silicatos. La banda 2 en  $1055\text{ cm}^{-1}$  se asocia a vibraciones asimétricas del tipo (T=Si o Al), la banda 3 en  $794\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones del tipo Si-O-Si (del cuarzo) y la banda 4 en  $598\text{ cm}^{-1}$ , se asocia a enlaces T-O por la presencia de mullita T-O (Ortega-Zavala, 2019).

Después del tratamiento termoquímico de la PFA, se observó la disolución de las especies de silicio por acción de los álcalis indicada por la reducción de las bandas 2 (mullita) y 3 (cuarzo). Los AAS-PFA mostraron una banda \* (a  $1400\text{ cm}^{-1}$ ), atribuida a vibraciones del enlace C-O en los carbonatos de sodio (termonatrita). Así mismo, se notaron dos nuevas bandas menores en los ASS: banda a en  $800\text{ cm}^{-1}$  y banda b en  $720\text{ cm}^{-1}$ , asociadas a las vibraciones de estiramiento T-O (T=Si ó Al) asociadas a la formación del SN (López, 2021). La posición exacta de estas bandas depende de la relación Al/Si de partida y está determinada por el contenido de átomos de Al por unidad en la estructura de los productos de reacción; se desplaza hacia posiciones menores a medida que aumenta el contenido de Al en posición tetraédrica (Ortega-Zavala, 2019).



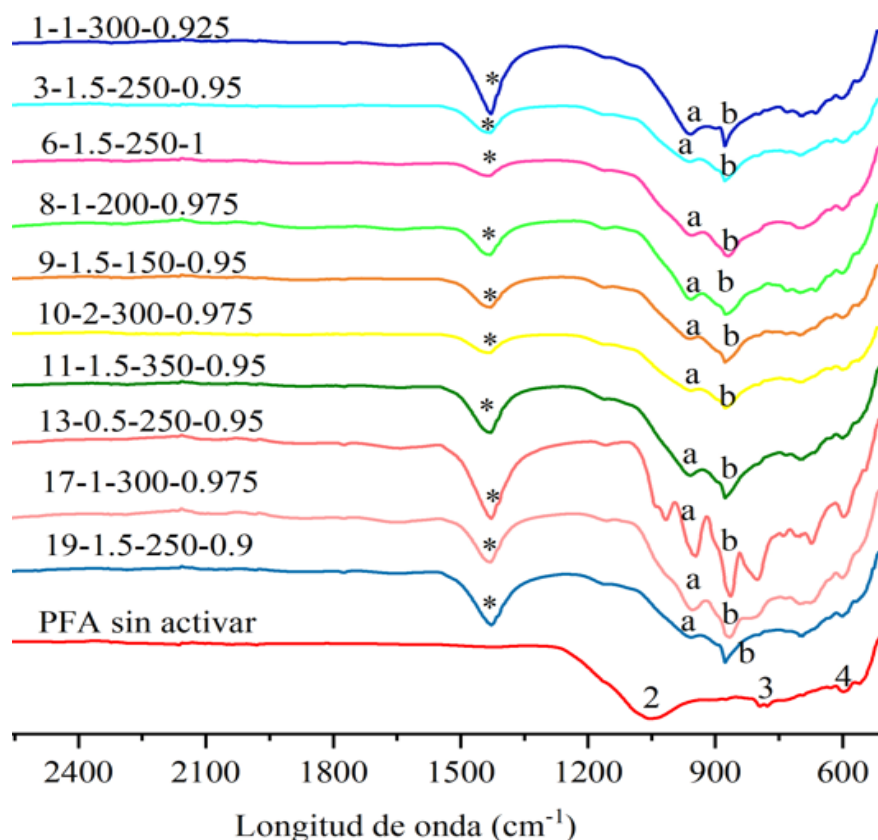


Figura 4. Espectros FTIR de AAS-PFA

2=  $\nu_3$ T-O (T=Si ó Al) (mullita), 3= Si-O (cuarzo), 4= Si-O-Si, \*= C-O, a=  $\nu_2$  T-O (T=Si ó Al), b= T-O.

### 3.3.2 Análisis DRX

La Figura 5 presenta los resultados de DRX. La PFA sin tratamiento termoquímico es parcialmente amorfa con un halo amorfo entre  $2\theta=15-35^\circ$ , también mostró fases cristalinas de cuarzo (Q,  $26.12^\circ 2\theta$ ), Mullita (M,  $Al_6Si_2O_{13}$ ) y Calcita ( $CaCO_3$ ) en menor intensidad. Después del tratamiento termoquímico se observó una reducción de la intensidad del halo amorfo, indicando reacciones con los álcalis en el horno; así mismo, se redujo la intensidad del pico del cuarzo, lo que sugiere la disolución de especies cristalinas de  $SiO_2$  en la solución alcalina para la formación del activador AAS, lo cual se corrobora por la aparición de los picos correspondientes a silicato sódico (Ortega-Zavala, 2019). También se notó la formación de natrita ( $Na_2CO_3$ ), que sería de esperarse por la exposición al  $CO_2$  atmosférico dentro del horno o durante la molienda del AAS-PFA.

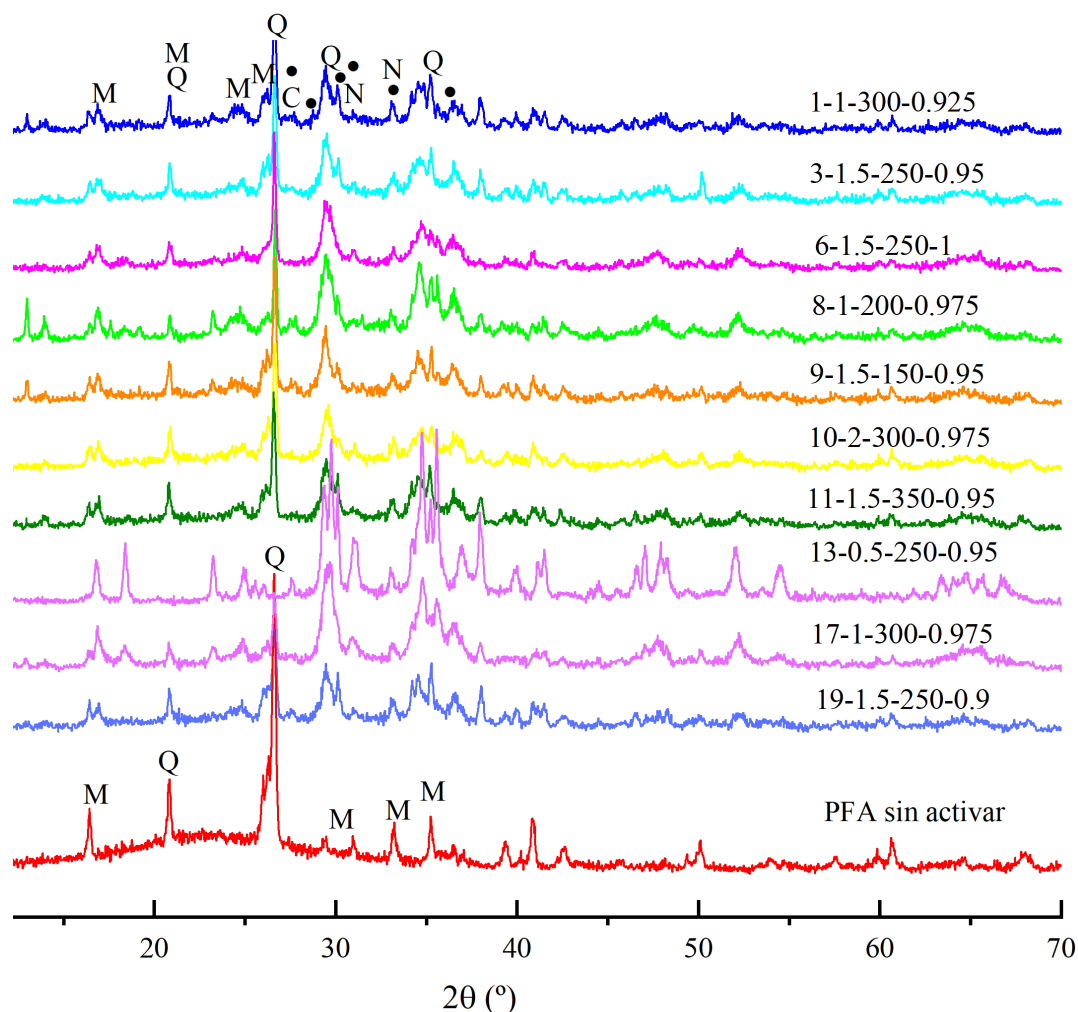


Figura 5. Patrones de difracción de rayos X de AAS-PFA  
 Q= Cuarzo, M=Mullita, N=Natrita, C=Calcita, ●Silicato Sódico

### 3.4 Caracterización de las pastas AAS-PFA + DV y AAS-PFA+DV+30%CP

#### 3.4.1 Análisis FTIR

La Figura 6 a) muestra los espectros FTIR de pastas de DV activadas con AAS-PFA. El DV sin activar mostró una banda (1) ancha e intensa en  $988\text{ cm}^{-1}$ , asociada a las vibraciones de estiramiento asimétricas de Si-O en los grupos tetraédricos  $\text{SiO}_4$  de los silicatos (Torres et.al., 2014). Las pastas activadas mostraron un estiramiento de las vibraciones de Si-O-T de  $988\text{ cm}^{-1}$  hacia la región de  $800\text{ cm}^{-1}$ , indicando la despolimerización del  $\text{SiO}_4$  y la disolución del DV para la formación de gel de sílice. La disolución del  $\text{Ca}^+$  del DV, pudo conducir a la formación del C-S-H, evidenciado por la banda a  $960\text{ cm}^{-1}$  (Menchaca-Ballinas, 2020). La incorporación de agua en los productos de reacción es indicada por el pico a  $\sim 1645\text{ cm}^{-1}$  (H-O-H). Se evidenciaron vibraciones de carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) en los picos cercanos a  $1450$  y  $850\text{ cm}^{-1}$  (Menchaca, et.al., 2021). Las bandas FTIR a menos de  $800\text{ cm}^{-1}$  están asociadas a las vibraciones de estiramiento T-O (T=Si o Al), que sugieren la formación del gel tipo N-A-S-H, debido a que durante la polimerización el Al sustituye al Si en sitios tetraédricos aunque también pueden atribuirse a los anillos amorfs (Si-O) presentes en el gel de sílice (Menchaca-Ballinas, 2020). En la Figura 6 b) los sulfatos presentes en el CP anhidro (banda 5) corresponden al yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) o anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) del CP; al añadir el agua estos reaccionan con los aluminatos de la banda 6 produciendo ettringita (Piqué y Vázquez, 2012). El desplazamiento de la banda 5 ( $988\text{ cm}^{-1}$ ) en CP hacia regiones cercanas

a  $800\text{cm}^{-1}$  luego de la activación alcalina, sugiere la disolución del  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  y formación de productos de reacción C-S-H y de gel de sílice (debido a la reacción de  $\text{SiO}_4$ ); la visualización de este último se dificulta, porque las señales se encuentran en una región similar al C-S-H, y por tanto, podrían estar superpuestas (Menchaca-Ballinas, et.al., 2021). La banda 7 en la región de  $541\text{cm}^{-1}$  del CP, se asocia con las vibraciones de deformación simétrica y asimétrica de los tetraedros de silicato (Si-O-Si) de la alita y de la belita; el desplazamiento de estas bandas hacia números de onda mayores, indican la formación del gel de sílice y de C-S-H por la reacción de las fases con el agua (Menchaca-Ballinas, et.al.,2021). Los picos cercanos a  $1600\text{cm}^{-1}$  indican la presencia de agua en los productos de reacción, mientras que los picos cercanos a  $1450\text{cm}^{-1}$  y corresponden a la aparición de carbonato de calcio( $\text{CaCO}_3$ ) que puede deberse a la carbonatación natural que experimenta el C-S-H y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formados por la hidratación del CP (Menchaca-Ballinas, et.al., 2021).

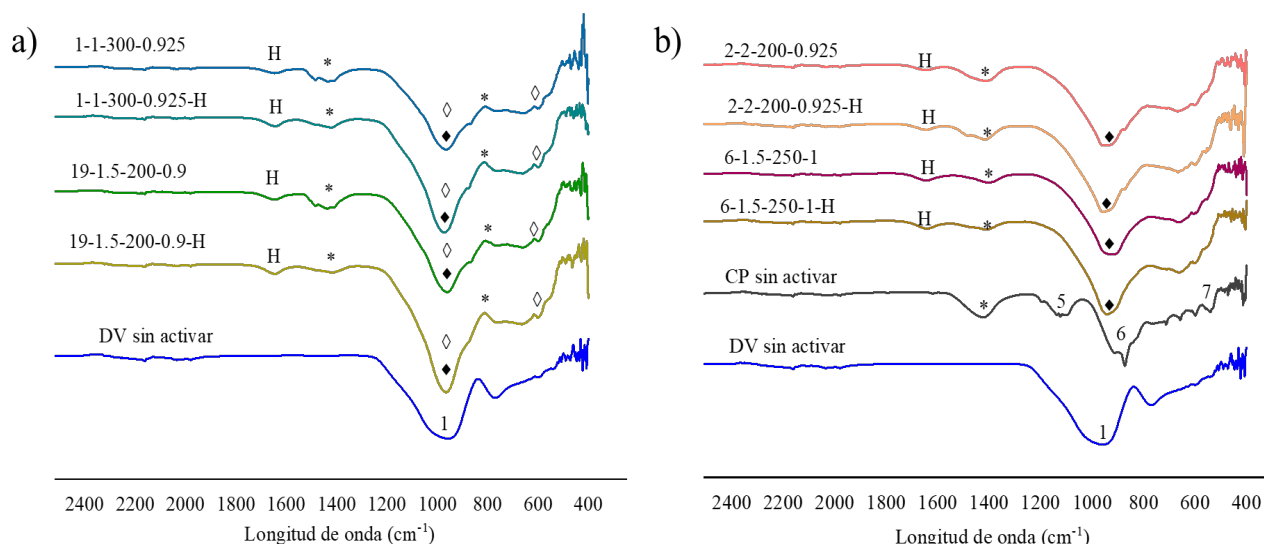


Figura 6. Espectros FTIR de pastas a) AAS-PFA+DV; b) AAS-PFA+DV+30%CP  
1= Si-O; \*=C-O del  $\text{CO}_3$ , H= H-OH, ♦=C-S-H, ◇=N-A-S-H, 1= Si-O-S; 5=Sulfatos  $\text{SiO}_4$ , 6= $\text{C}_3\text{A}$ ,  
7= (Si-O-Si) de  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$

### 3.4.2 Análisis DRX

La Figura 7 presenta los patrones de DRX de pastas selectas de DV con ASS-PFA y adicionadas con 30%CP. La disolución del DV para formar productos de reacción se manifestó por la reducción de intensidad y desplazamiento del halo amorfo del DV hacia ángulos mayores (Menchaca, et.al.,2021) (Figura 7 a); tal desplazamiento indicó la formación de nuevas fases, que acorde con FTIR podría ser un gel de aluminosilicatos alcalino amorfo (N-A-S-H). Por otro lado, se observaron picos correspondientes a termonatrita (TN, carbonato hidratado de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) por la hidratación del carbonato (C-O mostrado en FITR) con el sodio del DV. Las señales asociadas al C-S-H se observan alrededor de los  $30^\circ 2\theta$  y traslapan con las de calcita (la calcita presente en la pasta 1-1-300-0.925-28 puede ser proveniente de la PFA o deberse a contaminación de la muestra por molienda y tamizado en el mismo mortero y malla del CP). No se evidenció presencia de portlandita, por lo que puede asumirse que el  $\text{Ca}^{2+}$  liberado del DV se incorporó rápidamente como producto de reacción en el gel de sílice y C-S-H. Por otro lado, la presencia de Portlandita (CH) (Figura 7 b) y su decreciente intensidad en las pastas curadas en seco y bajo el agua, indican que se formó C-S-H. Las señales débiles de C-S-H se superpusieron con los de la calcita, lo que dificulta evidenciar la formación del primero; sin embargo, el desarrollo de la RMC y la estabilidad de las pastas que incluyeron CP sugieren su formación (López-Salas, 2021).

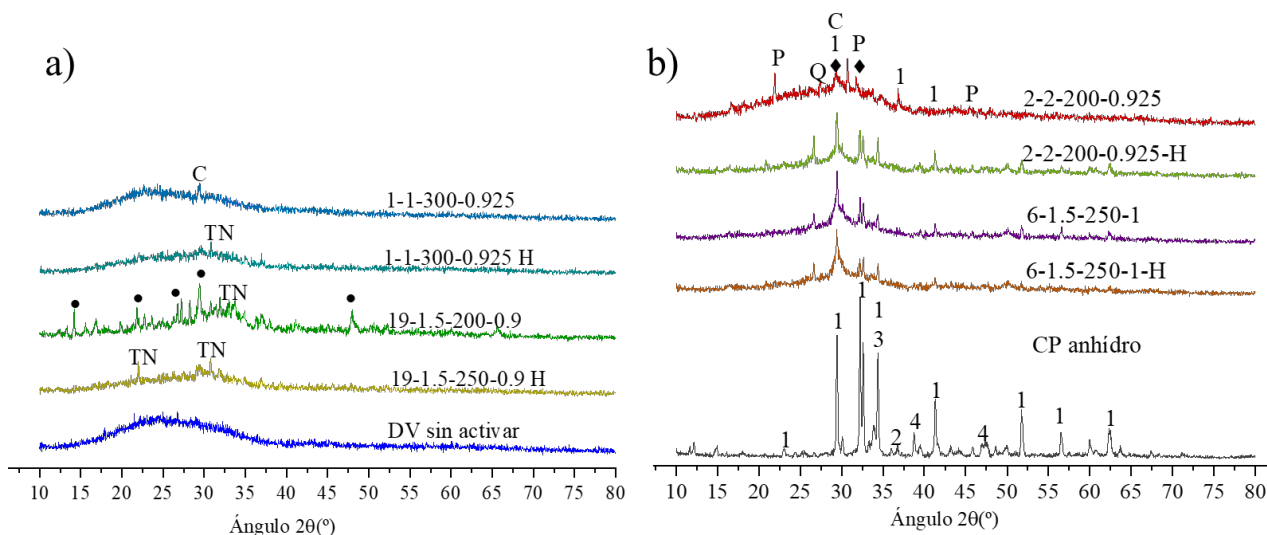


Figura 7. Patrones de difracción de rayos X de pastas a) AAS-PFA+DV y b) AAS-PFA+DV+30%CP

TN=Termonatríta ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), C=Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) ●=Silicato Sódico ( $\text{Na}_2\text{SiO}$ ), Q= Cuarzo, 1= $\text{C}_3\text{S}$ , 2= $\text{C}_3\text{A}$ , 3= $\text{C}_2\text{S}$ , 4= $\text{C}_4\text{AF}$ , C=Calcita, ( $\text{CaCO}_3$ ), P=Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ◆=C-S-H

### 3.5 Análisis microestructural MEB

#### 3.5.1 Análisis de la PFA

Las reactividad de la PFA hacia un medio alcalino está determinada principalmente por las características de la fase vítrea silicoaluminosa y el tamaño de partícula (Mehta, 2004), de forma que es adecuada para someterse al tratamiento termoquímico con álcalis para formar el AAS. La Figura 8 a) corresponde a la microestructura MEB de la PFA sin tratar, en la que pueden notarse partículas porosas y morfología heterogénea e irregular; hay cenosferas, partículas lisas y regulares de cristales de cuarzo, además de partículas de hierro en menor proporción (Ortega-Zavala, 2019). La Figura 8 b) muestra una plerosfera expuesta, y también una gran partícula vesicular e irregular (indicios de residuos de carbono sin quemar); también pueden verse partículas no esféricas. Esto evidencia una morfología PFA heterogénea (Diamond, 1986).

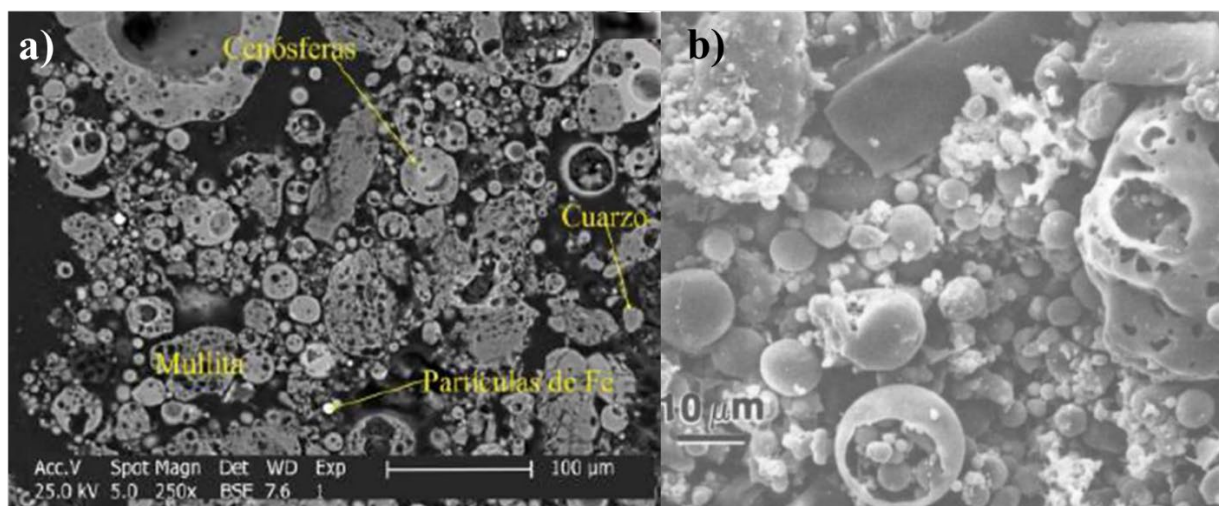


Figura 8. a) Micrografía de PFA empleada (Ortega-Zavala, 2019). b) Heterogeneidad de morfología de PFA. Campo que muestra una plerosfera, una partícula vesicular y varias otras partículas no esféricas (Diamond, 1986)

### 3.5.2 Análisis de las pastas AAS-PFA+DV

La Figura 9 corresponde a la microestructura de la pasta 1-1-300-0.925. Las partículas de vidrio se identifican por su morfología angular y tonalidad clara, mientras que las de PFA se reconocen por su morfología esférica o irregular. Las partículas de DV mostraron un anillo de tonalidad gris más oscuro, correspondiente a productos de reacción del DV formados a partir de un mecanismo en estado sólido con el medio alcalino creado por el AAS-PFA (Escalante y Sharp, 2001). Sin embargo, tal mecanismo sería posterior a uno inicial de disolución de las partículas de DV en el medio alcalino y posterior precipitación de productos de reacción cementosos en los espacios inicialmente ocupados por el agua. El análisis EDS reveló que la matriz cementosa se compone principalmente de Si, Al y Na, lo que sugiere la formación del gel de sílice y gel N-A-S-H por los mecanismos antes referidos.

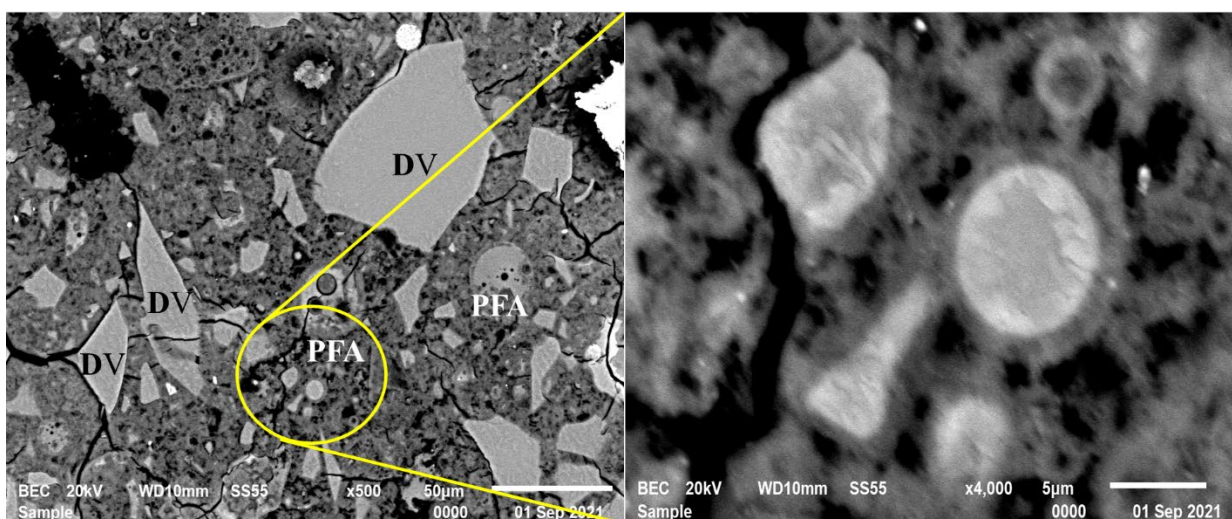


Figura 9. Micrografía de la pasta 1-1-300-0.925 a 28 días.

La Figura 10 corresponde a las pastas de DV+30%CP. Se notó una matriz heterogénea y densa, con partículas de DV, partículas de PFA y de CP parcialmente reaccionadas. Estas últimas se notaron distribuidas homogéneamente en la matriz y pueden identificarse por la tonalidad más

brillante correspondiente a las fases del CP sin reaccionar, debido al contenido de Fe (alto número atómico) y la ausencia de H<sub>2</sub>O (bajo número atómico) (López-Salas 2021). Estas partículas tienen un anillo gris de productos de reacción formados por mecanismos en estado sólido. Las zonas negras con formas angulares corresponden al desprendimiento de partículas de vidrio y las amorfas son de poros y grietas en la microestructura.

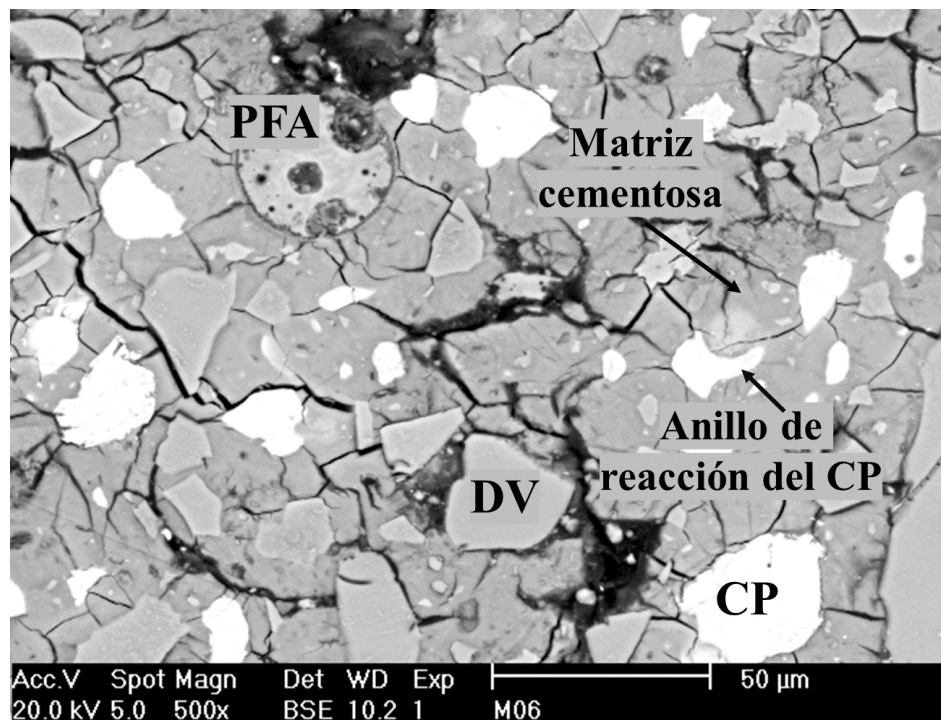


Figura 10. Micrografía de la pasta DV+30%CP 6-1.5-250-1 a 28 días.

Los resultados indican que los precursores efectivamente se disolvieron bajo el ataque alcalino del AAS, formando productos de reacción tipo gel N-A-S-H coexistente con gel C-S-H (Ortega-Zavala 2019) y gel de sílice. Esto concuerda con las observaciones de FTIR en las que la banda principal de Si-OT (T = Si o Al) se desplazó hacia números de onda más altos, lo que implica más Si en coordinación tetraédrica y la formación de N-A-S-H, mientras que la presencia del Ca<sup>+</sup>, pudo modificar la estructura lineal del gel de sílice promoviendo a formación del C-S-H cuando el DV reaccionó con el Ca(OH)<sub>2</sub> (Menchaca-Ballinas 2020). Es posible que los productos de reacción también se traten de geles modificados entrelazados de tipo C-N-A-S-H o C-A-S-H (considerando que el vidrio libera SiO<sub>4</sub>, Ca<sup>+</sup> y Na) (Menchaca-Ballinas, 2020) y (López-Salas 2021).

#### 4. CONCLUSIONES

El tratamiento termoquímico de la ceniza volante (PFA) con los compuestos alcalinos permitió la disolución de especies de Si y Al de su red vítrea, permitiendo producir un activador alcalino, funcional para cementos a base de precursores de desecho de vidrio (DV).

Las pastas AAS-PFA+DV alcanzaron resistencias a la compresión de hasta 22 MPa a los 28 días, y presentaron estabilidad durante el curado bajo agua. A 120 días de curado, las pastas alcanzaron más de 70 MPa, de forma que el desecho de vidrio (DV) activado con AAS-PFA superó las propiedades mecánicas en comparación con el cemento Portland.

El análisis por DRX reveló el desplazamiento y disminución del halo amorfo del precursor de desecho de vidrio hacia ángulos mayores, indicando su disolución y la consecuente formación de

productos de reacción cementosos de naturaleza amorfa que pudieran incluir: gel de sílice, gel N-A-S-H (con Si y Al del AAS-PFA) y C-S-H (Ca y Si del DV).

En pastas con 30%CP ocurrió la condensación de un gel C-S-H amorfo en coexistencia con gel N-A-S-H y gel de sílice modificado de tipo (N, C)-A-S-H, que conservó las propiedades mecánicas del gel de sílice y la estabilidad bajo el agua del C-S-H.

La técnica del método de superficie de respuesta basado en diseño central compuesto es una herramienta robusta útil para elucidar los efectos principales en la composición de un cemento activado por álcalis y facilitan la optimización de las formulaciones para mejores propiedades mecánicas con el menor uso de recursos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por la beca Rodríguez-Morales, Juliana.

## 6. REFERENCIAS

- Arellano-Aguilar, R, Burciaga-Díaz, O., Gorokhovskiy, A., Escalante-García, J. I. (2014). *Geopolymer Mortars Based on a Low Grade Metakaolin: Effects of the Chemical Composition, Temperature and Aggregate:Binder Ratio*. Construction and Building Materials 50: 642–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.023>.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., Brice, G. B. (2010), *Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials*. Waste and Biomass Valorization 1, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9015-9>
- Diamond, S. (1986). *Particle Morphologies in Fly Ash*. Cement and Concrete Research, 16 (4), pp. 569–579. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90095-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90095-5)
- Escalante-García, J. I., Sharp, J. H. (2001). *The Microstructure and Mechanical Properties of Blended Cements Hydrated at Various Temperatures*. Cement and Concrete Research 31 (5): 695–702. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00471-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00471-9).
- Escalante-García, J. I., Fuentes, A. F., Gorokhovskiy, A., Fraire-Luna, P. E., Mendoza-Suarez, G. (2003). *Hydration Products and Reactivity of Blast-Furnace Slag Activated by Various Alkalis*. Journal of the American Ceramic Society 86 (12): 2148–2153. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03623.x>.
- López-Salas, J. (2021). *Cementos Sustentables Híbridos a Base de Materia Prima Volcánica*. Tesis de Maestría En Ciencias En Sustentabilidad de Los Recursos Naturales y Energía. Cinvestav.Unidad Saltillo.
- López-Salas, J., Escalante-García J. I. (2019). *Cementos De Bajo Impacto Ambiental Por Activación Híbrida De Material Volcánico*. Conpat Chiapas 2019 1: 1–10. <https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V1CC147>.
- Mehta, P. K. (2004). *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development*. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 3–14.
- Menchaca-Ballinas, L. E., Escalante-García, J. I. (2019). *Low CO<sub>2</sub> Emission Cements of Waste Glass Activated by CaO and NaOH*. Journal of Cleaner Production 239 (August): 117992. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117992>.
- Menchaca-Ballinas, L. E., Gorokhovskiy, A. V., Escalante-García, J. I. (2021). *Waste Glass as a Precursor in Sustainable Hydraulic Cements Activated with CaO-NaOH-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>*. Construction and Building Materials 302 (October): 124099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124099>.

- Menchaca-Ballinas, L. E. (2020). *Cemento Compósito Sustentable de Caliza-Desecho Vítreo Activado*. Tesis Doctoral En Ciencias En Ingeniería Metalúrgica y Cerámica. Cinvestav. Unidad Saltillo.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. In Limusa Wiley, edited by SA de C.V Grupo Noriera Editores Limusa, Segunda ed. Universidad Estatal de Arizona.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. A. (2016). *Trends in Global CO2 Emissions: 2016 Report*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & European Commission's Joint Research Centre (JRC), 86. <https://doi.org/https://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions>.
- Ortega-Zavala, D. E. (2019). *Cementos Químicamente Activados a Base de Piedra Caliza y Ceniza Volante*. Tesis Doctoral En Ciencias En Ingeniería Metalúrgica y Cerámica. Cinvestav Unidad Saltillo.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhrer, R., Murphy, T. (2018). *Compressive Strength and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Binders at High Temperature*. Cement and Concrete Composites 86: 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.011>.
- Pérez-Cortes, P., Escalante-García, J. I. (2020). *Alkali Activated Metakaolin with High Limestone Contents – Statistical Modeling of Strength and Environmental and Cost Analyses*. Cement and Concrete Composites 106 (November 2019): 103450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>.
- Piqué, T.M., Vázquez, A. (2012). *Uso de Espectroscopía Infrarroja Con Transformada de Fourier (FTIR) En El Estudio de La Hidratación Del Cemento*. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo 3 (2): 62–71.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. (2016). *Responde Surface Methodology*. In Wiley Series in Probability and Statistics, Fourth ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-118-91601-8.
- Rendón-Belmonte, M., Martínez-Madrid, M., Martínez-Pérez, O. (2019). *Concretos Híbridos Durables y Sustentables, Con Ceniza Volante*. Instituto Mexicano de Transporte, no. 559: 46.
- Torres-Carrasco, M., Palomo, J. G., Puertas, F. (2014). *Sodium Silicate Solutions from Dissolution of Glasswastes. Statistical Analysis*. Materiales de Construcción 64 (314). <https://doi.org/10.3989/mc.2014.05213>



# PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES

DOI: <https://doi.org/10.21041/memoriasdecongresoXCNAM2022-PC>

**S2**

*Sección 2*

## PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES (PC)

Una reflexión sobre el uso de ceniza de bagazo de caña como reemplazo de cemento portland. <i>P. Montes-García (PC-731-MX) Plenaria Invitada</i>	1
Mapa de Danos da Edificação Histórica do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da Universidade Católica de Pernambuco - Brasil <i>A. R. Lemos, J. M. de Moura Júnior, E. C. Barreto Monteiro, R. R. Pinto (PC-813-VE) Plenaria Invitada</i>	15
Evaluación de los daños por corrosión influenciados por cloruros y lixiviación en una estructura de hormigón armado. Caso de estudio edificio Bacardí. <i>A. H. Oroza, A. Castañeda Valdés (PC-715-CU) Magistral Invitada</i>	25
Carbonatación: redefiniéndola como amienemiga <i>Y. A. Villagrán Zaccardi (PC-720-BEL) Magistral Invitada</i>	40
La resonancia magnética aplicada al estudio de materiales base cemento <i>P. Cano Barrita (PC-803-MX) Magistral Invitada</i>	52
Módulo de elasticidad dinámico en rocas obtenido mediante la velocidad de pulso ultrasónico y la densidad <i>M. A. Navarrete-Seras, E. M. Alonso-Guzmán, W. Martínez-Molina, H. L. Chávez-García, M. Arreola-Sanchez, J. A. Borrego-Perez (PC-738-MX)</i>	65
Estimación de la pérdida de masa de acero embebido en concreto de altas prestaciones expuesto a un ambiente marino natural con ciclos de congelamiento y deshielo <i>G. F. Gómez Luna, J.G. Epitacio Félix, P. Castro Borges, P. Montes García (PC-752-MX)</i>	72
Corrosión de acero de refuerzo en mezclas con agregado de concreto reciclado y cenizas puzolánicas <i>C. Bernabé Reyes, J. M. Ponce Ortega, A. Torres Acosta, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina (PC-780-MX)</i>	81
Relación empírica entre el perfil de concentración de cloruros y el de carbonatación en muestras de concreto expuestas a ambiente marino <i>A. Bacelis Jiménez, P. Castro Borges, M. Balancán Zapata, A. A. Torres Acosta, O. Troconis de Rincón (PC-807-MX)</i>	92
Análisis de la influencia del clima y su variabilidad en la vida útil de un pavimento <i>J. F. Mendoza, E. M. Alonso, W. Martinez (PC-809-MX)</i>	99



# PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES (PC)

Evaluación física y mecánica del concreto de alto desempeño adicionado con aditivo base policarboxilato y sílice frente al agente despasivante io cloruro.

*A. Maldonado Huante, E. M. Alonso Guzman, N. Díaz Gonzalez, H. L. Chávez Garcia, M. A. Mondragón Ornelas, M. A. Villanueva Guzman, W. Martínez Molina, V. A. Ramírez Carranza (PC-797-MX)*

109

Recarbonatación de estructuras de concreto reforzadas realcalinizadas bajo la norma NMX-C-553-ONNCCE-2018

*J. A. Paat Estrella, J. A. Miam Cuevas, M. Y. del Pilar Reyes, E. E. Maldonado Bandala, T. Pérez López, D. Nieves Mendoza (PC-808-MX)*

116

Efecto de la adición de fibras de bagazo de caña y nanopartículas de sílice mesoporosas tipo MCM-41 sobre propiedades de concreto reforzado.

*T. Pérez López, A. Michel, J. A. Paat Estrella, W. A. Talavera Pech (PC-812-MX)*

132

Evaluación de una nueva tipología de estribos embebidos en concreto frente a la corrosión inducida por cloruros

*A. Capistrano-García, J. Álvarez-Pérez, R. Orozco-Cruz, G. Fajardo-San-Miguel (PC-878-MX)*

151





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-731-MX  
Conferencia Plenaria Invitada  
pp. PC – 1 – 13



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Una reflexión sobre el uso de ceniza de bagazo de caña como reemplazo de cemento Portland

P. Montes-García<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [pmontes@ipn.mx](mailto:pmontes@ipn.mx)

<sup>1</sup> Grupo de Durabilidad de Materiales para Ingenieros Civiles, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) – Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

### RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la factibilidad del uso de la ceniza de bagazo de caña como reemplazo parcial del cemento Portland mediante la examinación de resultados de pruebas de trabajabilidad, mecánicas y de durabilidad; además, se reflexiona sobre la sostenibilidad de su implementación. La revisión de artículos sobre estos temas indica que el uso de la ceniza de bagazo de caña afecta negativamente la trabajabilidad del concreto en estado fresco y su resistencia a edades tempranas, mientras que aparentemente algunas propiedades de durabilidad no son afectadas. El análisis de la información disponible sugiere que para un análisis más exhaustivo se requieren estudios de durabilidad a largo plazo en ambientes naturales, y estudios de su impacto ambiental.

**Palabras clave:** materiales cementantes suplementarios; ceniza de bagazo de caña; trabajabilidad; propiedades mecánicas; durabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 El cambio climático y la industria de la construcción.

El cambio climático en años recientes es sin duda un alarmante problema global que afecta la superficie del planeta y puede asociarse con el desarrollo de las actividades de los seres humanos. Existe la evidencia de importantes esfuerzos realizados para aminorar el cambio climático; no obstante, es un problema multifactorial muy complejo. La propuesta de la Organización de las Naciones Unidas en su Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible es muy completa. Contiene 17 objetivos para erradicar la pobreza, “proteger el planeta” y asegurar la prosperidad para todos. Dentro de ellos, el Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura) en su apartado 9.5 propone aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, mediante el incremento del número de personas que trabajan en investigación y desarrollo. El Objetivo 12 (Producción y consumo responsables) en su apartado 12.5 se sugiere reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. Finalmente, el Objetivo 13 (Acción por el clima) en su apartado 13.3 demanda mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>).

En el contexto más específico de cambio climático, la ONU estructuró el Acuerdo de París firmado por 192 países más la Unión Europea (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-action/>), en el cual México participa y propuso varias estrategias a largo plazo, entre las que destacan : a) Acciones de mitigación: eficiencia energética y consumo sostenible (M2) mediante la reducción en el consumo de energía y emisiones de GHG (M2.11.), y b) Ciudades sustentables (M3), mediante el reciclado (M3.8), y el uso de nuevas tecnologías para el manejo integrado de desechos sólidos (M3.9) ([https://aplicaciones.sre.gob.mx/tratados/muestratratado\\_nva.sre?id\\_tratado=1517&depositario=0](https://aplicaciones.sre.gob.mx/tratados/muestratratado_nva.sre?id_tratado=1517&depositario=0)).

El cambio climático es ocasionado por varios factores entre los que destacan la contaminación ambiental resultado de procesos industriales, y dentro de las industrias que generan un gran volumen de contaminantes se encuentra la industria de la construcción con su producto estrella: el concreto reforzado. El concreto reforzado es el material de construcción más utilizado porque es moldeable, resistente, durable y económico en comparación con otros materiales de construcción. Adicionalmente, el uso de concreto reforzado puede ser un indicador de progreso, y esta tendencia es poco probable que cambie a corto y mediano plazo.

El concreto reforzado es un material compuesto a base de una matriz cementante y acero de refuerzo. El ingrediente principal de la matriz cementante es el cemento Portland (CP), el cual se obtiene mediante un proceso que demanda un elevado consumo energético y emite a la atmósfera exorbitantes cantidades de emisiones contaminantes. A grandes rasgos, se puede decir que la producción de una tonelada de clínker genera una tonelada de CO<sub>2</sub>. Suponiendo que en el año 2022 la producción de CP se mantiene en 4 mil millones de toneladas ([https://www.statista.com/topics/8700/cement-industry-worldwide/#dossierContents\\_outerWrapper](https://www.statista.com/topics/8700/cement-industry-worldwide/#dossierContents_outerWrapper)), y cada tonelada de CP contiene un 5% de yeso, entonces se podría estimar que dicha producción liberaría a la atmósfera 3.8 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. La intensidad de CO<sub>2</sub> directo de la producción de cemento aumentó un 1.8% anual durante 2015-2020, lo cual es preocupante, debido a que se requieren disminuciones anuales del 3 % hasta 2030 para encaminarse hacia el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (<https://gccassociation.org/press-release/gcca-heads-world-climate-change-conference-cop24>).

Con base en lo anterior, la producción de cemento es insostenible desde cualquier punto de vista.

## **1.2 Uso de residuos industriales como materiales cementantes suplementarios (MCS)**

Esfuerzos tendientes a la disminución de la contaminación causada por la manufactura y uso del CP conducen a enfoques relativos a la reducción de la producción de cemento y el uso de tecnologías innovadoras para la absorción (“secuestro”) de emisiones. Adicionalmente, se puede lograr una menor demanda de cemento a través de acciones como optimizar su uso en las mezclas de concreto, usar el concreto de manera más eficiente, minimizar los desechos en la construcción y maximizar la vida útil del diseño de los edificios y la infraestructura.

La reducción de la CP en las mezclas puede lograrse mediante su reemplazo parcial por MCS. Algunos de los MCS más utilizados son desechos industriales, tales como las cenizas volantes (CV), escorias granuladas de altos hornos (EGAH) y el humo de sílice (HS).

Los concretos que contienen CV, EGAH y HS favorecen el desarrollo sostenible porque reducen el contenido de CP, reduciendo así la huella de CO<sub>2</sub>. El uso de estos MCS para reemplazar CP reduce su demanda en mezclas de concreto reduciendo también el uso de materias primas vírgenes y las cargas ambientales asociadas con la extracción, procesamiento y transporte de recursos asociados con la fabricación de CP. El uso de estos MCS en el concreto también reduce la necesidad de desechar este subproducto industrial en vertederos, lo que reduce los posibles impactos en las aguas subterráneas y la invasión de valiosos espacios abiertos y biodiversidad. Además, mejora sustancialmente la durabilidad del concreto, lo que aumenta la vida útil funcional de los edificios e infraestructuras, y reduce la energía incorporada de la nueva construcción y los impactos energéticos y ambientales de la demolición (las estructuras duraderas son una de las estrategias más efectivas para minimizar el impacto ambiental y económico).

El uso de algunos de estos MCS también reduce el material de cemento necesario para lograr una resistencia específica, mejora la vida útil a través de una mayor durabilidad del concreto y aumenta la reflectancia del concreto, lo que reduce el efecto de isla de calor urbano. En última instancia, el uso de desechos industriales como MCS en el concreto puede producir un concreto muy duradero y contribuir en la construcción de estructuras más eficientes con menos necesidad de reparación y mantenimiento; por lo tanto, promueve un impacto reducido en la economía y en el medio ambiente.

En un estudio reciente sobre la comparación entre CV, EGAH y HS, se encontró que solo CV logra un ahorro ambiental en comparación con CP (de Brito et al, 2022). A pesar de que los tres MCS han demostrado ser efectivos como reemplazo parcial de CP, son desechos de procesos específicos que tienen algunas cosas en común, son subproductos de procesos altamente contaminantes que generan una gran cantidad de emisiones. En consecuencia, la disponibilidad y el uso de estos MCS se ven comprometidos en un futuro próximo de acuerdo con las políticas ambientales.

De hecho, la producción de CV se ha reducido significativamente debido a que el uso de carbón como combustible en las centrales eléctricas está siendo reemplazado gradualmente por gas natural, ya que solo en E. U. cerca del 40 % de las centrales eléctricas de carbón han cerrado recientemente (Cohen et al., 2022). De igual manera, la producción de hierro, que es la principal fuente de la GGBFS, debe ser reducida porque no se debe hacer mucha expectativa con una industria que emite a la atmósfera aproximadamente de 2 a 6 toneladas de CO<sub>2</sub> para producir 1 tonelada de acero. Finalmente, la producción y el manejo de HS se ha relacionado con problemas de salud humana. Con base en lo anterior, se requiere el uso de MCS alternativos para reemplazar éstos de uso común.

## **1.3 La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) como MCS**

Como resultado de la amenaza sobre la disponibilidad de las MCS comunes, se han investigado materiales de desecho de diferentes fuentes. Por ejemplo, residuos cerámicos, incluidos todos los residuos de ladrillos, tejas y materiales a base de arcilla cocida. El potencial de estos materiales es alto ya que cuando son molidos tienen propiedades puzolánicas debido a que la arcilla tratada

térmicamente contienen óxidos de Al y Si en estado amorfo. Los lodos de depuradora también se han investigado como material puzolánico alternativo. Lodos de depuradora es el nombre genérico de todo tipo de residuos de tratamiento de aguas residuales, frescos o incinerados, y algunos investigadores han demostrado la posibilidad de utilizarlos como MCS. Además, también se ha investigado el fosfoyeso, que es un subproducto de la reacción química entre el ácido sulfúrico y la roca fosfórica para producir ácido fosfórico en combinación con cal y CV para estabilizar los suelos (Seco et al., 2012). También se ha informado que los residuos sólidos municipales tienen un alto potencial puzolánico (Faleschini et al., 2021). Finalmente, el vidrio molido ha sido reconocido como un material puzolánico (Kılıçoğlu and Çoruh, 2017) y sus efectos benéficos han sido reportados en documentos técnicos (ASTM, 2020).

El uso de estos materiales de desecho como MCS puede provocar una disminución de la resistencia del compuesto, puede ser prohibitivo por el alto contenido en metales pesados, o puede contener un alto contenido de compuestos responsables de la aparición de patologías en el concreto, como los sulfatos. Otra razón que ha limitado el uso de estos materiales de desecho como MCS es su disponibilidad. Todas estas causas pueden impedir su uso como material de construcción para los seres humanos o pueden causar efectos nocivos en las propiedades de trabajabilidad, resistencia y durabilidad del material compuesto final. Con base en eso, la presente investigación se enfoca en el descubrimiento de otras fuentes de MCS. En este contexto, se tiene avances significativos sobre el uso de residuos agrícolas (RA), específicamente cenizas de residuos agrícolas (CRA) para ser utilizados como MCS.

Varias CRA han sido probadas como MCS en concreto. Por ejemplo, cenizas de cáscara de arroz, cenizas de combustible de aceite de palma, CBC, cenizas de desechos de madera, cenizas de hojas de bambú y cenizas de mazorcas de maíz (Aprianti et al., 2015, Pérez-Silva et al., 2021, Rodier et al., 2019), cenizas de pasto elefante (Nakanishi et al., 2016), cenizas de madera (Acordi et al., 2020), ceniza de la cáscara de frutos de cacao (Manikanta et al., 2020), ceniza de combustible de aceite de palma (Jaturapitakkul et al., 2011), ceniza de cáscara de avellana (Ozocak and Sisman, 2020), ceniza de cáscara de nuez de marañón (Oyebisi et al., 2022) y algunas más.

Una de las principales limitaciones en el uso de CRA como material puzolánico radica en su composición química y disponibilidad. En cuanto a la composición química, algunos CRA tienen un bajo contenido de sílice o son mayoritariamente cristalinos. Además, pueden contener un alto contenido de materias no quemadas que provocan efectos no deseados en las propiedades de trabajabilidad, en las propiedades mecánicas y de durabilidad del material compuesto.

De todos los CRA investigados, uno de los más prometedores es la CBC por su desempeño y alta disponibilidad. La producción mundial de caña de azúcar ha incrementado sobre los años y se correlaciona significativamente con la también producción mundial de CP (Figura 1). En México existen 51 ingenios azucareros que generan desechos los cuales son depositados en vertederos a cielo abierto contaminando el aire, el suelo y el agua. Por lo tanto, el reemplazo del CP por CBC es una contribución importante para minimizar el impacto desde un punto de vista energético durante la producción de composites ecológicos que sean durables, y la consecuente disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera asociada con este proceso.

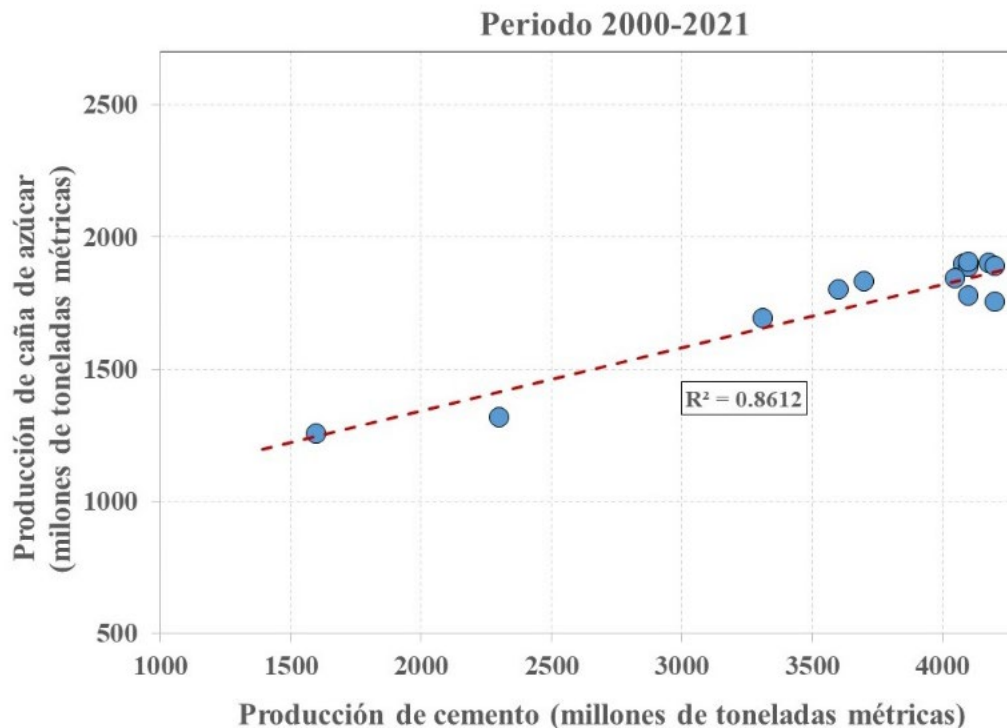


Figura 1. Correlación entre la producción de cemento Portland y producción de caña de azúcar (<https://www.atlasbig.com/en-ca/countries-by-sugarcane-production>, [https://www.statista.com/topics/8700/cement-industry-worldwide/#dossierContents\\_\\_outerWrapper](https://www.statista.com/topics/8700/cement-industry-worldwide/#dossierContents__outerWrapper))

El reemplazo de CP por CBC puede realizarse de manera parcial o total; no obstante, la CBC requiere de manera obligatoria un postratamiento que sea poco demandante de energía para que su uso sea viable. En el presente trabajo se analiza la factibilidad del uso de la CBC como reemplazo parcial del CP mediante la examinación de diferentes postratamientos, resultados de pruebas de trabajabilidad, mecánicas y de durabilidad; además, se reflexiona sobre la sostenibilidad de su implementación.

## 2. POSTRATAMIENTO DE LA CBC

En la actualidad, el proceso de calcinación del bagazo de caña de azúcar en los ingenios azucareros no está estandarizado, por lo cual la CBC requiere un postratamiento antes de ser utilizada como MCS en composites a base de CP (Bahurudeen and Santhanam, 2015). Los postratamientos más comunes utilizados para CBC son la recalcinación, el tamizado, la molienda y la combinación de estos métodos. La recalcinación cambia la composición química de la CBC donde temperaturas entre 600 y 800 °C son adecuadas para incrementar la actividad puzolánica de la ceniza (reacción de la CBC con los productos de hidratación del CP) debido a la presencia de fases amorfas. No obstante, recalcinación a más altas temperaturas promueve la formación de fases cristalinas poco reactivas. La temperatura varía según la naturaleza de la caña de azúcar, los métodos de cosecha y el funcionamiento de las calderas en los ingenios azucareros. Cuando la CBC se recalca en condiciones de laboratorio, se encuentra la actividad puzolánica adecuada de la ceniza a las temperaturas mencionadas. Sin embargo, es evidente que la demanda energética y emisión de contaminantes de un proceso de recalcinación considerando estas temperaturas es mayor que un



proceso de tamizado o molienda (Yadav et al., 2020). Asimismo, la disponibilidad de un equipo adecuado para la calcinación resulta menos accesible en comparación con una máquina trituradora. Por otra parte, la molienda de la CBC contribuye a importantes beneficios en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los compuestos a base de CP en comparación con el tamizado. Sin embargo, nuevamente la molienda obviamente requiere equipo adicional y, por lo tanto, más energía en comparación con un postratamiento de tamizado. Por ejemplo, se requiere una potencia de molienda de 50 a 300 kWh/t en una tasa de producción de circuito de aproximadamente 0.15 Ton/h para convertir CBC obtenida de la caldera en un material puzolánico (Cordeiro et al., 2009); mientras que un proceso de tamizado requiere aproximadamente de 0.19 a 1.5 kWh/ton dependiendo del tamiz rotativo comercial utilizado (Franco-Luján et al., 2022).

La combinación de tamizado más molienda y viceversa también resulta benéfica según lo reportado en la literatura. Esto se atribuye a varios factores, como el cambio en la morfología y la disminución del tamaño de las partículas; sin embargo, la combinación de métodos evidentemente requiere más energía en comparación con un solo método. A pesar de la ventaja al combinar estos métodos Maldonado-García et al., 2018 reportaron una diferencia insignificante en la actividad puzolánica de CBC procesada por molienda más tamizado y por solo tamizado, y con base en ello proponen que solo tamizado es necesario para mejorar significativamente las propiedades de la CBC.

Cabe recalcar que la mayoría de las investigaciones parte del cuerpo de conocimiento sobre el uso de la CBC como reemplazo parcial de CP incluyen estudios a corto plazo. Esto es relevante porque además existen pocos estudios sobre los beneficios económicos y el impacto ambiental de CBC como reemplazo del CP (Li et al., 2022). Además, no hay suficientes informes sobre propuestas de postratamientos más ecológico para el CBC en términos de baja demanda de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> (Kolawole et al., 2021).

### **3. USO DE LA CBC PARA LA MANUFACTURA DE MORTEROS Y CONCRETOS**

El desempeño de compositos donde el CP ha sido parcialmente reemplazado por CBC es afectado por una gran cantidad de variables; en consecuencia, no es fácil seleccionar el nivel de reemplazo más adecuado. La morfología, composición química, amorficidad de las especies de interés, postratamiento y tamaño de partícula del CBC son de suma importancia para elucidar el efecto de la ceniza sobre las propiedades del composito. Entre de ellos destaca el postratamiento como uno de los factores dominantes, puesto que la mayoría de las otras propiedades dependen básicamente de él. A pesar de esta complejidad, diversas investigaciones se llevan a cabo para dilucidar los efectos de la sustitución de CP por CBC.

En la Figura 2 se muestran estos efectos en la trabajabilidad, propiedades mecánicas y durabilidad del concreto con base en postratamientos de la CBC. Algunos tratamientos a la CBC como el lavado o cribado+recalcinado (abertura de malla mayor a la No. 200 ASTM y 500-600 °C) no son efectivos para disminuir los efectos negativos en las propiedades generales del concreto (Zhang et al., 2020, Le and Sheen 2022). Otros como el recalcinado, molido o cribado (aberturas de mallas mayores a No. 200) no son suficientes para corregir los problemas de trabajabilidad; no obstante, las propiedades mecánicas y de durabilidad no se ven afectadas, y en ocasiones mejoradas (Zareei and Bahrami 2018, Jha et al., 2021, Bheel et al., 2022, Diniz et al., 2022.) A pesar de su simpleza y baja demanda energética, el cribado de la CBC por la malla No. 200 o de menor abertura ha demostrado no causar efectos perjudiciales en las propiedades generales de morteros y concretos (Arenas et al., 2016, Batool et al., 2020).

La Figura 3 muestra trabajos de revisión recientes que incluyen estudios exhaustivos sobre pastas,

morteros y concretos con una gran diversidad de postratamientos, niveles de reemplazo, relaciones a/c, y regímenes de curado. Se observa que la sustitución parcial de CP por CBC causa importantes problemas de trabajabilidad del concreto, mientras que las propiedades mecánicas y la durabilidad no se ven afectadas negativamente o son superiores que las del control (Paris et al., 2016, Katare et al., 2017, Xu et al., 2019, Yadav et al., 2020, Murugesan et al., 2021, Minnu et al., 2021, Kolawole et al., 2021, Tomas et al., 2021, Zerihun et al., 2022, Tripathy and Acharya 2022, Li et al., 2022).

La trabajabilidad de la mezcla puede mejorarse mediante la incorporación de agua adicional; sin embargo, esto no es recomendable debido a que puede ocasionar efectos negativos sobre las propiedades del concreto fresco, como segregación, exudación y bloqueo cuando fluye a través de espacios estrechos entre el acero de refuerzo. Además, el concreto endurecido mezclado con CBC tiene menor resistencia, debido al aumento de la porosidad capilar y la pérdida de adherencia interfacial entre la pasta de cemento y los agregados (Zerihun et al., 2022). Luego, para superar los problemas de trabajabilidad sin efectos secundarios, se pueden agregar a la mezcla aditivos químicos y minerales; por ejemplo, superplastificantes y CV (Jiménez-Quero et al., 2013). La mejora de las propiedades mecánicas puede explicarse por los importantes cambios en la microestructura de la matriz del concreto (Rios-Parada et al., 2017, Maldonado et al., 2018). La matriz cementante será más “compleja” como resultado de las diferentes especies que contiene la CBC; sin embargo, de acuerdo con la mayoría de los resultados de la literatura, no es aconsejable un reemplazo superior al 15% de CBC porque podría causar una reducción considerable de la resistencia.

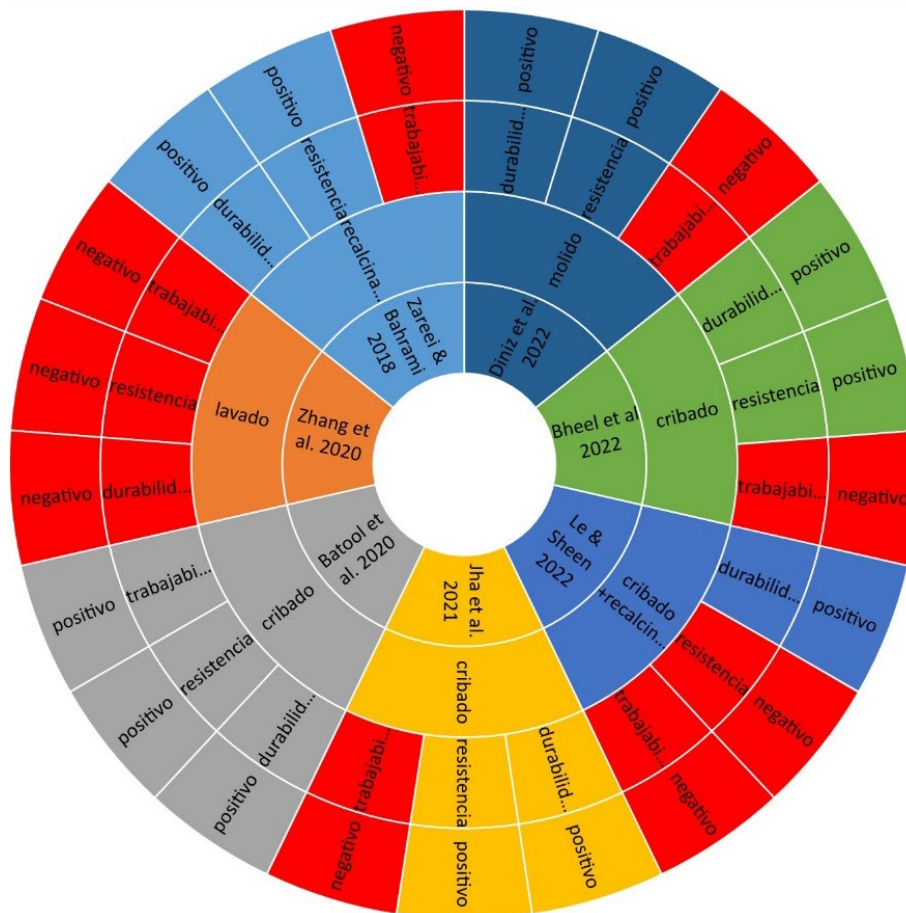


Figura 2. Efectos del postratamiento de la CBC en las propiedades del concreto

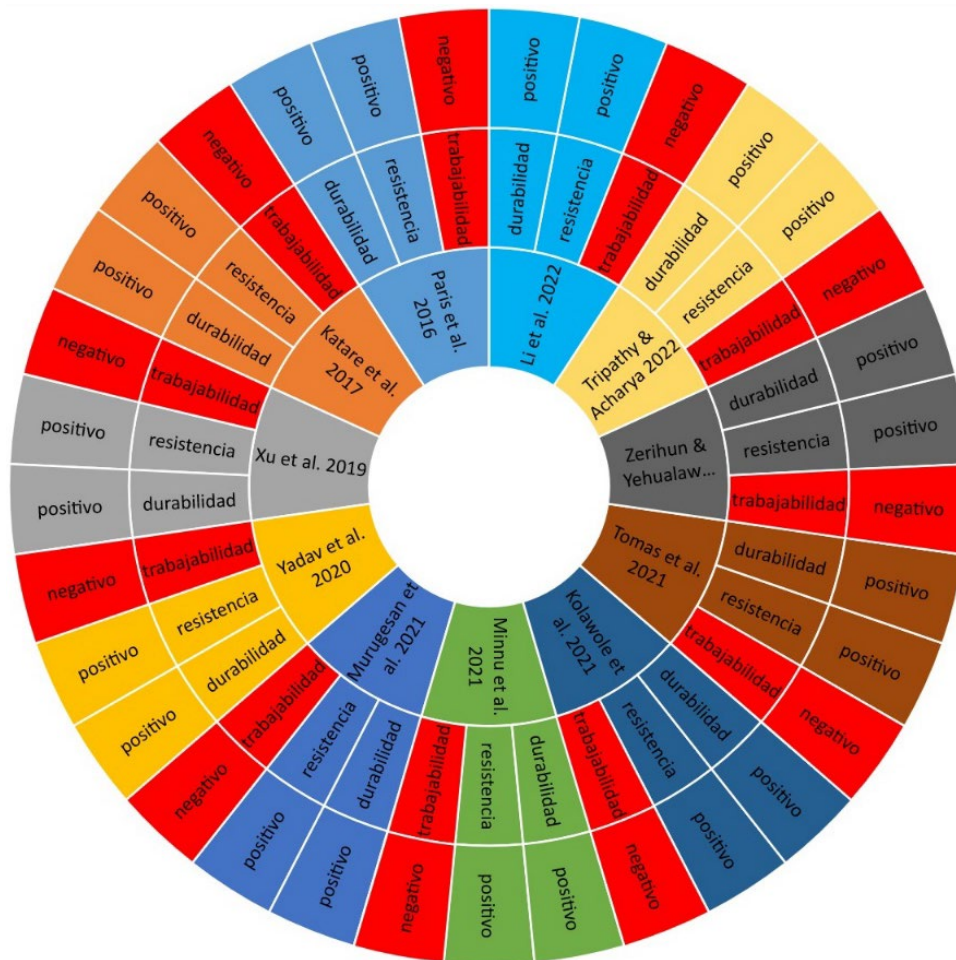


Figura 3. Efectos del reemplazo parcial de CP por CBC en las propiedades de pastas, morteros y concretos

Estudios sobre el efecto del reemplazo parcial de CP por CBC en la durabilidad de compositos son escasos, especialmente estudios a largo plazo que consideren el uso de aditivos químicos y otros MCS (concretos ternarios). No obstante, estudios sobre morteros y concretos ternarios que contienen un superplastificante y CBC+CV muestran un mejor desempeño en lo que a durabilidad se refiere al compararlos con morteros y concretos que contienen solamente CV. El mejor desempeño puede explicarse por cambios en la matriz cementante, los cuales son inducidos por el CBC al incrementar la tortuosidad de la microestructura; adicional a esto, las especies en el CBC pueden ligar agentes agresivos, por ejemplo cloruros, en consecuencia retardar el periodo de iniciación de la corrosión, y mejorar la resistencia a la corrosión del concreto (Maldonado García et al., 2019, Franco-Luján et al., 2019, Franco-Luján et al., 2021, Franco-Luján et al., 2022).

#### 4. OTROS USOS DE LA CBC

Inicialmente, la CBC se usó principalmente como fertilizante o se eliminó en vertederos, lo que ha llevado a una intensificación de las preocupaciones ambientales (Qing Xu et al., 2019). La CBC se ha utilizado exitosamente como reemplazo de agregado fino en mezclas de concreto (Ramakrishnan et al., 2021), y en combinación con EGAH como precursor para la manufactura de cementos activados alcalinamente (Castaldelli et al., 2013). La CBC también se ha utilizado para

reemplazar CP en la estabilización de bloques de suelo compactado (Alavez-Ramírez et al., 2012). Otro uso de la CBC es como fundente en ladrillos cocidos y, en última instancia contribuye a fabricar ladrillos ligeros (Maza-Ignacio et al., 2020). Además, la CBC se puede utilizar para estabilizar gránulos manufacturados con tierra diatomea con el objeto de encapsular nemátodos entomopatógenos que se utilizan para control biológico de plagas (Bustamante-Espinoza et al., 2020). Finalmente, otro interesante uso de la CBC es como repuesto para filtro que se utiliza para remover partículas del aire (<https://region10.bfp.gov.ph/request-for-quotation-for-the-procurement-of-air-filter-activated-carbon-filter-element-with-sensor-for-scba-refilling-system/>)

## 5. IMPACTO AMBIENTAL

Independientemente de la gran cantidad de estudios para evaluar el impacto ambiental de la producción y el uso del concreto, en general, se debe realizar un análisis completo para las estimaciones del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) de este material considerando las categorías de impacto, diferentes etapas del producto, diferentes metodologías y diferentes supuestos y limitaciones. Estudios recientes de LCA del concreto indica que los efectos de reemplazar el cemento por MCS y el uso de agregados reciclados en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto no se han abordado bien, y se necesita más investigación. Estos estudios debe enfocarse especialmente en mezclas de concreto comparadas en el mismo rango de resistencia e iguales vidas de servicio; además, se requiere la necesidad de mejores análisis de sensibilidad (Habibi et al., 2022). A pesar de las incertidumbres evidenciadas sobre la fabricación y uso del concreto, es evidente que el uso de CP por sí solo es insostenible desde el punto de vista ambiental; en consecuencia, es obligatorio el uso de al menos un MCS. Los MCSs mas estudiados son CV, EGAH y HS. A partir de estos materiales se encontró que solo el uso de CV tiene un efecto beneficioso sobre el medio ambiente (de Brito et al., 2022); sin embargo, como se mencionó en secciones anteriores se espera una disminución en la disponibilidad de CV en todo el mundo.

La evaluación del impacto ambiental del uso de CV, EGAH y HS en el estudio de de Brito et al., 2022 fue posible porque existe abundante información sobre la energía incorporada de estos MCSs. Por otro lado, la cantidad de información para CBC es muy limitada. Una de las principales causas de esta falta de información radica en el hecho de que no existe un acuerdo general sobre la elección del método de postratamiento para procesar las cenizas antes de su uso como ingrediente en el concreto. En consecuencia, la falta de información sobre el inventario del ciclo de vida (LCI) para el CBC puede conducir a una mala interpretación de los resultados. En conclusión, no se puede realizar un LCA confiable a partir de estas limitaciones, pero este problema aclara la necesidad de futuras investigaciones para generar los datos necesarios para llevar a cabo un LCA completo y confiable. Estos objetivos de investigación deben abordarse con urgencia para cumplir con las recientes regulaciones aceptadas a nivel mundial que conduzcan a un desarrollo sostenible.

## 6. CONCLUSIONES

- La industria de compuestos basados en CP seguirá creciendo para satisfacer la necesidad de infraestructura en todo el mundo utilizando nuevas tecnologías ecológicas o adaptando las existentes. Para respaldar este hecho, la industria de la caña de azúcar, específicamente la producción de CBC, puede alimentar a la primera porque sus crecimientos están altamente correlacionados. Las cifras muestran que existe una disponibilidad razonable de CBC para reemplazar parcialmente el CP.
- Las propiedades físicas y químicas de la CBC están fuertemente influenciadas por el

postratamiento de la ceniza; por lo tanto, la CBC debe someterse a uno o varios postratamientos para mejorar su actividad puzolánica, y pueda emplearse como material cementicio suplementario.

- El reemplazo parcial de CP por CBC causa importantes problemas de trabajabilidad; sin embargo, un postratamiento de bajo consumo de energía al CBC junto con el uso de aditivos químicos o minerales, o una combinación de ellos, puede contribuir a superar este problema.
- Tras el postratamiento de las cenizas, la sustitución parcial de CP por CBC podría afectar negativamente la resistencia a la compresión del concreto; sin embargo, a edades prolongadas la resistencia es similar o superior a la del concreto que contiene solo CP.
- El reemplazo parcial de CP por CBC mejora algunas propiedades de durabilidad del concreto; sin embargo, la mayoría de estudios sobre este tema se han llevado a cabo en el laboratorio bajo pruebas aceleradas o de estudios a corto plazo.
- En general, el nivel de reemplazo de CP por CBC debe mantenerse por debajo del 15%, independientemente del postratamiento posterior con CBC, para evitar efectos nocivos en las propiedades finales del concreto.
- Hay una falta notoria de estudios sobre la durabilidad de los concretos donde el CP ha sido parcialmente reemplazado por CBC
- También hay un número limitado de estudios sobre los impactos económicos y ambientales de la sustitución de CP por CBC.

## 7. NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

- Continuar investigando sobre el mejor método de post-procesamiento (menor consumo de energía y menos emisiones) para procesar el CBC.
- Disminuir la necesidad de aditivos químicos para mejorar la trabajabilidad de los compuestos.
- Evaluar el uso de CBC como reemplazo parcial de CP en otros tipos de concreto, por ejemplo, concreto de alto y ultra alto desempeño, concreto autocompactante, etc.
- Investigar el uso de CBC para reemplazar exitosamente el agregado fino en morteros y concretos.
- Combinar CBC con otros MCS fabricando mezclas ternarias o cuaternarias para reemplazar un mayor porcentaje de CP.
- Continuar realizando estudios de durabilidad no acelerada a largo plazo donde CP ha sido parcialmente reemplazado por CBC, incluidos estudios sobre la corrosión del refuerzo de acero y dilucidar los mecanismos de protección/deterioro de esos concretos.
- Investigar el papel del contenido de carbono en el CBC sobre la capacidad de ligado de cloruros del concreto y la carbonatación de la matriz cementosa.
- Realizar estudios de LCA para medir el impacto ambiental real del uso de CBC como material complementario del cemento, especialmente inventario de ciclo de vida y evaluación de impacto.

## 8. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN por el apoyo financiero para el desarrollo de algunos de los trabajos que se reportan. También agradece al CONACYT por las becas de posgrado otorgadas a los estudiantes de la Maestría y Doctorado en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales que se imparte en el CIIDIR Oaxaca, IPN, que participaron en la generación de la información utilizada en este documento.

## 9. REFERENCIAS

- J. Acordi, A. Luza, D.C.N. Fabris, F. Raupp-Pereira, A. De Noni Jr, O.R.K. Montedo. New waste-based supplementary cementitious materials: Mortars and concrete formulations. *Construction and Building Materials* 240 (2020) 117877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117877>
- Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D.C. & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, 34, pp. 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S., Farahani, J.N. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. *Construction And Building Materials*, Volume74, Page176-187, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Arenas-Piedrahita, J.C., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J.M., López-Calvo, H.Z., Valdez-Tamez, P.L. & Martínez-Reyes, J. (2016). Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials*, 105, pp. 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- ASTM C1866/C1866M-20. Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete. STM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- Bahurudeen, A., and Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Batool, F., Masood, A. & Ali, M. Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. *Arab J Sci Eng* 45, 3891–3900 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04301-y>
- Bheel, Ali, M.O.A., Tafsirojjaman et al. Experimental study on fresh, mechanical properties and embodied carbon of concrete blended with sugarcane bagasse ash, metakaolin, and millet husk ash as ternary cementitious material. *Environ Sci Pollut Res* 29, 5224–5239 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15954-4>
- Bustamante-Espinosa, L.V., Castañeda-Ovando, A., Hernández-Ávila, J., Reyes-Pérez, M., Montes-García P. & Jiménez-Quero, V.G. (2020). Manufacturing of Granular Matrix with Diatomaceous earth, Lime and Sugarcane Bagasse ash to Encapsulate Entomopathogenic Nematodes (*Steinernema glaseri*). *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 15(1), pp. 8-22. doi : <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2020.8.22>
- Castaldelli V.N., Akasaki J.L., Melges J.L.P., Tashima M.M., Soriano L., Borrachero M.V., Monzo J., Paya J. Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. *Materials*. 2013; 6:3108–3127. doi: <https://doi.org/10.3390/ma6083108>
- Cohen, R., P.C. Eames, G.P. Hammond, M. Newborough and B. Norton, (2022). ‘Briefing: The 2021 Glasgow Climate Pact – steps on the transition pathway towards a low carbon world’, Proc. Instn Civil. Engrs: Energy, published online 19 April.
- Cordeiro G. C., Toledo Philo R. D., Fairbairn E. M. R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research* 39, pp. 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- De Brito, J., Hisham Hafez, Rawaz Kurda, José Silvestre. Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA. *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management. Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural*

Engineering 2022, Pages 553-577. eBook ISBN: 9780128230138

[https://aplicaciones.sre.gob.mx/tratados/muestratratado\\_nva.sre?id\\_tratado=1517&depositario=0](https://aplicaciones.sre.gob.mx/tratados/muestratratado_nva.sre?id_tratado=1517&depositario=0).  
Accesada el 18 de septiembre de 2022.

<https://gccassociation.org/press-release/gcca-heads-world-climate-change-conference-cop24>.  
Accesada el 18 de septiembre de 2022.

<https://region10.bfp.gov.ph/request-for-quotation-for-the-procurement-of-air-filter-activated-carbon-filter-element-with-sensor-for-scba-refilling-system/>. Accesada el 18 de septiembre de 2022.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-action/>. Accesada el 18 de septiembre de 2022.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>. Accesada el 18 de septiembre de 2022.

Le, Duc-Hien, Sheen, Yeong-Nain. Increasing durability of blended concrete using controlled-burning sugarcane bagasse ash as cement replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.2003254>.

Faleschini, F., Toska, K., Zanini, M.A., Andreose, F., Settimi, A.G., Brunelli, K., Pellegrino, C. Assessment of a Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash as a Candidate Pozzolanic Material: Comparison of Test Methods. *Sustainability* 2021, 13, 8998. <https://doi.org/10.3390/su13168998>

Franco-Luján, V.A., Maldonado-García, M.A., Mendoza-Rangel, J.M. & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, pp. 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.004>

Víctor Alberto Franco-Luján, José Manuel Mendoza-Rangel, Víctor Guillermo Jiménez-Quero, Pedro Montes-García. (2021). Chloride-binding capacity of ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 120,10404. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104040>

Víctor Alberto Franco-Luján, Marco Antonio Maldonado-García, José Manuel Mendoza-Rangel, Pedro Montes-García. (2022). Effect of Cl<sup>-</sup> induced corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel embedded in ternary concretes containing FA and UtSCBA. *Construction and Building Materials*, 339, 127655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127655>

Alireza Habibi, Hossein Tavakoli, Amin Esmaeili & Abooli Golzary (2022) Comparative life cycle assessment (LCA) of concrete mixtures: a critical review, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2078885>

Hugo A.A. Diniz, Marcos A.S. dos Anjos, Aretuza K.A. Rocha, Ruan L.S. Ferreira. Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* 319 (2022) 126087. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126087>

Jaturapitakkul, Chai, Tangpagasit, Jatuphon, Songmue, Sawang, Kiattikomol, Kraiwood. (2011) Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue11, Page 4287-4293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.073>

Jerry M. Paris, Justin G. Roessler, Christopher C. Ferraro, Harvey D. DeFord, Timothy G. Townsend. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production* 121 (2016) 1e18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>

Pooja Jha, A.K. Sachan, R.P. Singh, Agro-waste sugarcane bagasse ash (CBC) as partial replacement of binder material in concrete, *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, Part 1, 2021, Pages 419-427, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.751>

- Jiménez-Quero, V.G., León-Martínez, F.M., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C. & Chacón-Nava, J.G. (2013). Influence of sugarcane bagasse ash and fly ash on the rheological behaviour of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 40, pp.691-701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Vasudha D. Katare, Mangesh V. Madurwar. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. *Construction and Building Materials* 152 (2017) 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>.
- Cem Kılıçoğlu, Semra Çoruh (2017). Recycling of waste glass in concrete plant as aggregate and pozzolan replacement. *Int. J. Global Warming*, Vol. 11, No. 3, 250-262. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGW.2017.10001534>
- John Temitope Kolawole, Adewumi John Babafemi, Ebenezer Fanijo, Suvash Chandra Paul, Riaan Combrinck. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* 118 (2021) 103975. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Yang Li, Jiaqi Chai, Ruijun Wang, Xu Zhang, Zheng Si. Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering* 56 (2022) 104774. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104774>
- Maza-Ignacio, O.T., Jiménez-Quero, V.G., Guerrero-Paz, J. & Montes-García, P. (2020). Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks. *Construction and Building Materials*, 234, article117314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117314>
- Lucas Henrique Pereira Silva, Jacqueline Roberta Tamashiro, Fabio Friol Guedes de Paiva, Luis Fernando dos Santos, Silvio Rainho Teixeira, Angela Kinoshita, Patricia Alexandra Antunes. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. *Journal of Building Engineering* 42 (2021) 102769. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102769>
- Maldonado-García, M. A., Hernández-Toledo, U. I., Montes-García, P., & Valdez-Tamez, P. L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales de Construcción*, 68(329). <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>
- Maldonado-García, M.A, Hernández-Toledo, U.I., Montes-García, P. & Valdez-Tamez, P.L. (2019). Long-term corrosion risk of thin cement composites containing untreated sugarcane bagasse ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, pp. 04019020\_1-04019020\_13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002647)
- Manikanta C, Manikandan P, Duraimurugan S, Elavenil S, Vasugi V. Pozzolanic Properties of Agro Waste Ashes for Potential Cement Replacement Predicted using ANN, National Science, Engineering and Technology Conference (NCSET) 2020. *Journal of Physics: Conference Series* 1716 (2021) 012018. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1716/1/012018>
- S.N. Minnu, A. Bahurudeen, G. Athira. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. *Journal of Cleaner Production* 285 (2021) 124836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124836>
- Murugesan T., Athira G., Vidjeapriya R., Bahurudeen A. Sustainable Opportunities for Sugar Industries Through Potential Reuse of Sugarcane Bagasse Ash in Blended Cement Production. *Sugar Tech*, Volume 23, Issue 5, Pages 949 – 963, October 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00978-4>
- Nakanishi, EY, Frias, M, Santos, SF, Rodrigues, MS, de la Villa, RV, Rodriguez, O, Savastano, H. Investigating the possible usage of elephant grass ash to manufacture the eco-friendly binary cements. *Journal of Cleaner Production*, Volume116, Page236-243.



<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.113>

Oyebisi S, Owamah H, Alomayri T and Ede A (2022). Modelling the strength of cashew nutshell ash-cement-based concrete. *Magazine of Concrete Research* 74(10): 487–496.

<https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00349>

Ozocak, M, Sisman, C.B. (2020) Usability of hazelnut shell ash as pozzolan in concrete *Fresenius Environmental Bulletin*, Volume29, Issue12, Page10366-10375, 2020.

<https://hdl.handle.net/20.500.11776/4973>

Ramakrishnan, K., Ganesh, V., Vignesh, G. & Vignesh, M. & Shriram, V. & Suryaprakash, R.. (2021). Mechanical and durability properties of concrete with partial replacement of fine aggregate by sugarcane bagasse ash (SCBA). *Materials Today: Proceedings*. 42.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.172> .

Loïc Rodier, Ernesto Villar-Cociña, Julian Mejia Ballesteros, Holmer Savastano Junior. Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials.

*Journal of Cleaner Production* 231 (2019) 54e63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.208>

Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V.G., Valdez-Tamez, P.L. & Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an Untreated Mexican Sugarcane Bagasse Ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, 157, pp. 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>

Seco, A. F. Ramirez, L. Miqueleiz, P. Urmeneta, Beñat Garcia, Eduardo Prieto, V. Oroz. Types of Waste for the Production of Pozzolanic Materials- A review (2012). InTech. In book: *Industrial Waste*. DOI: <https://doi.org/10.5772/36285>

Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., Nazar, S., Jittin, V., & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086.

<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086>

Amaresh Tripathy, Prasanna Kumar Acharya. Characterization of bagasse ash and its sustainable use in concrete as a supplementary binder – A review. *Construction and Building Materials* 322 (2022) 126391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126391> .

Qing Xu, Tao Ji, San-Ji Gao, Zhengxian Yang and Nengsen Wu. Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. *Materials* 2019, 12, 39; doi: <https://doi.org/10.3390/ma12010039>.

Ankur Laxman Yadav, V. Sairam, L. Muruganandam, K. Srinivasan. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production* 245 (2020) 118854.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>

Seyed Alireza Zareei, Farshad Ameri, Nasrollah Bahrami, Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash, *Construction and Building Materials*, Volume 184, 2018, Pages 258-268, ISSN 0950-0618,

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153> .

Behailu Zerihun, Mitiku Damtie Yehualaw, Duy-Hai Vo, Effect of Agricultural Crop Wastes as Partial Replacement of Cement in Concrete Production, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, Article ID 5648187, 31 pages, 2022.

<https://doi.org/10.1155/2022/5648187>.

Ping Zhang, Wenyu Liao, Aditya Kumar, Qian Zhang, Hongyan Ma, Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material: Comparison with coal combustion fly ash, *Journal of Cleaner Production*, Volume 277, 2020, 123834, ISSN 0959-6526,

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123834>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-813-BR  
Conferencia Plenaria Invitada  
pp. PC – 15 – 24



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Mapa de Danos da Edificação Histórica do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da Universidade Católica de Pernambuco - Brasil

A. R. Lemos<sup>1</sup>, J. M. de Moura Júnior<sup>2</sup>, E. C. Barreto Monteiro<sup>3\*</sup>, R. R. Pinto<sup>4</sup>

\*Autor de Contacto: [eliana@poli.br](mailto:eliana@poli.br)

<sup>1</sup> Universidad Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>2</sup> Universidad de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>3</sup> Universidad de Pernambuco y Universidad Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>4</sup> Universidad Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

### RESUMO

O Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP é uma edificação histórica pernambucana que atualmente apresenta níveis significantes de manifestações patológicas. Diante disso, o desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo ser um documento conciso, analisando todas as manifestações patológicas presentes nas fachadas da estrutura durante o período de pesquisa para ajudar futuras obras de manutenção. Para realização da pesquisa, inspeções visuais com câmera fotográfica foram realizadas. Em seguida, as manifestações foram categorizadas por meio de uma revisão literária e mapeadas sobre as fachadas em que foram encontradas. O resultado da pesquisa demonstra uma alta concentração de manifestações patológicas presentes em todas as fachadas, demonstrando uma falta de manutenção visível a todos que passam pelo museu.

**Palavras-chave:** manutenção de centros históricos; edificação histórica.

## 1. INTRODUÇÃO

A cidade do Recife se encontra como centro de várias construções antigas, entretanto, a maioria destas edificações foram construídas de tal maneira que violam as normas construtivas que temos nos dias de hoje. Como discutido por Rocha (2017) e Costa e Silva (2022), construções históricas não possuíam normas construtivas, e assim se baseavam em aplicações de fórmulas empíricas e no uso de materiais primários rústicos como barro, madeira, alvenarias de pedra, etc. O resultado desta falta de normas, associada a falta de manutenção, está sendo observado nos dias de hoje, com todas as obras históricas apresentando níveis significativos de manifestações patológicas que podem vir a afetar a própria estrutura destas edificações, apesar de possuir um valor histórico e cultural identitário de um povo, representando as perspectivas do passado de determinado grupo social (Ghirardello e Spisso, 2008; Xavier Junior *et al.*, 2022).

Um dos grandes motivadores do projeto de pesquisa foi a aparente falta de projetos de recuperação de sítios históricos em Recife. Um dos conceitos explorados por Tomaz (2010), é que existe uma tendência natural do homem moderno de olhar as edificações antigas como obras desatualizadas e ultrapassadas, onde devem ser demolidas, dando lugar a edificações mais modernas. Tal visão está aparente na grande maioria de edificações históricas do Recife, estas que representam as edificações com manifestações patológicas mais aparentes, porém poucas estão em processo de recuperação. Vista esta situação, o plano de pesquisa se tornou para criar um mapa de danos para uma destas edificações históricas, a escolhida sendo o Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP (Oliveira, 2014).

Devido à falta de atenção às edificações antigas, como o Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP, a decisão foi feita de criar o mapa de danos das fachadas do museu com o objetivo de ajudar um futuro projeto que teria como objetivo restaurar o local. Tal pesquisa é de suma importância, pois há a necessidade de preservar estes centros de conhecimento, história e cultura que estão em situações que não são admissíveis nas normas de construções modernas.

Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa é elaborar o mapa de danos do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP localizado na cidade de Recife-PE, quanto ao aspecto das manifestações patológicas e estado de preservação, visando contribuir para conservação de sua estrutura física.

## 2. METODOLOGIA

A presente pesquisa possui uma metodologia qualitativa com estudo de caso, logo, a coleta de dados é forma exploratória e sem a necessidade de aplicação de estatística, são apresentados de maneira descritiva (Pereira *et al.*, 2018). O método de inspeção é baseado no proposto por Tinoco (2009) para elaboração do mapa de danos, constituído do levantamento de informações do edifício analisado, vistorias ao local para realização do mapeamento de danos, ou seja, identificação das manifestações patológicas e registros das mesmas, e análise dos danos. Esta etapa com objetivo de compreender os agentes e as causas das manifestações patológicas existentes na estrutura, com base nas informações obtidas. Por fim, a fase de concepção do mapa de danos do edifício que deve sintetizar e representa graficamente os resultados das investigações. No método de Tinoco (2009) consta a etapa de condutas de intervenção, não abordada neste trabalho, que seria a elaboração das medidas corretivas para solucionar os processos deterioração do empreendimento.

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia da pesquisa consistiu em uma revisão da literatura narrativa sobre manifestações patológicas em fachadas de edificações, possibilitando conhecimento para identificar as diversas manifestações patológicas e categorizá-las. Estas deteriorações identificadas foram catalogadas e verificadas durante o processo de inspeção do

Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP, que foi selecionado como estudo de caso desta pesquisa.

Para verificar evidências de danos no edifício selecionado, foram realizadas análises visuais rigorosas com registros fotográficos e locação dos danos. As manifestações patológicas identificadas foram catalogadas de acordo com as revisões bibliográficas, ocorridas previamente. Com essa etapa concluída, procedeu-se com a elaboração do mapa de danos das fachadas do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP. Os materiais utilizados para obter e organizar os dados foram uma câmera fotográfica, para verificação e o registro do mapeamento das manifestações patológicas, e o software AutoCad para concepção do mapa de danos da edificação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia previamente citada, foram desenvolvidas mapa de danos das quatro fachadas principais e 3 fachadas auxiliares referentes ao pequeno jardim no noroeste do Palácio da Soledade, prédio que abriga o Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP. Este edifício foi construído entre 1739 e 1764 para servi de morada dos bispos de Recife e Olinda e está localizado na avenida Oliveira Lima, nº 969, bairro da Soledade. Encontra-se tombado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) desde 1938 e o Colégio Nóbrega esteve instalado nas estruturas dessa edificação (Silva, 2002; Amorim, 2013). Um número significativo de manifestações patológicas foi identificado em todas as fachadas, com certas áreas demonstrando manifestações patológicas preocupantes para a estrutura da edificação. A Figura 1 demonstra a localização da edificação no bairro da Soledade.



Figura 1. Localização do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP.  
Fonte: ipatrimônio (2022).

#### 3.1 Sujidade

De acordo com Rodrigues e Costa (2008), sujidades, ou crosta negra, são camadas finas de partículas exógenas que confere à superfície pétrea uma aparência suja. Em geral, estas camadas são formadas por poluentes atmosféricos que se concentram na superfície da fachada. Essa manifestação patológica foi encontrada principalmente nas partes superiores das fachadas, conforme representado nos mapas de danos.

#### 3.2 Destacamento de pintura

Destacamento da pintura é uma manifestação patológica classificada pelo destacamento de partes da pintura original da fachada e, assim, expõe o reboco e criando a possibilidade de

deslocamento de reboco, conforme visualizado na Figura 2 (Veiga, 2015). No caso, é a perda da propriedade de aderência da pintura com o reboco que ocasiona no desprendimento observado e, normalmente, isso acontece devido a associação da umidade com a incidência de raios solares. Manchas de umidade não tratadas podem se tornar propícias para ocorrência do destacamento de pintura (Cordeiro *et al.*, 2021).

### 3.3 Deslocamento de reboco

Deslocamento de reboco é uma manifestação patológica definida pela exposição e subsequente degradação ou colapso de partes do reboco expondo o emboço (Cordeiro, et al., 2021).

De acordo com as pesquisas de Macedo et al. (2018) e Oliveira (2013), edificações em áreas úmidas, como a que o museu se encontra, tendem a apresentar como manifestação patológica principais sujidades, destacamento de pintura e deslocamento de reboco decorrentes da umidade presente e da deterioração natural do elemento construtivo a partir da ação do intemperismo explicando assim a prevalência destas manifestações patológicas. A Figura 2 demonstra o destacamento do reboco e da pintura externa do corredor oeste do museu.



Figura 2. Janelas do corredor do museu.

Fonte: Autores (2022).

Na Figura 2 é notório o estado avançado do destacamento de pintura e deslocamento de reboco, com alguns pontos em nível mais grave com a ocorrência da perda de seção nas cercaduras das janelas.

### 3.4 Corrosão de grades

Corrosão de grades é causada, principalmente, pela mistura de sais presentes na atmosfera e pela umidade presente no local. Pela localização do museu estes dois fatores estão muito presentes em volta da fachada levando a grade, que está presente por toda a fachada, a apresentar um nível significativo de corrosão. Visualmente a corrosão se apresenta pela oxidação das grades de ferro presentes no exterior do museu (Helene, 2014; Rocha, 2017).

### 3.5 Fissuras

A norma, ABNT, NBR 9575 (2010) – impermeabilização - Seleção e Projeto, define fissura sendo

aberturas de até 0,5mm, e trincas como sendo aberturas de até 1mm. Estas aberturas têm seu efeito principal na estrutura estética da edificação, porém, como escrito nas pesquisas de Corsini (2010), Bertolini (2010) e Cunha (2011), fissuras podem facilitar a entrada de agentes agressivos na estrutura da edificação causando problemas graves como podem ser vistos na Figura 3. Estes agentes agressivos estão altamente presentes em locais úmidos como o que o museu se encontra e, assim, são vistos como a manifestação patológica com maior necessidade de conserto. As fissuras podem ser classificadas de diversas maneiras: espessura, atividade, causas, direção, entre outras, bem como, podem se atribuir diferentes motivos para origina-las: variações térmicas de umidade, sobrecarga ou concentração de tensões, recalques, deformabilidade excessiva da estrutura, entre outros (Leitão Neto, 2022; Soares *et al.*, 2022).



Figura 3. Seção inferior do terraço.  
Fonte: Autores (2022).

A Figura 3 indica problemas estruturais nessa região do edifício. Pois, a perda de seção em diversos pontos da laje ocasionou na exposição da armadura à agentes agressivos e, assim, originando a corrosão das mesmas.

### 3.6 Perda de seção/lacuna

Na Figura 4 é possível visualizar perdas de seção ou lacuna que são caracterizadas pela ruptura parcial do revestimento devido a desagregação de partes da argamassa cimentícia. Uma das prováveis origens desta manifestação patológica é a perda de estanqueidade da área danificada (Ferreira, 2010; Veiga, 2015).



Figura 4. Entrada do museu.  
Fonte: Autores (2022).

Como na Figura 2, a Figura 4 apresenta o registro da perda de seção na cercadura da porta da entrada do museu em situação grave.

### 3.7 Pichações/Vandalismo

Pichações e outros atos de vandalismo, são manifestações patológicas especiais já que são as únicas com sua origem de ações humanas, ações externas. Extremamente comum em edificações situadas em áreas urbanas, são manifestações patológicas compostas de tintas utilizadas pelos vândalos. Estas manifestações patológicas são identificadas visualmente pela presença de frases ou nomes escritos no exterior da estrutura utilizando tintas comerciais (Machado, 2015; Tavares, 2018).

### 3.8 Mapas de danos

Com etapa de inspeções no edifício selecionado finalizadas e as manifestações patológicas identificadas e registradas, seguiu-se para concepção do mapa de danos das fachadas com objetivo de representar graficamente as deteriorações com os dados levantados nas fases anteriores (Tinoco, 2009; Rocha, 2017; Barreto, 2020).

As Figuras 5 a 8 são os mapas de danos das quatro fachadas do Museu de Arqueologia e Ciência Naturais da UNICAP e, em seguida para a compreensão dos resultados, a Figura 9 contém a legenda das representações gráficas utilizadas.

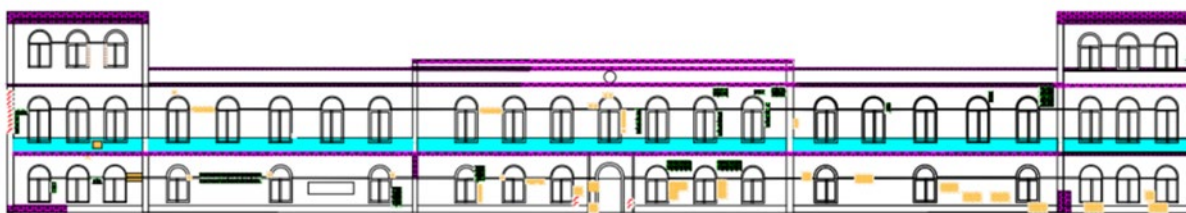


Figura 5. Mapa de danos da fachada sudoeste.  
Fonte: Autores (2022).

Na fachada sudoeste se observa uma grande predominância de sujidades e deslocamento do reboco, com a única instância de corrosão de grades.



Figura 6. Mapa de danos da fachada sudoeste.  
Fonte: Autores (2022).

Na fachada sudoeste observamos a grande concentração de sujidades nos telhados e nas juntas da edificação com o chão, além da seção do terraço com o aço corroído.

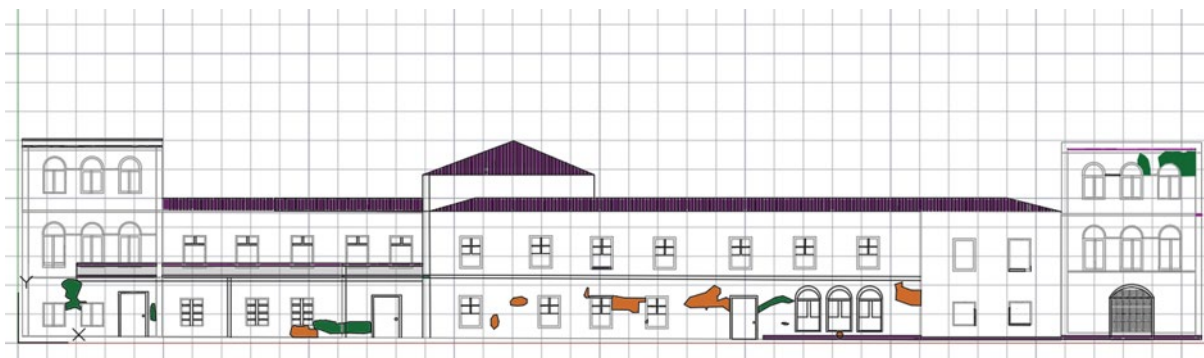


Figura 7. Mapa de danos da fachada nordeste.  
Fonte: Autores (2022).

Na fachada nordeste observamos a mesma prevalência de sujidades no telhado e nas juntas com o chão, neste caso temos muitas paredes que apresentam perda da pintura e reboco.



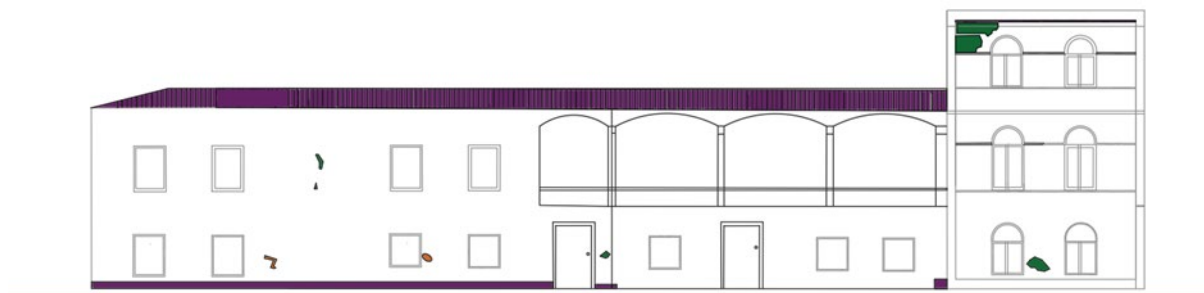


Figura 8. Mapa de danos da fachada noroeste.  
Fonte: Autores (2022).

Na fachada noroeste se encontra com a menor quantidade de manifestações patológicas. Porém, foram identificadas sujidades em todo o telhado e o destacamento de pintura na torre oeste.



Figura 9. Legenda dos mapas de danos.  
Fonte: Autores (2022).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível afirmar, no presente momento da execução desta pesquisa, que as fachadas do Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP encontram-se com seu estado físico aparente bastante deteriorado, com visível falta de manutenções. Em todas as fachadas se identifica altas concentrações de manifestações patológicas, representadas graficamente nos mapas de danos, que poderiam ser facilmente corrigidas ou minimizadas com manutenções preventivas. Nesse sentido, caso o Museu de Arqueologia e Ciências Naturais da UNICAP continue sem os reparos e manutenções necessárias, a evolução das manifestações patológicas observadas nas inspeções, fissuras, corrosão, perda de seção, entre outras, ocasionaram em problemas estruturais e, conseqüentemente, colocando em risco a utilização da edificação e elevando os custos de um programa de restauração. Espera-se que essa pesquisa e o mapa de danos elaborado contribua para evidenciar a necessidade de ações de conservações na construção analisada.

Para estudos futuros, recomenda-se que seja realizado por uma equipe especializada com

engenheiros estruturais, devido a presença de manifestações patológicas que não se limitam ao desconforto visual, com diversos pontos de corrosão das armaduras expostas e perda de seção. Logo, a realização de ensaios para caracterizar os materiais que compõem a estrutura e determinar de maneira concreta as causas e o grau de risco das manifestações patológicas identificadas, forneceram dados para escolha do melhor projeto de recuperação que implementará as medidas corretivas adequadas para cada situação e, assim, busque solucionar a origem das deteriorações. Pois, reparos superficiais somente irão agravar os problemas ao escondê-los durante curto prazo.

## 5. REFERÊNCIAS

- Amorim, C. E. (2011). O Santuário de Nossa Senhora de Fátima num diferenciado roteiro turístico cultural/religioso da cidade do Recife. In *Anais 5ª Colóquio de História: Perspectivas Históricas*. Recife, Brasil: Universidade Católica de Pernambuco.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *ABNT NBR 9575: impermeabilização - Seleção e Projeto*. Rio de Janeiro.
- Barreto, L. M. (2020). *Manifestações patológicas em fachadas de edificações religiosas: um estudo na cidade de Recife-PE*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Pernambuco. Recife.
- Bertolini, L. (2010). *Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção*. São Paulo: Oficina de textos.
- Cordeiro, J. T. L., Barbosa, V. M. & Boas, D. C. C. V. (2021). Levantamento das manifestações patológicas da construção civil: um estudo em residência domiciliar na Cidade de São Luís, Maranhão. *Research, Society and Development*. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20487>
- Corsini, R. (2010). *Trinca ou fissura?* São Paulo: Técnica.
- Costa, L. S., & Silva, W. A. da. (2022). Manifestações patológicas em fachadas de construções históricas: estudo de caso da Igreja de Nossa Senhora do Carmo em São Luís – MA. *Research, Society and Development*. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25819>
- Cunha, D. J. E. (2011). *Análise de fissuração em vigas de concreto armado*. (Monografia Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Ferreira, J.A. (2010). *Técnicas de Diagnóstico de Patologias em Edifícios*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto.
- Ghirardello, N., & Spisso, B. (2008). *Patrimônio histórico: como e por que preservar*. Canal, 6, p. 34.
- Helene, P.R.L. (2014) Introdução a corrosão das armaduras. In: Daniel Véras Ribeiro (Org.). *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análises*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Leitão Neto, E. A. (2022). Análise e diagnóstico de fissuras em residência unifamiliar no município de Porto – PI. *Research, Society and Development*. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28971>
- Macedo, J., Cardoso, A., Rocha, E. A. & Monteiro, E.C.B. (2018). Danos em Edificações históricas: análise comparativa entre duas igrejas em Olinda- PE. In *Anais 6ª Conferência sobre Manifestação Patológica e Reabilitação de Edifícios*. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Machado, D. F. (2015). Pensar sobre o vandalismo: os ataques contra o patrimônio cultural e as possibilidades de investigação no campo da História. *Anais do XXVIII Simpósio Nacional de História*.
- Oliveira, G.F.P. (2013). *Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias associadas à humidade*. (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Oliveira, R. A. (2014). *Vistorias, conservação e reforço de edificações*. Recife: SINAENCO.
- Rocha, E. A. (2017). *Manifestações patológicas em fachadas de edificações religiosas do sec. XVI e XVII: Um estudo na região do sítio histórico de Olinda-PE*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Pernambuco. Recife.
- Rodrigues, D., & Costa, D. (2008). The Conservation of granite in evora cathedral. From laboratory to practice. *LNEC*, pp. 101-110.
- Silva, L.D. (2002). Pernambuco Preservado/ Histórico dos Bens Tombados no Estado de Pernambuco, Recife: *L. Dantas Silva*.
- Tavares, F. J. O. (2018). *Investigação das manifestações patológicas mais incidentes nas edificações escolares da rede municipal de Tubarão/SC*. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil). Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão.
- Tinoco, J. E. L. (2009). *Mapa de Danos Recomendações Básicas*. CECI: Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada. Olinda, Brasil.
- Tomaz, P.C A (2010). Preservação do Patrimônio Cultural e sua Trajetória no Brasil. Fenix. *Revista de História e Estudos Culturais*, 7, 1-12.
- Veiga, M.R. (2015). Anomalias em revestimentos antigos: classificação, causas e metodologias de reparação. In *Anais V Conferência sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*. Porto, Portugal: Universidade do Porto.
- Xavier Junior, E. D., Borda, A., Aurich, M. & Torres, A. S. (2022). Técnicas visuoespaciais para a detecção de manifestações patológicas em fachadas argamassadas. *Research, Society and Development*. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28810>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-715-CU  
Conferencia Magistral Invitada  
pp. PC – 25 – 39



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Evaluación de los daños por corrosión influenciados por cloruros y lixiviación en una estructura de hormigón armado. Caso de estudio edificio Bacardí

A. H. Oroza<sup>1\*</sup>, A. Castañeda Valdés<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [ahernandez@proyectos.ohc.cu](mailto:ahernandez@proyectos.ohc.cu)

<sup>1</sup>Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Restaura. Oficina del Historiador de La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Laboratorio de Protección de Materiales. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, La Habana, Cuba.

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos en la evaluación de las lesiones por corrosión presentes en la torre del edificio Bacardí, ubicado en el Centro Histórico de La Habana. Construido en el año 1930 en acero y hormigón, el mismo muestra daños por corrosión provocados por carbonatación, lixiviación y sales de cloruro en la masa de hormigón. Para diagnosticar el deterioro de la estructura, se realizó una inspección visual de lesiones apoyado por ensayos de termografía infrarroja, resistividad aparente, perfil de carbonatación, potencial de corrosión y cuantificación de la concentración de iones cloruro presentes en elementos de hormigón armado. La intensidad de corrosión se estimó mediante el método RILEM. En el estudio se obtuvieron resultados de resistividad aparente superiores a  $3.0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  y potenciales de corrosión entre  $-300$  y  $-500 \text{ mV}$ . La profundidad de carbonatación fue de  $6 \text{ cm}$  y las concentraciones de cloruro obtenidas para todas las muestras extraídas fueron superiores a  $0.05\%$  en peso de hormigón.

**Palabras clave:** resistividad, potencial de corrosión, lixiviación, cloruros, durabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado (HA) se conciben para que sean durables, al menos, para la cantidad de años para las cuales fueron proyectadas. A medida que avanzan en años de servicio, estas comienzan a mostrar signos de deterioro visibles. Las fuentes que más incidencia tienen sobre la durabilidad de las estructuras son la exposición a ciclos de humectación y secado, la carbonatación, exposición a entornos contaminados, la presencia de sales de cloruro y la lixiviación, siendo todas capaces de desencadenar la corrosión del acero de refuerzo y disminuir la vida útil de servicio de la estructura (Andrade, 2020; Castro-Borges and Helene, 2007; Brimblecombe and Grossi, 2010).

El ingreso de las sales de cloruro en las estructuras de HA puede suceder por exposición a un ambiente costero o mediante el empleo de materiales contaminados, ya sean los áridos o el agua de amasado. En el primer caso los cloruros son transportados a través de corrientes de aire desde el océano o como resultado del impacto de la ola contra el arrecife costero. Una vez que el aerosol marino alcanza la estructura, mediante mecanismos de vía húmeda estos son parcialmente captados y transportados hacia el interior de la masa de hormigón a través de la red de poros hasta alcanzar el refuerzo de acero (Meira, et al., 2017). Una vez que se logra una concentración determinada de cloruro en la masa de hormigón (~ 0.05%), se inicia el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo y paulatinamente la fisuración y el agrietamiento del recubrimiento de hormigón (Angst, et al., 2009).

La influencia del ambiente costero sobre la durabilidad de una estructura está influenciada por la distancia con respecto a la línea costera y la altura sobre el nivel de mar (Meira, et al., 2008, Meira, et al., 2017). Estudios realizados en La Habana han demostrado, que el 90% de las sales de iones cloruro en forma de disolución salina, se depositan hasta una distancia de 30 m desde la línea costera o zona del rompiente de las olas (Castañeda, et al., 2018).

Los procesos de lixiviación se manifiestan durante una prolongada exposición a ambientes de elevada humedad relativa, o ciclos de humectación y secado sistemáticos, el agua, con menor carga iónica, comienza a percolar a través de los poros capilares del hormigón. A medida que transita por la masa del material, lixivia todas las sales solubles de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), hasta alcanzar la cara expuesta del elemento estructural. Posteriormente, las sales reaccionan con el  $\text{CO}_2$  del aire y se transforman a otras sales de carbonatos de calcio, sodio y potasio ( $\text{CaCO}_3$ ), ( $\text{NaCO}_3$ ) y ( $\text{KCO}_3$ ) muy visibles (CYTED, 2003, Oroza and Bouza, 2020).

Este proceso de deterioro químico conduce paulatinamente a la pérdida de la protección primaria del cemento sobre el acero de refuerzo, debido a la disminución del pH de la solución alcalina presente en los poros, incremento de la porosidad y la permeabilidad del hormigón. En consecuencia, se propicia el ingreso de los contaminantes atmosféricos hacia interior de la masa de hormigón. Una vez que el acero de refuerzo queda desprotegido del medio alcalino, está completamente expuesto para dar inicio al fenómeno de la corrosión.

La obra objeto de estudio es conocida como edificio Bacardí, ubicada en el Centro Histórico de La Habana Vieja, la cual perteneció hasta 1959 a la compañía ronera Bacardí S.A. Construido en 1930 en estilo Art Decó, el mismo se compone de un sistema constructivo a base perfiles metálicos tipo H cubiertos de hormigón, con cercos espaciados 15-20 cm con barras de acero corrugado de 12 cm de diámetro que consolidan la conexión entre los perfiles y el hormigón, para conformar las vigas y columnas. Las fachadas son de granito natural y ladrillos prensados de terra cotta. El edificio se encuentra ubicado a 700 m de la línea de costa norte, apantallado por edificaciones y vegetación natural de parques y plazas aledaños.

La edificación se encuentra severamente afectada por el fenómeno de la corrosión, fundamentalmente en las fachadas y en la estructura de la torre, sobre el 7mo nivel. En el estudio realizado se demuestra como las causas principales que dieron inicio a la corrosión fueron la

elevada concentración de iones cloruro presentes en la masa de hormigón y procesos de lixiviación como resultado de ciclos de humectación y secado provocados por la infiltración de agua pluvial, como consecuencia de la falta de mantenimiento periódico.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Metodología de investigación

Para la selección de los ensayos de diagnóstico a emplear, se aplicó una metodología de investigación basada en dos etapas. La primera tiene como objetivo realizar un levantamiento fotográfico detallado de las lesiones visibles, y la segunda de tipo experimental, fundamentada en el análisis de los resultados organolépticos obtenidos y conclusiones alcanzadas en la primera etapa.

La evaluación de la corrosión se realizó acorde al procedimiento estándar descrito por (NACE SP0390, 2009), el cual plantea como objetivos fundamentales, la definición de la naturaleza del ambiente en el que se encuentra ubicada la estructura, la inspección de las condiciones físicas, el establecimiento de la extensión, la naturaleza de la corrosión y los datos históricos de la estructura bajo análisis.

Los elementos estudiados corresponden a los muros de la fachada principal, vigas y columnas de 7mo y 8vo nivel, y caras exteriores de los muros de la torre. Estos elementos presentan severas afectaciones provocadas por la corrosión de los refuerzos de acero, tanto de las barras de cercos como de los perfiles metálicos de soporte estructural. Las mediciones de resistividad ( $\rho$ -k $\Omega$ /cm<sup>2</sup>) y potencial de corrosión (E<sub>corr</sub>-mV) se realizaron sobre vigas de perfiles metálicos revestidas de hormigón. El anclaje del electrodo para E<sub>corr</sub> se hizo sobre los cercos de amarre de la estructura.

### 2.2 Medición del potencial de corrosión (E<sub>corr</sub>)

El método de evaluación de la corrosión mediante el potencial de media celda es una técnica que permite medir la posible actividad corrosiva a partir del valor E<sub>corr</sub> obtenido (Yu, et al., 2017). Cuando E<sub>corr</sub> < -350 mV vs. CSE, indica una probabilidad superior al 90% de que exista corrosión de las barras de refuerzo. De manera contraria, si la E<sub>corr</sub> > -250 mV vs. CSE, la probabilidad es menor del 10% (ASTM C876, 2009). El equipo empleado para las mediciones fue Proceq Canin<sup>+</sup>.

### 2.3 Medición de resistividad aparente ( $\rho$ ) del hormigón

Para estimar el riesgo de corrosión que presentan los aceros de refuerzo, se empleó el equipo Proceq Resipod el cual funciona basado en el método de Wenner (Gowers and Millard, 1999). Esta técnica consiste en evaluar el riesgo de corrosión que presentan las barras de refuerzo en función del nivel de saturación de los poros del hormigón. Está muy relacionado con la calidad del hormigón (microestructura, relación agua/cemento, porosidad, curado, resistencia a compresión), y por tanto de su durabilidad (Andrade and D'Andrea, 2011, Azarsa and Gupta, 2017). El equipo funciona aplicando una corriente sobre la superficie del material a través de las dos sondas exteriores, del cual mide el potencial resultante entre las interiores. El contenido de humedad (agua o vapor) presente en los poros del hormigón es capaz de transportar la corriente entre las sondas, lo cual hace posible obtener la resistividad del material, así como calcular la intensidad de corrosión (I<sub>corr</sub>- $\mu$ A/cm<sup>2</sup>). La preparación de la superficie y las mediciones se ejecutaron acorde a las indicaciones del fabricante. Para evitar interferencias en la lectura debido al efecto de las barras (Presuel-Moreno, et al., 2009), se localizaron e identificaron previamente mediante pacómetro Proceq Profoscope. Para la evaluación de la I<sub>corr</sub>, se aplicó la metodología propuesta por RILEM (Andrade and Alonso, 2004).

## 2.4 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva que permite el análisis patológico mediante la emisión de energía calorífica por parte de los materiales. La lectura de la radiación emitida en la banda del infrarrojo posibilita interpretar la temperatura del material en función de la conductividad térmica o el calor específico. En dependencia de las características y las condiciones de exposición, este material puede retener o emitir calor. La emisividad está definida por la Ley de Stefan-Boltzman, la cual plantea que la radiación es proporcional a la temperatura del cuerpo y las propiedades térmicas del material (Morales-Conde, et al., 2013). Las imágenes se tomaron con una cámara FLIR E75 y se procesaron posteriormente empleando el software FLIR Tools.

## 2.5 Determinación del perfil de penetración de iones cloruro

Para la evaluación del perfil de penetración de iones cloruro fue necesaria la extracción de muestras de polvo a diferentes profundidades en los elementos de hormigón armado seleccionados en la estructura. Para la obtención de las muestras se empleó un taladro eléctrico con broca de 12 mm de diámetro. Las muestras de polvo fueron recogidas en un papel de aluminio en la medida que se realizó la perforación para posteriormente ser depositadas y trasladadas hacia el laboratorio para ejecución de los análisis.

La nomenclatura usada para la identificación de las muestras es:

- Escalera (E), Columna (C), Viga (V) y Muro (P).
- Los números 2, 3, 4, 6, 9 y 10 representan la profundidad (cm) a las que fueron tomadas las
- muestras.

Letras A y B representan las réplicas de cada muestra tomada para cada profundidad (mm).

Para cada profundidad fueron extraídas dos muestras (A y B) de 40 gramos de polvo en cada elemento de hormigón armado seleccionado. De esta forma, se determinaron tres valores de concentración de iones cloruro: totales ( $Cl_{tl}$ ), solubles ( $Cl_{slb}$ ) y enlazados ( $Cl_{elz}$ ) para cada profundidad, más su réplica en 10 gramos de la muestra extraída quedando una submuestra de reserva. Esto representa entonces, la obtención de seis valores. El valor promedio fue graficado en función de la profundidad de penetración en cada uno de los elementos. Los valores de concentración de iones cloruro fueron determinados en % en masa de hormigón.

Los valores de concentración de iones cloruro enlazados fueron calculados haciendo uso de la expresión:

$$Cl_{tl} = Cl_{slb} + Cl_{elz} \quad (1)$$

De esta forma, se determinaron por elementos para cada concentración, contando los valores promedios:

- Escalera: 8 muestra (54 resultados)
- Columna: 10 muestras (90 resultados)
- Viga: 10 muestras (90 resultados)
- Muro: 10 muestras (90 resultados)

La metodología analítica empleada en la preparación de las soluciones, así como en las determinaciones electroquímicas de las concentraciones de iones cloruro solubles y totales a partir del método potenciométrico son descritos en la normativa vigente para estos tipos de estudios de corrosión y deterioro de materiales (ASTM, 1999).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Antecedentes constructivos

El edificio fue construido sobre un terreno semi arcilloso con elevado nivel freático, por lo que se requirió para la cimentación hincar 500 pilotes, en donde se emplearon maderas de jiquí y júcaro negro. Los pilotes se agruparon en base de 2 hasta 12 descansando sobre una placa de hormigón armado de 12 cm de espesor, para una resistencia estimada a compresión del hormigón de 14 MPa. Las barras empleadas fueron de 9 mm espaciadas a 20 cm.

La estructura de acero de soporte de todo el edificio se realizó con perfiles H y viguetas I. Toda la estructura de acero fue revestida en hormigón con espesor de recubrimiento aproximado de 5 cm. Para incrementar el agarre del hormigón, se colocaron cercos redondos corrugados de Ø12.7 mm, espaciados de 15-20 cm. Los entresijos son de hormigón armado con espesores de losa de 25 cm y barras redondas corrugadas Ø16 mm, colocados en dos direcciones.

Los muros se levantaron de ladrillos, asentados con mortero ordinario. Todo tabique superior a los 3 m se reforzó con pilares de hormigón armado del mismo espesor del muro con barras corrugadas de Ø19.1 mm, además de conexiones a las columnas cada 60 cm con barras corrugadas de Ø12.7 mm.

Para la decoración de las fachadas y el interior se emplearon mármoles de Noruega y Alemania, con espesor de 5 cm, anclados a la estructura mediante grapas de bronce y rellenos con mortero. Los revestimientos de terra cotta fueron tratados térmicamente para lograr una superficie vidriada y posteriormente barnizada. Su uso es puramente decorativo y se empleó en las pilastras de fachada, dinteles, arquitrabes, frisos, cornisas, paneles, balaustrada, cresterías, y cubiertas de la torre, excepto hacia el patio interior, con espesor de 25 mm.

#### 3.2 Inspección visual

La inspección visual reveló afectaciones por corrosión en las fachadas, las losas de entresijo y la estructura de la torre. Las patologías presentes son las características de este fenómeno, con amplias áreas de desprendimiento de recubrimiento de hormigón, grietas longitudinales en el sentido de los refuerzos, y manchas de eflorescencia producto de la lixiviación. Los elementos más afectados en fachada son las ménsulas, los balcones y los paramentos de mármol, mientras que en el interior son las losas, vigas y columnas.

En revisión técnica de la documentación histórica del inmueble, se localizó un dictamen de la década de 1970, en donde se registraban las primeras lesiones en la estructura. En el mismo se indicaba la necesidad de iniciar acciones de reparación, las cuales no se ejecutaban desde hacía más de 20 años. En el año 2012 se realizaron nuevos estudios de diagnóstico (Rosabal, et al., 2012), en los que se revelaron deterioros avanzados provocados por la corrosión de los elementos de acero. A partir de las recomendaciones sucedidas de este estudio, se aplicaron algunas acciones de reparación inadecuadas que no aportaron valor en devolverle la vida útil de proyecto a la estructura, a tal punto que, las evaluaciones presentes han identificado que las infiltraciones de agua pluvial a través de las juntas y las grietas existentes en la edificación ha avanzado paulatinamente hacia las caras internas de la estructura. Esto aceleró la activación de mecanismos de transporte de las sales de cloruro y la lixiviación de los álcalis del cemento. La corrosión ha alcanzado las caras interiores de las vigas, en donde se aprecian signos de corrosión localizada en los cercos, lo que conllevó a significativas pérdidas de sección, delaminación y fracturas en algunos casos (Figura 1). Sobre la superficie del hormigón, es visible en algunas zonas la precipitación de sales, como evidencia de su elevada concentración en la masa del material (Figura 2).

En la estructura de los balcones, las piezas de terra cotta que conforman los balaustres y barandas están fracturadas por la corrosión de las sujeciones ferrosas. Estos elementos se diferencian de la



estructura en que no poseen hormigón, sino que están adheridos a los ladrillos de terracota mediante mortero de cemento (Figuras 3 y 4).

Las fachadas muestran grietas verticales que se extienden en casi toda la altura del edificio. La emisividad propia de las piezas de mármol y los ladrillos macizados dificulta la observación de las lesiones a simple vista. Las características del sistema constructivo basado el empleo de bloques de terra cotta como revestimiento y la propia arquitectura de la edificación, complejizan el diagnóstico por las caras exteriores de la torre. La termografía infrarroja permitió identificar las fuentes de humedad y las lesiones en fachada. Se observan zonas más frías (húmedas) en la viga de soporte del balcón, sobre las ménsulas afectadas por corrosión y las grietas presentes en las fachadas (Figura 5).



Figura 1. Corrosión, manchas de lixiviación y eflorescencia en vigas, losas y columnas.



Figura 2. Precipitación de sales y lixiviación sobre la superficie del hormigón



Figura 3. Fractura de viga y ménsulas por corrosión.



Figura 4. Fractura de las barandas de terra cotta de los balcones por corrosión.

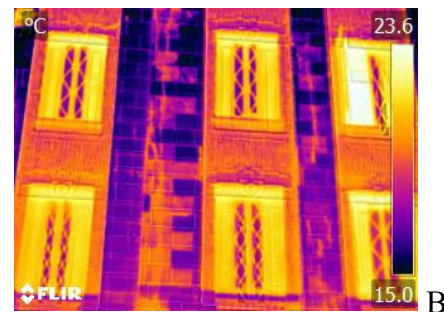
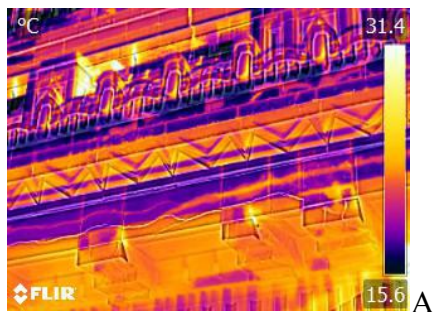


Figura 5. Imágenes termográficas. A: torre hacia el balcón del 8vo nivel. B: fachada principal.

### 3.3 Resultados de $\rho$ , $I_{corr}$ y $E_{corr}$

Los resultados de las mediciones de  $\rho$  aparente realizadas muestran elevada actividad electrolytica en la masa del hormigón. Los rangos de  $\rho$  obtenidos oscilan entre los 10  $k\Omega \cdot cm$ . Esto demuestra la existencia de un medio suficientemente húmedo para mantener un proceso activo de corrosión de los aceros (Figura 6).

Debido a que la  $\rho$  está en función del contenido de humedad del hormigón y su nivel de saturación, los valores de intensidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) calculados muestran resultados superiores a 10  $\mu A/cm^2$ . Estos elevados valores están relacionados con la acción combinada de factores como la presencia de cloruros, lixiviación y la carbonatación, los cuales propician, en un medio suficientemente húmedo, velocidades aceleradas de corrosión.

Los valores  $E_{corr}$  obtenidos están en correspondencia con las mediciones de  $\rho$  aparente, que responden a la ocurrencia de procesos cinéticos de corrosión activa. Se muestran los resultados obtenidos entre las variables medidas y calculadas (Tabla 1), así como la relación gráfica entre estas variables (Figura 7).

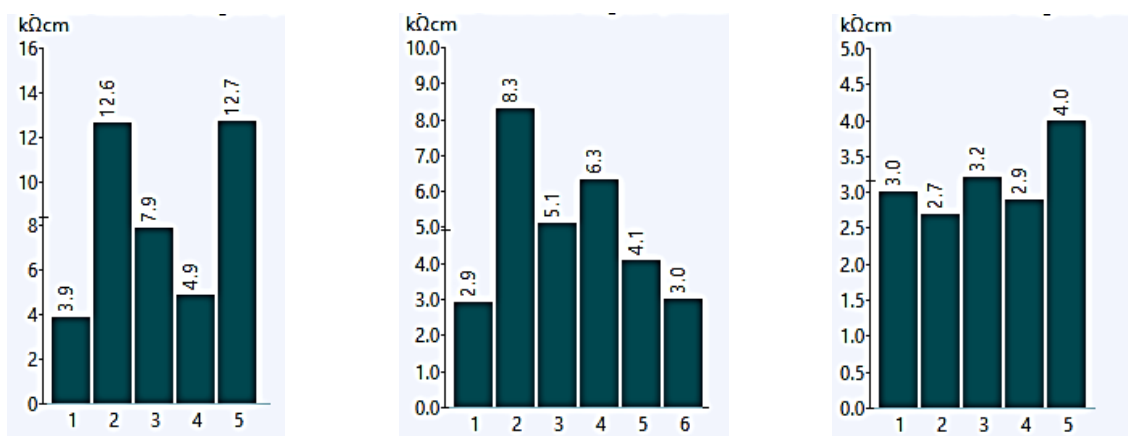


Figura 6. Resultados de las mediciones de  $\rho$  aparente en diferentes puntos.  
Datos extraídos con software Proceq Resipod Link

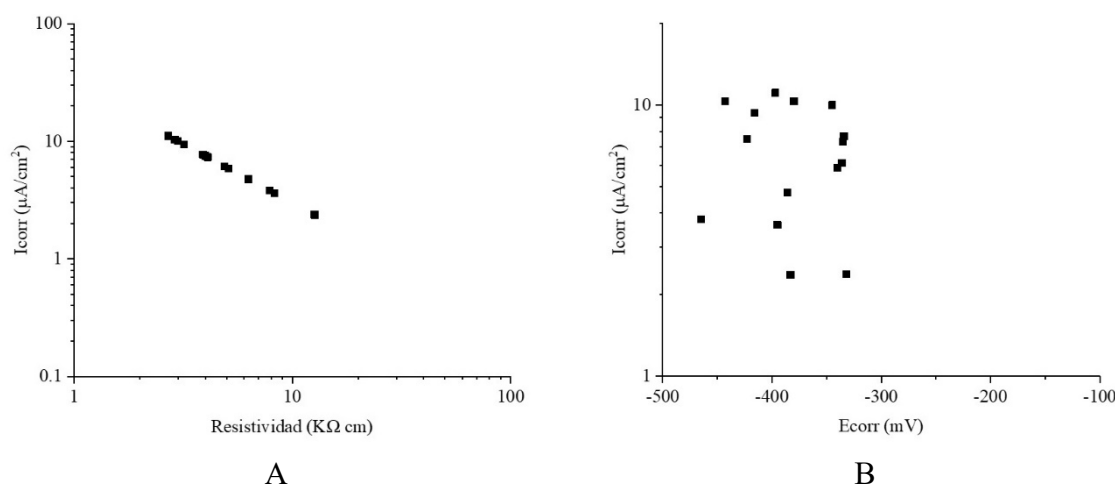


Figura 7. Correlación de resultados de A:  $I_{corr}$  vs  $\rho$  aparente, B:  $I_{corr}$  vs  $E_{corr}$

Tabla 1. Resultados obtenidos de las mediciones realizadas de Ecorr y  $\rho$ , e Icorr calculada

<b>Ecorr (mV)</b>	<b><math>\rho</math> aparente (<math>k\Omega \cdot cm</math>)</b>	<b>Icorr (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>
-334	3.9	7.69
-332	12.6	2.38
-465	7.9	3.80
-336	4.9	6.12
-383	12.7	2.36
-443	2.9	10.34
-395	8.3	3.61
-340	5.1	5.88
-386	6.3	4.76
-335	4.1	7.32
-345	3.0	10.00
-397	2.7	11.11
-416	3.2	9.38
-380	2.9	10.34
-423	4.0	7.50

De esta manera se demuestra que existe una correspondencia entre el pronóstico de corrosión mediante la evaluación de los potenciales de corrosión y la intensidad de corrosión, donde para el comportamiento de ambas variables, la resistividad juega un papel fundamental.

Las pérdidas de sección (PS) fueron medidas en los cercos por encontrarse a menor profundidad con respecto a los perfiles I, lo que los hace más vulnerables a la corrosión. Los espesores de recubrimiento para los cercos están entre 2-3 cm. La infiltración de agua pluvial que paulatinamente lava y erosiona el hormigón, incrementa su permeabilidad, lo que propicia la permanencia de un medio húmedo alrededor de los cercos. El clima tropical de Cuba, con precipitaciones frecuentes durante todo el año posibilita que la corrosión atmosférica en los aceros sea activa durante largos periodos de tiempo.

Las secciones se midieron empleando un medidor electromagnético en 5 barras diferentes. Las secciones medidas, sin considerar zonas de fracturas de acero y delaminaciones, oscilaron en el rango entre 6-11 mm, con pérdidas de sección superiores al 70% para algunos cercos (Tabla 2).

Para la determinación de la profundidad de picadura (Ppit) fue necesario obtener un valor de factor de picadura ( $\alpha$ ). En este caso  $\alpha$  fue calculado a partir de las PS obtenidas directamente sobre los cercos conociendo el diámetro real ( $\emptyset_0$ ) de las barras colocadas. Los valores de  $\alpha$  pueden variar en un rango entre 3-10 para corrosión localizada. Para los cercos medidos, el valor de  $\alpha$  obtenido fue de 4, para una confiabilidad del 95% (Tabla 3)

Tabla 2. Resultados obtenidos de las mediciones de pérdida de sección medidas en obra

Diámetro nominal (mm)	Área nominal (mm <sup>2</sup> )	Diámetro medido (mm)	Área residual (mm <sup>2</sup> )	PS (%)
12.0	113.0	6.00	28.3	75.0
		10.90	93.3	17.5
		11.30	100.2	11.3
		9.00	63.6	43.8
		8.50	56.7	49.8

Tabla 3. Resultados de las mediciones de pérdida de sección a partir de las mediciones de  $\rho$  aparente medidas en vigas

$\rho$ aparente (k $\Omega$ ·cm)	I <sub>corr</sub> ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	$\alpha$	P <sub>pit</sub> (mm)	$\Delta\phi_x$
3.9	7.69	4	3.93	8.1
12.6	2.38		1.22	10.8
7.9	3.80		1.94	10.1
4.9	6.12		3.12	8.9
12.7	2.36		1.21	10.8
2.9	10.34		5.28	6.7
8.3	3.61		1.84	10.2
5.1	5.88		3.00	9.0
6.3	4.76		2.43	9.6
4.1	7.32		3.73	8.3
3.0	10.00		5.10	6.9
2.7	11.11		5.67	6.3
3.2	9.38		4.79	7.2
2.9	10.34		5.28	6.7
4.0	7.50		3.83	8.2

### 3.4 Determinación de las concentraciones de iones cloruro totales, solubles y enlazados

Seguidamente se muestran los valores de concentración de iones cloruro totales (tl), solubles (slb) y enlazados (elz) tabulados para los elementos estructurales ensayados (Tablas 4, 5, 6 y 7), así como la graficación de los valores promedios de las concentraciones en función de la profundidad de penetración (Figuras 8, 9, 10 y 11). Para cada muestra analizada en laboratorio, se realizaron 2 réplicas de control.

Tabla 4. Valores de concentración de iones cloruro solubles, totales y enlazados en la escalera (E).

Muestra	Solubles				Totales				Enlazados			
	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P
E-3 A	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.03	0.03	0.02	0.02
E-3 B	0.09	0.09	0.09		0.11	0.11	0.11		0.02	0.02	0.02	
E-6 A	0.24	0.25	0.24	0.24	0.29	0.29	0.29	0.30	0.05	0.05	0.04	0.05
E-6 B	0.25	0.24	0.24		0.30	0.30	0.30		0.05	0.05	0.05	
E-9 A	0.11	0.11	0.12	0.12	0.15	0.15	0.16	0.16	0.04	0.04	0.04	0.04
E-9 B	0.12	0.12	0.12		0.16	0.16	0.15		0.04	0.04	0.04	

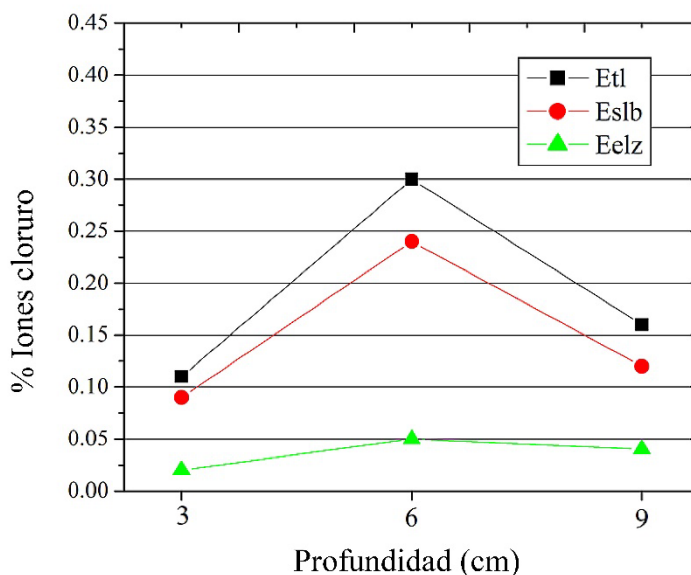


Figura 8. Valores promedios de cada concentración en función de la profundidad de penetración en la escalera.

Tabla 5. Valores de concentración de iones cloruro solubles, totales y enlazados en columna (C).

Muestra	Solubles				Totales				Enlazados			
	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P
C-2 A	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	-
C-2 B	0.07	0.68	0.07		0.06	0.06	0.06		0.01	0.01	0.01	0.01
C-4 A	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
C-4 B	0.06	0.058	0.06		0.06	0.06	0.06		0.00	0.00	0.00	
C-6 A	0.09	0.09	0.09	0.09	0.15	0.15	0.14	0.15	0.06	0.06	0.06	0.06
C-6 B	0.09	0.09	0.085		0.15	0.15	0.15		0.06	0.06	0.06	
C-8 A	0.09	0.09	0.09	0.09	0.14	0.14	0.15	0.14	0.05	0.05	0.05	0.05
C-8 B	0.09	0.09	0.09		0.14	0.14	0.14		0.05	0.05	0.05	
C-10 A	0.17	0.17	0.18	0.17	0.14	0.15	0.14	0.14	0.03	-0.03	0.03	-
C-10 B	0.18	0.17	0.18		0.14	0.14	0.14		0.03	-0.03	0.03	0.03

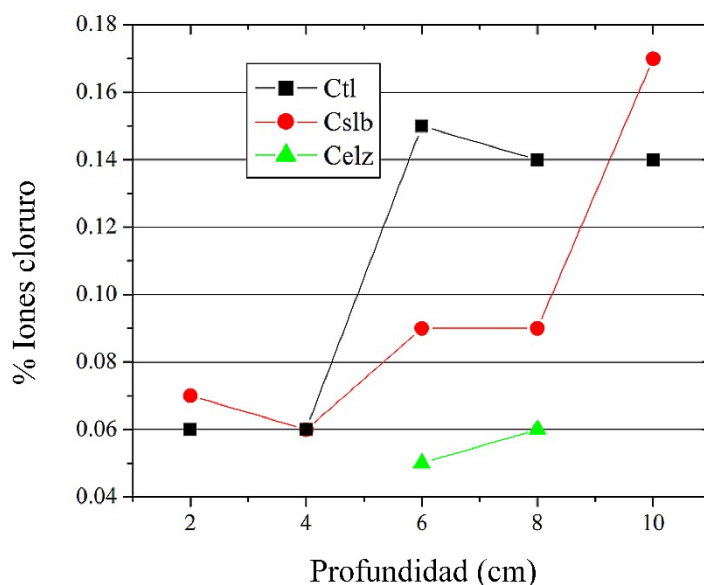


Figura 9. Valores promedio de cada concentración en función de la profundidad de penetración en columna.

Tabla 6. Valores de concentración de iones cloruro solubles, totales y enlazados en Viga (V).

Muestra	Solubles				Totales				Enlazados			
	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P
V-2 A	0.10	0.10	0.10	0.10	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03	-
V-2 B	0.10	0.10	0.10		0.08	0.07	0.07		0.03	0.03	0.03	0.03
V-4 A	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
V-4 B	0.05	0.05	0.05		0.05	0.05	0.05		0.00	0.00	0.00	
V-6 A	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.01	0.01	-
V-6 B	0.04	0.04	0.04		0.04	0.03	0.03		0.01	0.01	0.01	0.01
V-8 A	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05
V-8 B	0.04	0.04	0.04		0.09	0.09	0.09		0.05	0.05	0.05	
V-10 A	0.02	0.03	0.03	0.03	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09
V-10 B	0.03	0.03	0.03		0.11	0.11	0.11		0.08	0.09	0.09	

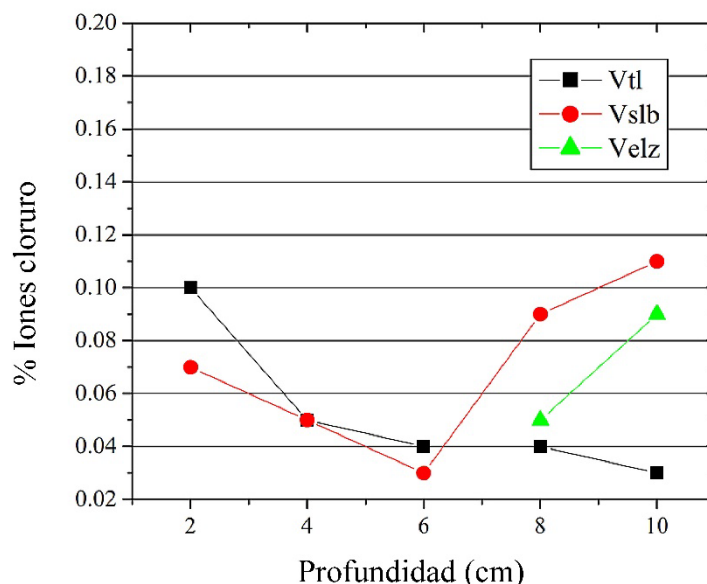


Figura 10. Valores promedio de cada concentración en función de la profundidad de penetración en viga.

Tabla 7. Valores de concentración de iones cloruro solubles, totales y enlazados en muro (P).

Muestra	Solubles				Totales				Enlazados			
	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	P	%Cl1	%Cl2	%Cl3	Promedio
P-2 A	0.06	0.06	0.06	0.06	0.15	0.15	0.15	0.15	0.09	0.09	0.09	0.09
P-2 B	0.06	0.06	0.06		0.15	0.15	0.15		0.09	0.086	0.09	
P-4 A	0.07	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.10	0.03	0.03	0.03	0.03
P-4 B	0.07	0.07	0.07		0.10	0.10	0.10		0.03	0.03	0.03	
P-6 A	0.07	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.10	0.10	0.04	0.04	0.04	0.04
P-6 B	0.06	0.06	0.06		0.10	0.10	0.10		0.04	0.04	0.04	
P-8 A	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03
P-8 B	0.04	0.04	0.04		0.07	0.07	0.07		0.03	0.03	0.03	
P-10 A	0.15	0.15	0.15	0.15	0.19	0.19	0.19	0.19	0.04	0.04	0.04	0.04
P-10 B	0.15	0.15	0.15		0.19	0.19	0.19		0.04	0.04	0.04	

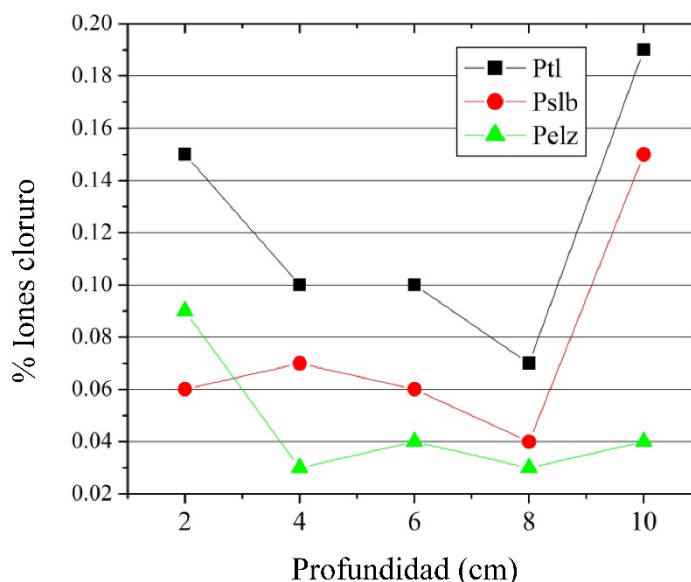


Figura 11. Valores promedio de cada concentración en función de la profundidad de penetración en muro.

El análisis de los resultados refleja que, excepto para la columna y la viga estudiadas a las profundidades de 2 cm, y 8 y 10 cm respectivamente, la concentración de iones cloruro solubles (slb) es mayor que los enlazados (elz) a las diferentes profundidades.

Las muestras de hormigón se extrajeron en el interior de la edificación en el 7mo nivel, a una altura superior a los 30 m, y una distancia de más de 700 m de la franja de costa norte, lo cual hace poco probable la incidencia de aerosol marino sobre el estado de corrosión de las barras. Las elevadas concentraciones de cloruro (tl) obtenidas, demuestran que para la construcción de la edificación se empleó arena de mar.

Las infiltraciones de agua pluvial sucedidas durante décadas condujeron a un fuerte lavado de los álcalis de cemento y las sales de cloruro, lo que conllevó al avanzado deterioro por corrosión localizada de las barras. En las muestras tomadas en la escalera fue donde se registraron las mayores concentraciones de cloruro solubles (Tabla 4 y Figura 8). La rama de la escalera es de los elementos más afectados por lixiviación, además de presentar una profundidad de carbonatación aproximada de 6 cm. Como se conoce, este último fenómeno al originar una reducción del pH en la solución de los poros del hormigón, provoca que los enlaces iónicos formado entre los cloruros y los compuestos químicos del cemento (aluminatos tricálcico y bicálcico para formar como producto de las reacciones los cloroaluminatos correspondientes) se rompan, quedando una mayor concentración de iones cloruro libres o solubles.

Por otra parte, la lixiviación origina también una reducción de la reserva alcalina en los poros del hormigón, dando lugar aún más a la reducción del pH, como ha sido planteado previamente.

Al ser tan abundante la eflorescencia, la corrosión electroquímica generalizada se puede desarrollar intensamente como bien se observa en algunos elementos de la edificación. Se tiene experiencia en otros estudios de diagnósticos ejecutados en obras del Centro Histórico de la ciudad, que la intensidad de corriente de corrosión determinadas en aceros de refuerzos en hormigones muy afectados por la eflorescencia ha sido superior a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (Oroza and Bouza, 2015, Oroza and Bouza, 2020, Oroza and Hernández, 2019).



## 4. CONCLUSIONES

Los avanzados deterioros presentes en el edificio Bacardí se deben a la corrosión de los elementos de acero provocados por la presencia de sales de cloruro en la masa de hormigón producto del empleo de arena de mar, y el desarrollo de procesos químicos de lixiviación y carbonatación. La acción combinada de estos fenómenos, conlleva a daños en las estructuras muy superiores a lo que pueden provocar cada uno de ellos por separado.

Los valores de resistividad aparente registrados evidencian la existencia de un medio suficientemente húmedo para mantener activo el fenómeno de la corrosión, para los cuales se obtuvieron mediante cálculo, valores de  $I_{corr} > 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Esto se reafirma además por los  $E_{corr}$  obtenidos, los cuales oscilaron para todas las mediciones entre -300 mV y -500 mV.

La exposición durante décadas a ciclos de humectación y secado en presencia de un medio contaminado por cloruros, conllevó a pérdidas de sección de hasta el 75% para los cercos estudiados, siendo posible extrapolar estos resultados para las barras de refuerzo de las losas de entrepiso, considerando que se encuentran expuestas a las mismas fuentes de deterioro.

La evaluación de los perfiles de cloruro obtenidos refleja una elevada concentración en el interior del hormigón, la cual se incrementa en la medida en que se profundiza en el elemento estructural. Para profundidades superiores a 6 cm, la concentración de cloruro libre excede 0.1% en peso de hormigón para todas las muestras extraídas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración brindada por la administración del edificio Bacardí en la creación de las facilidades auxiliares y asistencias necesarias para la realización de los estudios.

De igual forma agradecer a los especialistas y técnicos del Laboratorio de Protección de Materiales del CNIC, así como del Departamento de Diagnóstico y Levantamiento de Restaura que han colaborado en obra y laboratorio con los resultados de la investigación.

## 6. REFERENCIAS

- Andrade, C. (2020), Initial steps of corrosion and oxide characteristics. *Structural Concrete*. <http://doi.org/10.1002/suco.201900318>
- Andrade, C. and Alonso, C. (2004). *RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*.
- Andrade, C. and D'Andrea, R. (2011), La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*. 1(2):93-101.
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K. and Vennesland, Ø. (2009), Critical chloride content in reinforced concrete—A review. *Cement and concrete research*. 39(12):1122-1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- ASTM. (1999). *C 1218/C1218M – 99. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*.
- ASTM C876. (2009). *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- Azarsa, P. and Gupta, R. (2017), Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>

- Borges, P. C. and Helene, P. (2007), Service Life of Reinforced Concrete Structures: New Approach. *ECS Transactions*. 9(13):9-14. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2721426>
- Brimblecombe, P. and Grossi, C. M. (2010), Potential damage to modern building materials from 21st century air pollution. *The Scientific World Journal*. 10:116-125. <http://dx.doi.org/10.1100/tsw.2010.17>
- Castañeda, A., Valdés, C. and Corvo, F. (2018), Atmospheric corrosion study in a harbor located in a tropical island. *Materials and Corrosion*. 1-16. <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201810161>
- Gowers, K. R. and Millard, S. G. (1999). *Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique*. American Concrete Institute.
- Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Padaratz, I. J. and Borba, J. C. (2008), Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. *Corrosion Science*. 50:2724-2731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.028>
- Meira, G. R., Pinto, W. T. A., Lima, E. E. P. and Andrade, C. (2017), Vertical distribution of marine aerosol salinity in a Brazilian coastal area – The influence of wind speed and the impact on chloride accumulation into concrete. *Construction and Building Materials*. 135:287–296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.181>
- Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C. and Rubio de Hita, P. (2013), Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study. *Advanced Materials Research*. 778:233-242. [10.4028/www.scientific.net/AMR.778.233](http://www.scientific.net/AMR.778.233)
- NACE SP0390. (2009). *Maintenance and rehabilitation considerations for corrosion control of atmospherically exposed existing steel-reinforced concrete structures*.
- Oroza, A. H. and Bouza, D. G. (2015), Influencia del micro-ambiente en el interior de una edificación sobre la corrosión del acero de refuerzo. *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 46:45-55.
- Oroza, A. H. and Bouza, D. G. (2020). "Deterioration of Structures Affected by Concrete Leaching" in: J. F. M.-H. e. al., *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*, Springer, Cayo Santa María. Cuba, 319-327. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_36)
- Oroza, A. H. and Hernández, R. G. (2019), Diagnóstico de daños en una edificación de principios del siglo XX en La Habana. Caso de estudio. *Revista ALCONPAT*. 9(3):336-349. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.327>
- Presuel-Moreno, F., Liu, Y. and Paredes, M. (2009). "Understanding the Effect of Rebar Presence and/or Multilayered concrete resistivity on the apparent surface resistivity measured via the four-point wenner method" in: CORROSION 2009, NACE International, Las Vegas, Nevada, USA, 1-22.
- Rosabal, D. G., Guerra, F. D. and Blanco, R. G. (2012). *Estudio diagnóstico del edificio Bacardí*. CTDMC. La Habana, Cuba
- Yu, B., Liu, J. and Chen, Z. (2017), Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity. *Construction and Building Materials*. 138:101–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-720-BEL  
Conferencia Magistral Invitada  
pp. PC – 40 – 51



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Carbonatación: redefiniéndola como amienemiga

Y. A. Villagrán Zaccardi<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [yury.villagranzaccardi@vito.be](mailto:yury.villagranzaccardi@vito.be)

<sup>1</sup> Sustainable Materials Unit, Flemish Institute for Technological Research (VITO), Mol, Bélgica.

### RESUMEN

La carbonatación del concreto disminuye su pH y puede causar la despasivación del acero de refuerzo. Así, históricamente se la ha definido como una de las enemigas de la durabilidad. Pero son cada día más urgentes las alternativas válidas para la captura y utilización o almacenamiento de CO<sub>2</sub> y limitar el calentamiento global. La carbonatación puede entonces compensar parcialmente el nivel de emisiones de carbono. Aquí se analizan las ventajas y desventajas (teóricas, prácticas y de mercado) de la carbonatación, su relación con los distintos ambientes y aplicaciones para el concreto y otros materiales cementíceos. Finalmente, se realizan propuestas para aprovechar estas ventajas, repensando el rol de la carbonatación y sus efectos en el concreto para un futuro más sustentable.

**Palabras clave:** captura de carbono, almacenamiento de carbono, utilización de carbono, durabilidad, calentamiento global.

## 1. INTRODUCCIÓN

La carbonatación es la reacción química que se da entre las fases alcalinas (principalmente el hidróxido de calcio o portlandita) en los productos de base cementícea, y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El  $\text{CO}_2$  difunde a través de la estructura de poro del material, para reaccionar y formar carbonatos que entonces precipitan. Esta reacción de carbonatación reduce la resistencia iónica y el pH del concreto. Es por eso que históricamente se ha diseñado al concreto reforzado estructural con vistas a disminuir la velocidad de carbonatación, y así aumentar la durabilidad del refuerzo de acero que se mantiene pasivo (Tuutti, 1982). La corrosión del refuerzo tiene múltiples efectos en los elementos estructurales, disminuye la sección útil del refuerzo, la adherencia entre refuerzo y concreto, así como la fisuración y desprendimiento del recubrimiento de concreto. Todo esto conlleva una pérdida incremental de las prestaciones de diseño.

El proceso de carbonatación está compuesto por diferentes reacciones. La reacción de carbonatación es más rápida cuando la humedad relativa se encuentra en el rango entre 50% y 70%. Si la humedad es demasiado alta, el agua en los poros impide la difusión rápida de  $\text{CO}_2$ , y si es demasiado baja, no se produce la reacción. Además de con la portlandita, el  $\text{CO}_2$  también puede reaccionar con otros álcalis para formar carbonatos de sodio y potasio, que son más solubles que la calcita pero igualmente disminuyen el pH. Finalmente, la carbonatación también consume calcio de otros compuestos del hormigón endurecido como el silicato de calcio hidratado, la etringita y otros ferroaluminatos hidratados. La reserva alcalina disminuye con la precipitación de los álcalis, originando la caída del pH y siendo potencialmente perjudicial para el acero estructural.

En las últimas décadas, los cementos modernos han visto una reducción del factor clínker. Es decir, cementos adicionados con materiales suplementarios cada vez en más altos contenidos. Esto reduce los niveles de emisión de  $\text{CO}_2$  de la fabricación del cemento, pero también acelera la velocidad de carbonatación ya que su hidratación genera menos portlandita y reserva alcalina. Es por esto que las estrategias de aminoración del potencial de calentamiento global de la industria del concreto a menudo se presentan como contraproducentes respecto a la durabilidad de estructuras de concreto reforzado frente a corrosión por carbonatación. Pero esto requiere un análisis más profundo.

En términos ingenieriles, la velocidad de carbonatación,  $kc$ , comúnmente se refiere a la tasa de progresión de la profundidad o frente de carbonatación ( $e$ ). Se modela tradicionalmente según una solución particular de la segunda ley de Fick, que se resume en una función potencial del tiempo, según la ecuación (1). Para Tuutti (Tuutti, 1982), uno de los pioneros en la aplicación de este enfoque tradicional, el exponente de la ecuación podría ser 0,5 o menor. En la práctica, 0,5 sigue considerándose como una aproximación suficientemente cercana.

$$e = kc \cdot t^{0,5} \quad (1)$$

La carbonatación no es sinónimo de corrosión, sino que es un proceso que influye en el desempeño del concreto de varias maneras. Investigaciones recientes han avanzado en tres líneas conceptuales respecto a los efectos de la carbonatación relacionadas con el aseguramiento y cuantificación de la vida útil y también la ecoeficiencia de las estructuras de concreto. La velocidad de carbonatación, la disminución del pH, la densificación de la estructura porosa y la captura de  $\text{CO}_2$  son todos elementos importantes a considerar (Figura 1). Respecto a la relación entre carbonatación y durabilidad, debemos considerar dos aspectos importantes. Primero, además de la carbonatación es necesario la presencia de humedad en cantidad suficiente para que la corrosión se desarrolle con velocidad importante (Angst et al., 2020). Segundo, no todo el concreto es reforzado. Algunas estimaciones indican que en América Latina solo el 27% del cemento producido es usado en aplicaciones con refuerzo de acero, donde se requiere mantener un pH elevado en el concreto (Villagrán-Zaccardi et al., 2022).

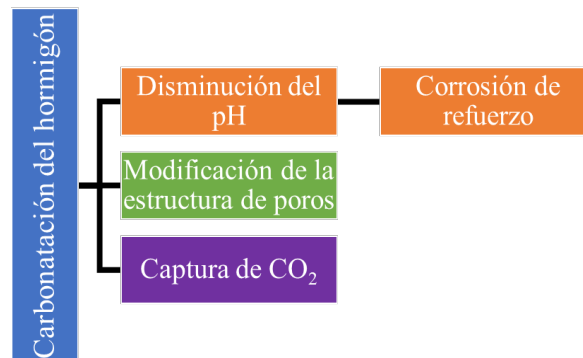


Figura 1. Aspectos sensibles de la carbonatación del hormigón (Villagrán-Zaccardi et al. 2021).

Nos encontramos frente a un cambio de paradigma. Durante casi toda la historia moderna del concreto, la atención se ha centrado en el diseño de concretos resistentes a la carbonatación. Recientemente, una serie de impulsores han estimulado un creciente interés en los concretos diseñados para una carbonatación rápida. Estos objetivos opuestos coexisten en las necesidades actuales, y exigen una comprensión más profunda de los mecanismos y la capacidad de secuestro de carbono del concreto, tanto en el uso primario (concreto en servicio) como después del final del uso (concreto de desecho). El cambio climático vuelve más compleja a esta búsqueda, debido a una variedad de los efectos directos ambientales. Las condiciones atmosféricas cambiantes seguramente afectarán (en una medida aún incierta) a la velocidad de carbonatación del concreto. También deben tenerse en cuenta los efectos indirectos originados por los cambios en la composición de cementos, que siguen tendiendo a cada vez menor factor clínquer. Se necesitan aún nuevos conocimientos que puedan contribuir eficazmente a la predicción y diseño con áridos secundarios que contribuyan al secuestro de carbono.

## 2. CAPTURA DE CARBONO Y EFECTOS SOBRE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Con una visión de lucha contra el calentamiento global, debemos ver a la carbonatación del concreto como un proceso natural que absorbe CO<sub>2</sub> del medio ambiente. Por supuesto que la cantidad de CO<sub>2</sub> recapturada nunca será mayor que la cantidad de CO<sub>2</sub> liberada durante la fabricación, pero sí implica que el potencial de calentamiento global del concreto se reduzca significativamente. Según estimaciones, entre el 40 y el 70 % de las emisiones químicas de CO<sub>2</sub> durante la fabricación del cemento se absorben durante la carbonatación (Andrade, 2020; Possan et al, 2016; Andersson et al., 2013). Esta captación no es total, por la presencia de óxido de calcio en el silicato de calcio hidratado, que no carbonata tan fácilmente como el hidróxido de calcio. Sin embargo, el grado de carbonatación depende de las condiciones de humedad, temperatura y sobre todo la presión de CO<sub>2</sub>. Métodos de carbonatación artificial han demostrado ser más efectivos que la carbonatación natural para fijar CO<sub>2</sub> (Gholizadeh-Vayghan et al., 2020). Como ya se mencionó, otro factor importante es la presencia de adiciones minerales activas, que consumen parte del hidróxido de calcio, reduciendo la reserva alcalina del concreto y por tanto su capacidad de captura de CO<sub>2</sub>.

En concreto sin refuerzo de acero, la carbonatación rápida es ventajosa para disminuir el impacto medioambiental del concreto. Sólo cuando es crítico salvaguardar los refuerzos de acero es que es ventajoso evitar la carbonatación, para que los refuerzos permanezcan protegidos por el medio alcalino. Para definir la capacidad de captura de carbono, es fundamental distinguir entre el grado de carbonatación y la tasa de carbonatación. Juntos determinan la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> del

concreto, pero son cuestiones diferentes. Si bien las circunstancias químicas influyen en el grado de carbonatación, la velocidad de carbonatación está determinada principalmente por la estructura de los poros. La determinación precisa de los parámetros más influyentes que afectan la capacidad de secuestro de carbono del concreto es un asunto pendiente. Se conoce en mayor medida los parámetros que definen a la velocidad de carbonatación (avance en profundidad) pero también el grado de carbonatación es necesario para definir la capacidad de secuestro de carbono a lo largo del tiempo. Ambos son parámetros independientes (Andrade, 2020). Los productos de hidratación pueden formar una capa externa de material carbonatado que impide (o retrasa significativamente) la carbonatación del material subyacente. Entonces, la profundidad de carbonatación puede progresar con niveles variables de secuestro de carbono dependiendo de diversas variables. Varios parámetros pueden afectar esta limitación del grado de carbonatación (como porosidad, grado de hidratación, concentración de  $\text{CO}_2$ , humedad relativa) (Galán, 2010) y, por lo tanto, aún se necesita un avance significativo para el diseño de procedimientos que optimicen la captura de carbono. Es de interés avanzar con investigaciones futuras centradas en desarrollar concretos más carbonatables para ser usados en aquellas aplicaciones sin refuerzo de acero o en ambientes secos. Pero actualmente una mayor velocidad de carbonatación está relacionada con un menor nivel de resistencia mecánica, lo que resulta inconveniente. En términos de sostenibilidad, el desacoplamiento de estas dos características presenta un nuevo problema a resolver.

La recaptura de carbono por parte del concreto se produce a lo largo de su vida útil, pero no se detiene allí. La carbonatación continúa en el concreto de desecho una vez que la estructura ha sido demolida, y eventualmente en los áridos reciclados que pueden producirse con este concreto de desecho.

Los áridos reciclados tienen una ventaja en términos de velocidad de carbonatación, independientemente de si se utilizan o no en la producción de nuevo concreto fresco. Triturar el material aumenta el área de superficie específica en contacto con el ambiente externo. Como resultado de esta mayor exposición se acelera la captura de  $\text{CO}_2$  (Figura 2). Tal contribución ocurre tan pronto como el árido reciclado se tritura y expone a la atmósfera (Pade y Guimaraes, 2007). Según una aproximación grosera, la cantidad de concreto carbonatado se duplica a partir de la trituración, pero cuanto más fino sea el tamaño de partícula más rápida será la carbonatación (según se ve en la Figura 2, a).

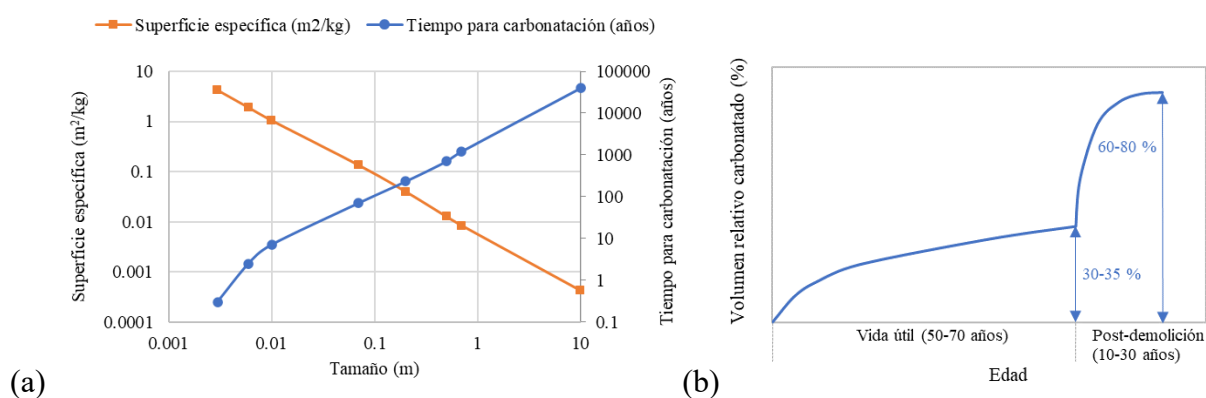


Figura 2. Captura de  $\text{CO}_2$  (Villagrán-Zaccardi et al. 2021): (a) Estimación del tiempo de carbonatación versus el tamaño de partícula; (b) evolución del % de concreto carbonatado durante la vida en servicio y luego de su demolición.

### 3. EL MERCADO DEL CARBONO COMO MECANISMO DE VALORACIÓN: CAPTURA Y UTILIZACIÓN

El mercado del carbono sigue en expansión, donde cada vez más fuentes de emisiones son incluidas. Existen planteados actualmente 68 instrumentos de fijación de precios del carbono que involucran al 23% de las fuentes totales de emisiones de gases de efecto invernadero (Banco Mundial, 2022). Recientemente se notan precios récord de derechos de emisión en la Unión Europea, California, Nueva Zelanda y Corea del Sur, entre otros. Asimismo, varios impuestos al carbono también vieron niveles máximos alcanzados. Las principales razones son una combinación de reformas políticas y cambios anticipados, interés de inversores especulativos y tendencias económicas en los mercados mundiales de materias primas energéticas (Banco Mundial, 2022). Esto mejora la competitividad de las estrategias de valorización mediante captura de carbono, pero los precios deben aumentar aún más para cumplir con los objetivos de limitación del calentamiento global del Acuerdo de París. Al momento las emisiones globales que están hoy cubiertas por un precio directo al carbono alcanzan solo al 4% de las que son necesarias controlar para 2030 (Figura 3). En Iberoamérica, solamente Uruguay, y España y Portugal (sólo respecto a su participación en el régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea), tienen precios establecidos por sobre los mínimos requeridos para alcanzar los objetivos de lucha contra el calentamiento global (estimados en 40-80 USD/tCO<sub>2e</sub> para 2020 y 50-100 USD/ tCO<sub>2e</sub> para 2030 (CPLC, 2017)). Políticas previstas en el futuro inmediato pueden fortalecer el apoyo interno, prevenir la fuga de carbono y fomentar la mitigación más allá de las fronteras nacionales. Por ejemplo, la Unión Europea avanza hacia la adopción de su Mecanismo de Ajuste Fronterizo de Carbono (con el que se gravarán productos de economías sin políticas de mitigación del carbono), así como Canadá y el Reino Unido están explorando opciones similares.

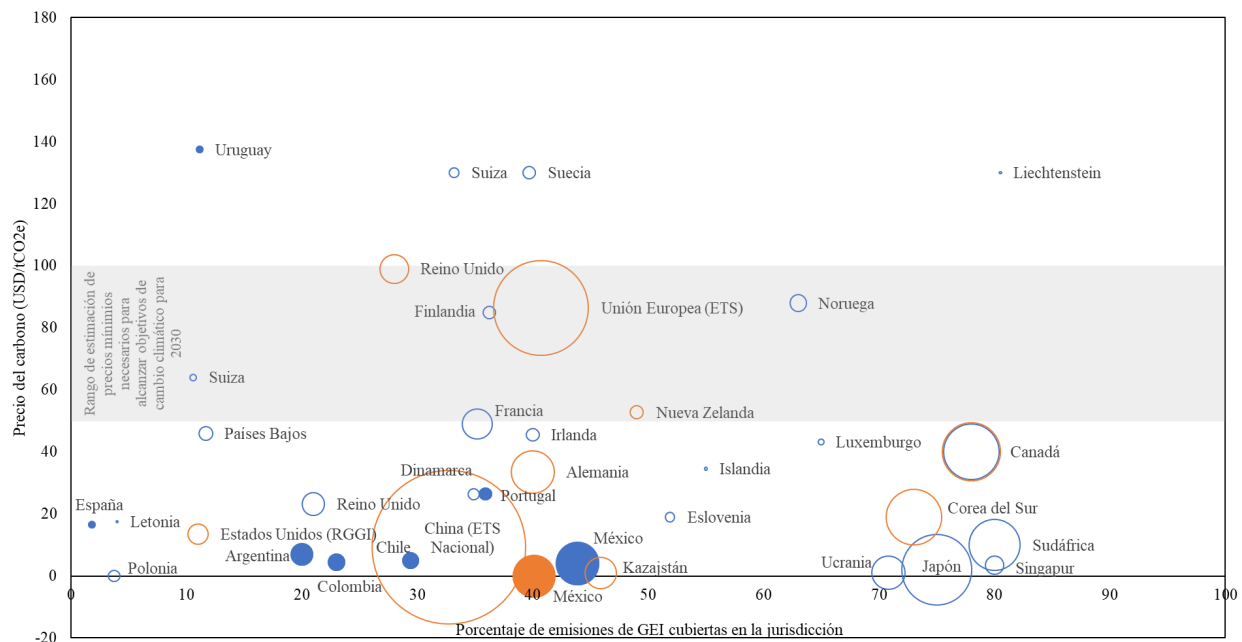


Figura 3. Cobertura de emisiones absolutas, proporción de emisiones cubiertas y precios de los instrumentos de fijación de precios del carbono en diferentes jurisdicciones (Banco Mundial, 2022).

Mientras que el precio del carbono incrementa la eficiencia de algunos sectores (por ejemplo la

energía y el transporte ya tienden a diseños más eficientes y fuentes de menor emisión), algunas industrias tienen emisiones inevitables. La industria del cemento, por ejemplo, involucra la calcinación de la caliza para la producción del clínquer, que resulta inevitablemente en liberación química de CO<sub>2</sub>. Para este tipo de industrias sólo existe la alternativa de la captura y almacenamiento de carbono. También debe tenerse en cuenta que los países en desarrollo se encuentran aún construyendo sus infraestructuras y por lo tanto son muy dependientes de las industrias intensivas en energía como el cemento y otros materiales de construcción. Un aumento en los costos de producción en estos sectores se propagaría por todo el sistema económico generando también mayores costos en los sectores de manufactura y servicios, y repercusiones negativas para el bienestar social general (Luderer et al., 2012; Jakob y Steckel, 2014). Entonces, el énfasis debe ser puesto en que tecnologías de captura y utilización de carbono sean más accesibles.

El avance de tecnologías de captura de carbono requiere soluciones urgentes ya sea para su almacenamiento o su utilización. La carbonatación mineral es vista como una alternativa muy atractiva debido a su grado de estabilidad. La industria del cemento es una de las emisoras más significativas de carbono, y avanza hacia tecnologías que permitan capturar el carbono químico emitido durante la calcinación de la caliza para la producción del clínquer. Un ejemplo es el proyecto europeo LEILAC (en inglés, Low Emissions Intensity Lime And Cement), que utiliza calcinación de harina cruda por calentamiento indirecto y separa los flujos de proceso calentando indirectamente a la piedra caliza a través de un reactor de acero especial (Figura 4). Este sistema único permite capturar CO<sub>2</sub> (95% de pureza) a medida que se libera de la piedra caliza, ya que los gases de escape del horno se mantienen separados. El sistema funciona por calor de contacto y se puede hacer en principio con la misma energía específica. La estrategia no implica ningún proceso o producto químico adicional, sino simplemente un nuevo diseño del horno calcinador. Se encuentra ya operativa una planta piloto en Lixhe, Bélgica de HeidelbergCement. Esta instalación piloto es capaz de pre-procesar la harina cruda a temperaturas de 1000 °C y abastecer del material ya calcinado a la planta de cemento anfitriona. Esta instalación puede individualmente recolectar alrededor de 18000 toneladas por año de CO<sub>2</sub>. Es entonces, que se necesitan tecnologías inmediatas para el almacenamiento o utilización de este CO<sub>2</sub>.

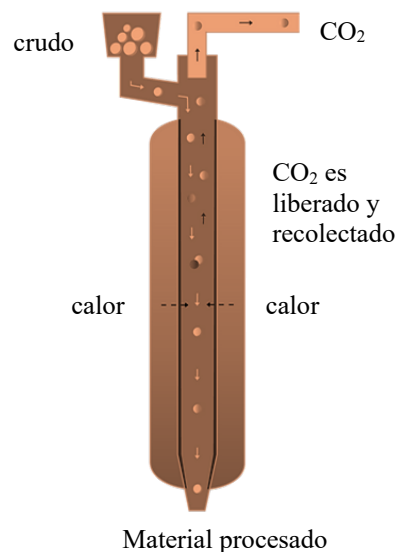


Figura 4. Esquema de quemador con configuración de separación directa (Hills et al. 2017).



Es así como los aumentos de precios del carbono previstos en el futuro ampliarán la gama de entornos relevantes para los procesos de carbonatación, en particular las que involucran la carbonatación total de materiales cementíceos. Los procesos de carbonatación acelerada y la idea emergente sobre el uso de la meteorización mineral para el secuestro de carbono podría adaptarse para su uso en diversos entornos y particularmente en plantas de cemento. Dado que la mayoría de las estructuras de concreto se utilizan en tierra, el estudio de la carbonatación se ha centrado principalmente en las condiciones atmosféricas. Por lo tanto, es valioso comprender cómo controlar (y mejorar) las tasas de carbonatación del concreto de desecho a fin de determinar su potencial más amplio para su uso como sumideros de carbono.

#### **4. ACELERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAPTURA DE CARBONO DEL CONCRETO**

En vista de la amenaza cada vez más certera del calentamiento global, se ha prestado creciente atención a la cuantificación y la ingeniería de la capacidad de captura de carbono de los materiales cementíceos. Dada la escala del uso del concreto, la cantidad de carbono en consideración es mayúscula. Una aproximación estima que el 43 % de las emisiones acumuladas del proceso de cemento fabricado entre 1930 y 2013 ha sido ya reabsorbido por la carbonatación de los materiales cementíceos (Xi et al., 2016). Pero esta es una estimación rústica y quizás algo optimista. Debemos crear herramientas para estimaciones más precisas, y comenzar a pensar a los materiales de base cementícea como una parte importante del ciclo lento del carbono. Esto es sobre todo teniendo en cuenta el rol indispensable que estos materiales juegan en la actividad humana y la escala de uso dentro de edificaciones e infraestructura (Chen et al., 2020). En reconocimiento a la importancia de la carbonatación para el análisis del ciclo de vida del concreto es que esta ha sido incluida en normas recientes sobre Declaraciones Ambientales de Producto (o EPD en inglés) para productos de concreto (EN 16757, 2017). Estas recomendaciones proporcionan orientación sobre el cálculo de la carbonatación durante las etapas de uso y fin de la vida útil (Figura 2, b), que son indispensables para una evaluación del análisis de ciclo de vida de las construcciones.

La cantidad de carbono emitida durante la fabricación del cemento y los materiales de base cementícea ha sido estudiada y cuantificada con mayor intensidad que el carbono que es luego secuestrado en estos materiales. Ambos son fundamentales para el análisis de reservas y flujos de carbono. La capacidad de captura de carbono está relacionada tanto con las estructuras en servicio como con los residuos de construcción y demolición (Cao et al., 2020). Entre ambos existe una diferencia crucial: la superficie expuesta al medio que favorece la carbonatación natural.

La capacidad de estimar y diseñar la carbonatación de los escombros de concreto es crucial para las opciones tanto de reciclaje como de secuestro, por diferentes razones. La carbonatación se ha identificado como una vía que potencialmente puede densificar a los áridos reciclados. La precipitación de carbonato de calcio en los poros contribuye a obstruirlos y reducir la conectividad de la estructura porosa. Se ha demostrado que la carbonatación artificial mejora la calidad del árido reciclado (Shi et al., 2018; Zhan et al., 2019). Se han evaluado diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub>, presión y tiempo (Shi et al., 2018; Zhan et al., 2019; Gholizadeh-Vayghan et al., 2020). La carbonatación artificial permite un mayor grado de carbonatación y, por lo tanto, una mayor capacidad de utilización de carbono. Los tratamientos basados en carbonatación mejoran no solo el mortero adherido sino también la zona de transición interfacial entre árido natural y mortero (Shi et al., 2018) y son adecuados para todo el rango de tamaño de partículas. Por otra parte, el beneficio neto de la carbonatación debe también considerar el costo de carbono (asociado a la fuente de energía) de la operación misma de trituración (Dodoo et al., 2009) y el transporte (Dossche et al. 2016; Maselli et al., 2020).

La mayoría de los procesos desarrollados para carbonatar el concreto de desecho (Ho et al., 2021),

que abarcan espectros de complejidad del proceso y rangos de carbonatación alcanzables, tienen como principal objetivo producir un producto vendible, generalmente áridos con propiedades mejoradas (Xuan et al., 2016; Shi et al., 2018; Zhan et al., 2019; Gholizadeh-Vayghan et al., 2020) o adiciones minerales secundarias (Skocek et al., 2020). Este es un enfoque lógico, ya que utiliza la captura y utilización de carbono como una forma de ayudar a cerrar los ciclos de recursos. No obstante, podría decirse que también tiene valor explorar el uso de residuos de concreto para el secuestro de carbono como una estrategia de valorización (es decir, más allá de los procesos que también pueden proporcionar un producto de construcción) cuando el mercado del carbono se muestre favorable.

La captura espontánea de carbono por parte del concreto puede ser muy limitada. Un estudio de campo en Japón (Kikuchi y Kuroda, 2011) analizó contenidos de carbono en concreto de demolición. Los autores hallaron que, considerando el carbono total emitido durante el ciclo completo de las estructuras de concreto reforzado, la recaptura de CO<sub>2</sub> era capaz de disminuir sólo un 5.5% las emisiones de CO<sub>2</sub> (aproximadamente 190 kgCO<sub>2</sub>e/ton concreto) luego de un almacenamiento de entre 1 y 3 meses de los áridos reciclados. Esto parece sumamente desalentador en términos de recaptura espontánea y tecnologías de captura forzada parecen más convenientes. Disminuyendo el tamaño de partícula, puede duplicarse la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbida en 1 año. Por ejemplo, el costo de áridos reciclados de variable calidad en los Estados Unidos varía entre 5-30 USD/ton (The Pricer, 2022). Con la estimación de Kikuchi y Kuroda se llega a la conclusión de que si se logra cuadruplicar la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> del concreto (por ejemplo, con una molienda más fina y mayores tiempos de exposición) se necesitarían unas 24 toneladas de concreto molido para capturar 1 tonelada de CO<sub>2</sub>e (considerando una capacidad de 41 kgCO<sub>2</sub>e/ton concreto molido). Con un precio de carbono de entre 50 y 100 USD/ton CO<sub>2</sub>e, necesitaríamos un costo de producción del concreto molido por debajo de entre 2 y 4 USD/ton. Actualmente parece ser un modelo de negocio no del todo rentable, y por ello hace falta inversión en investigación en el tema para alcanzar niveles de recaptura de carbono cercanos al menos al 50% del carbono emitido en la fabricación del concreto.

Las dos estrategias de producción de áridos reciclados y de sumidero de carbono son en cierta medida contrarias. El incremento de la superficie específica va en contra de la valorización como árido, ya que los áridos gruesos son más comercializables que los finos. Entonces el aumento de energía para una mayor superficie específica no conduce a opciones siempre convenientes. Una estrategia con un buen nivel de compromiso es el avance en tecnologías de liberación de partículas en morteros y concretos de cemento. Esto es, la separación de los áridos naturales de la pasta de cemento endurecida. La separación permitiría ir hacia altas finuras de los finos con la mayor parte de productos de hidratación capaces de fijar carbono, y mayores tamaños de partículas para los áridos naturales que tengan baja porosidad.

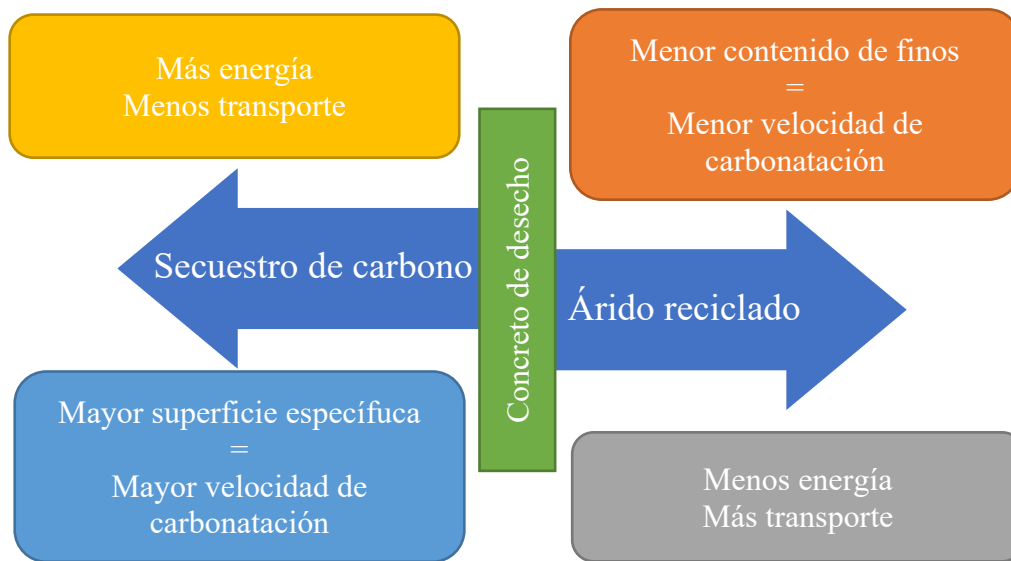


Figura 5. Procesamiento de concreto de desecho orientado a aplicación como árido versus aplicación como sumidero de carbono.

Muy interesantemente, en el ciclo del carbono de los materiales cementíceos, no es el concreto quien juega el papel principal. Una investigación reciente (Xi et al., 2016) muestra que el mortero a nivel mundial es capaz de secuestrar dos veces más carbono que el concreto (2.7 Gt versus 1.2 Gt, período 1930-2013). La principal razón de ello no es el volumen de uso (la misma estimación sitúa la relación de emisiones globales de carbono del concreto respecto al mortero en 68/27), sino más bien la porosidad y nivel de exposición de cada material. El mortero es más poroso que el concreto, y además su aplicación es generalmente más superficial que la del concreto.

El potencial de morteros y concretos para absorber CO<sub>2</sub> del aire mediante carbonatación es enorme (en teoría puede alcanzar aproximadamente la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la fabricación del cemento). Pero la trituration necesaria al final de su vida útil para hacer que las partículas de concreto sean suficientemente pequeñas para ello es un proceso costoso y que requiere energía. Además, debido a que esta cantidad de CO<sub>2</sub> que podría absorberse es incierta, aún no puede incluirse en los inventarios de emisiones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Un ejemplo de avances en este sentido está en el Reino Unido, donde se lo está investigando (UK Shared Business Services Ltd., 2021) y se ha comenzado a incluir en presupuestos anuales de carbono. Estos avances deben hacerse con precaución para evitar errores que puedan desincentivar la implementación de la captura y utilización de carbono. Existen medios más rastreables para computar el carbono absorbido cuando se implementan en la producción del concreto.

Una visión de captura cuantificable de carbono es la de no esperar a que el concreto esté endurecido para carbonatarlo, sino incorporar el CO<sub>2</sub> cuando el concreto aún está fresco. Agregar CO<sub>2</sub> puede hacer que la resistencia se desarrolle más rápido. Aunque el CO<sub>2</sub> incorporado puede constituir solo el 1,3% del peso del concreto, la resistencia del mismo puede aumentar alrededor de un 10%. Eso permite a la vez reducir la cantidad de cemento necesaria por unidad de volumen del concreto, reduciendo las emisiones netas en aproximadamente un 5%. La tecnología CarbonCure (Wagner and Monkman, 2021), de carbonatación durante el mezclado del concreto se originó en Canadá y está disponible en el mercado hace ya algunos años, inyectando CO<sub>2</sub> en el concreto a gran escala su impacto llega a una producción de 6.5 millones de m<sup>3</sup> de concreto producidos en unas 300

plantas de concreto en todo el mundo, ahorrando 132 mil toneladas de CO<sub>2</sub>.

## 5. CONCLUSIONES

Debemos ver a la carbonatación del concreto como un proceso con variadas implicancias. Esto es, no sólo es determinante de la durabilidad de estructuras de concreto reforzado y sino también de cambios en la estructura de poro del concreto y en la eco-eficiencia de las construcciones a partir de la capacidad de captura de carbono. Más aún, con una visión global, debemos considerar que las estructuras de concreto reforzado implican solo entre una tercera y una cuarta parte del uso del cemento portland en el mercado. Entonces, la carbonatación pasa a ser un beneficio medioambiental en la mayoría de los casos prácticos donde no hay refuerzo involucrado.

La capacidad de captura de carbono de los materiales cementíceos es un aspecto aún poco investigado. Estas propiedades tienen la potencialidad de mostrar ventajas adicionales para la valorización del concreto y mortero de desecho. De esta forma, puede tenerse en cuenta la parcial recaptura de carbono del material al final de su vida útil, como forma de cálculo más preciso de su real impacto ambiental. Ello supone una estrategia de valorización complementaria a la de producción de áridos reciclados.

Aún hacen falta investigaciones para determinar con precisión la capacidad efectiva de recaptura de carbono en materiales cementíceos. Las condiciones de carbonatación afectan grandemente al grado de carbonatación, y en esto procesos artificiales de carbonatación muestran ventajas importantes. El grado de finura del concreto triturado es otro aspecto importante que determina la velocidad de captura de carbono y requiere ser explorado como implementación comercial en el futuro cercano con un mercado de carbono activo.

El desarrollo progresivo del mercado de derechos de emisión de carbono y otras políticas similares tienden a la implementación de tecnologías de captura y utilización del carbono que van encontrando viabilidad comercial. La industria del cemento ya avanza rápidamente con la captura del CO<sub>2</sub> emitido en plantas de cemento, por lo que existe una demanda incipiente de tecnologías de utilización de este CO<sub>2</sub> que muestren ventajas por sobre su almacenamiento.

## 6. REFERENCIAS

- Andersson, R., Fridh, K., Stripple, H., Häglund, M. (2013), Calculating CO<sub>2</sub> uptake for existing concrete structures during and after service life. *Environmental Science & Technology*. 47:11625-11633. <https://doi.org/10.1021/es401775w>
- Andrade C. (2020), Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments. *Construction and Building Materials*. 230:116804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116804>
- Angst, U., Moro, F., Geiker, M., Kessler, S., Beushausen, H., Andrade, C., Lahdensivu, J., Köliö, A., Imamoto, K.-ichi, von Greve-Dierfeld, S., Serdar, M. (2020), Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. *RILEM Technical Letters*. 5:85-100. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>
- Banco Mundial (2022) “State and Trends of Carbon Pricing 2022”. World Bank, Washington, DC. 74 p. <http://hdl.handle.net/10986/37455>
- Cao, Z., Myers, R.J., Lupton, R.C., Duan, H., Sacchi, R., Zhou, N., Miller, T.R., Cullen, J.M., Ge, Q., Liu G. (2020), The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nature Communications*. 11(1):3777. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- Chen, S., Chen, B., Feng, K., Liu, Z., Fromer, N., Tan, X., Alsaedi, A., Hayat, T., Weisz, H., Schellnhuber, H. J., Hubacek, K. (2020), Physical and virtual carbon metabolism of global cities.

- Nature Communications*. 11(1):182. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13757-3>
- CPLC (2017) “Report of the High-Level Commission on Carbon Prices”. Banco Mundial, Washington, DC., 61 p.  
[https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53decccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing\\_FullReport.pdf](https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53decccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing_FullReport.pdf)
- Dodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R. (2009) Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 53(5):276-286.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.12.007>
- Dossche, C., Boel, V., De Corte, W., Van den Heede, P., De Belie, N. (2016) A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. *Cement and Concrete Composites*. 73:192-202.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.011>
- EN 16757 European Committee for Standardization (2017). *EN 16757 (2017) - Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Product Category Rules for concrete and concrete elements*. Bruselas, Bélgica. 58 p.
- Galan, I., Andrade, C., Mora, P., Sanjuan, M.A. (2010), Sequestration of CO<sub>2</sub> by Concrete Carbonation. *Environmental Science & Technology*. 44(8):3181-3186.  
<https://doi.org/10.1021/es903581d>
- Gholizadeh-Vayghan, A., Bellinkx, A., Snellings, R., Vandoren, B., Quaghebeur, M. (2020), The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. 257:119486.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119486>
- Hills, T.P., Sceats, M., Rennie, D., Fennell, P. (2017) LEILAC: Low cost CO<sub>2</sub> capture for the cement and lime industries. *Energy Procedia*. 114, 6166-6170.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1753>
- Ho, H.J., Iizuka, A., Shibata, E. (2021) Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review. *Journal of Cleaner Production*. 284: 124785.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124785>
- Jakob, M., Steckel, J.C. (2014) How climate change mitigation could harm development in poor countries. *WIREs Climate Change*. 5:161–168. <https://doi.org/10.1002/wcc.260>
- Kikuchi, T., Kuroda, Y. (2011). Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 9(1):115-124. <https://doi.org/10.3151/jact.9.115>
- Luderer, G., Bosetti, V., Jakob, M., Leimbach, M., Steckel, J.C., Waisman, H., Edenhofer, O. (2012), The economics of decarbonizing the energy system—results and insights from the RECIPE model intercomparison. *Climatic Change*. 114:9–37. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0105-x>
- Maselli, L., Villagrán, Y.A., San Juan, G. (2020) Consideraciones preliminares al análisis de ciclo de vida de estructuras de hormigón elaborado con agregados reciclados en Provincia de Buenos Aires. *Ciencia y Tecnología de los Materiales (LEMIT)*. 10:9-24.
- Pade, C., Guimaraes, M. (2007) The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research*. 37:1348-1356. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009>
- Possan, E., Felix, E.F., Thomaz, W.A. (2016), CO<sub>2</sub> uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 1: 7. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0010-9>
- Shi, C., Wu, Z., Cao, Z., Ling, T.C., Zheng, J. (2018) Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*. 86:130-138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>
- Skocek, J., M. Zajac, and M. Ben Haha, Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. *Scientific Reports*. 10(1):5614.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-62503-z>

- The Pricer (2022) <https://www.thepricer.org/crushed-concrete-cost/> (accedido 14 de octubre de 2022).
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of steel in concrete, Report 4.82*”, Tesis de Doctor, Lund University, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), 469 p. <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4709458/3173290.pdf>
- UK Shared Business Services Ltd. (2021) Re-Carbonation of Concrete Emissions sink modelling for the UK Greenhouse Gas Inventory (GHGI), <https://bidstats.uk/tenders/2021/W21/751435949> (accedido 14 de octubre de 2022).
- Villagrán Zaccardi, Y.A., Pico Cortes, C.M., Zega, C.J. (2021), Aspectos de la carbonatación del hormigón con agregado reciclado. *Cemento & Concreto de Iberoamérica y el Caribe*. 8: 110-117. <https://ficem.org/revista-concreto-y-cemento-2021-new2/index.html>
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E. F., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V. M. (2022), Overview of cement and Concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality. *RILEM Technical Letters*. 7:30-46. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>
- Wagner, J., Monkman, S. (2021) “*Making and Impact: Sustainable Success Stories – CarbonCure*”, en: T.J. Clark, A.S. Pasternak (Eds.), How to commercialize chemical technologies for a sustainable future, Wiley, West Sussex (Reino Unido), pp. 257-262.
- Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., Liu, Z. (2016), Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience*. 9:880-883. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S. (2016), Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 65:67-74, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- Zhan, B.J., Xuana, D.X., Zeng, W., Poon, C.S. (2019), Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*. 104: 103360. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103360>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-803-MX  
Conferencia Magistral Invitada  
pp. PC – 52 – 64



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## La resonancia magnética aplicada al estudio de materiales base cemento

P. Cano Barrita<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [pcano@ipn.mx](mailto:pcano@ipn.mx)

<sup>1</sup> CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México

### RESUMEN

La resonancia magnética es una técnica no destructiva y no invasiva que ha sido utilizada para caracterizar diversos materiales, incluyendo los basados en cemento Portland. En estos materiales, la relaxometría e imagenología utilizan la señal del protón (<sup>1</sup>H) del agua que contienen. La disponibilidad de magnetos permanentes ha hecho posible el desarrollo de sensores móviles unilaterales de bajo campo que permiten obtener señal de muestras más grandes que el propio sensor, posibilitando mediciones en estructuras reales. La preparación de las muestras es simple y generalmente no requieren secado, por lo que no se daña la microestructura del material. En materiales porosos la señal de resonancia magnética, global o de una zona específica de la muestra, posee información acerca del contenido de humedad y/o de la distribución del tamaño de poro. Con esta técnica es posible monitorear la evolución de la hidratación del cemento a través de los tiempos de relajación y la intensidad de la señal. Otras aplicaciones son el monitoreo de la carbonatación, el curado interno, el secado y el ingreso de fluidos o iones de interés en el área de la ciencia y tecnología del concreto.

**Palabras clave:** ensayo no destructivo; tamaño de poro; contenido de humedad; permeabilidad; resistencia mecánica.

## 1. INTRODUCCIÓN

La resonancia magnética nuclear es ampliamente conocida en las áreas de imagenología médica y de espectroscopia en química analítica. Se basa en la interacción de los núcleos de los átomos con campos magnéticos. Tradicionalmente, los magnetos superconductores con campos magnéticos cada vez más altos son utilizados en laboratorios especializados y recientemente existe una nueva generación de magnetos superconductores que no requieren líquidos criogénicos y son de campo variable (Razieh Enjilela et al., 2019). Actualmente, con la disponibilidad de magnetos permanentes, la resonancia magnética en dispositivos móviles y de escritorio se utiliza en áreas que van desde la medicina, la química, la industria petrolera, hasta la ciencia de materiales y biología (B. Blümich et al., 2008). Los materiales base cemento no han sido la excepción como objeto de estudio con la resonancia magnética, cuyos primeros trabajos se enfocaron en la microestructura, área superficial y distribución de tamaño de poro en pastas de cemento blanco hidratadas (Bhattacharja et al., 1993; Halperin et al., 1991, 1994). El uso de cemento blanco fue necesario ya que el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el cemento ordinario reduce el tiempo de vida de la señal, imposibilitando su adquisición o reduciendo drásticamente la relación señal/ruido. Posteriormente, se utilizó la imagenología por resonancia magnética para la obtención de imágenes y perfiles de distribución de humedad utilizando técnicas convencionales que tuvieron un éxito limitado (Gummerson et al., 1979; Kaufmann & Studer, 1995). El desarrollo de la técnica SPRITE de imagenología por resonancia magnética para sistemas con vida de señal corta (Balcom et al., 1996; Halse et al., 2003), como es el caso de materiales base cemento, ha permitido incluso la obtención de perfiles de distribución de sodio y cloro en morteros de cemento. Con el desarrollo de NMR de bajo campo en sistemas de escritorio o dispositivos de NMR portables, las posibilidades de aplicaciones se han incrementado significativamente (Bernhard Blümich, 2019; Manz et al., 2006; Marko et al., 2007; Perlo et al., 2005). El presente trabajo no pretende ser una revisión del estado del arte en la técnica de resonancia magnética aplicada a materiales base cemento, sino más bien exponer algunas aplicaciones que ha realizado el autor, especialmente con dispositivos portables o de escritorio en el estudio de materiales base cemento conteniendo cemento Portland ordinario para estudiar cambios en la microestructura, carbonatación, perfiles de penetración de agua, y explorar el potencial de dispositivos de bajo campo para obtención de señal de los núcleos de cloro y sodio.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE NMR

La resonancia magnética se refiere a la respuesta de los núcleos atómicos, que poseen un momento magnético y un momento angular o spin, a la aplicación de un campo magnético externo (Coates et al., 1999). El núcleo del átomo de hidrógeno es un protón que tiene carga positiva y tiene asociado un momento angular o espín, generando un campo magnético con polos norte y sur alineados con el eje de giro, análogo a una barra magnética (Figura 1a). En ausencia de un campo magnético, una muestra que contiene protones posee espines nucleares alineados aleatoriamente (Figura 1b). Sin embargo, en presencia de un campo magnético externo  $B_0$ , éste ejerce un torque en los núcleos y alinea el eje del espín nuclear con  $B_0$  (Figura 1c) y se inicia un movimiento de precesión alrededor de  $B_0$  con una frecuencia denominada frecuencia de Larmor  $\omega$  dada por (1).

$$\omega = \gamma B_0 \quad (1)$$

donde  $\gamma$  es el radio giromagnético (para hidrógeno  $\gamma$  es 42.58 MHz/Tesla).



Se observa que la frecuencia es función del campo magnético aplicado y si éste es dependiente de la posición, entonces la frecuencia está asociada a la posición del núcleo, siendo esta la base para la imagenología por resonancia magnética.

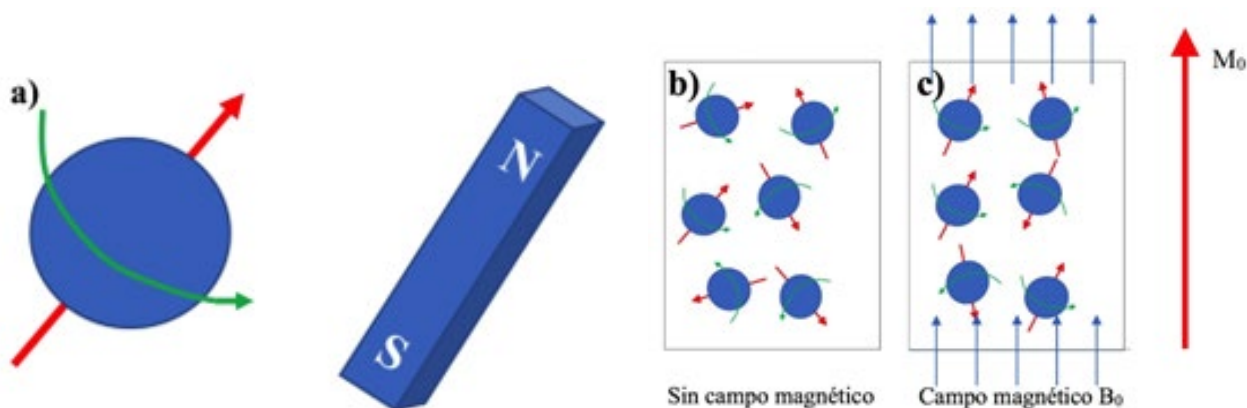


Figura 1. a) El núcleo de hidrógeno se comporta como una barra magnética alineada con el eje de giro del núcleo, b) Una muestra conteniendo protones en ausencia de un campo magnético  $B_0$ , y c) Una muestra conteniendo protones dentro de un campo magnético, que da origen a una magnetización neta  $M_0$ .

Como se ilustra en la Figura 1c, cuando existe un gran número de protones en precesión alrededor de  $B_0$ , más espines lo harán en sentido paralelo que en anti-paralelo, cuya diferencia forma la magnetización global  $M_0$  que provee la señal medida por los dispositivos de NMR y MRI.  $M_0$  es proporcional al número de protones, la intensidad del campo magnético, y del inverso de la temperatura absoluta.  $M_0$  crece con una constante de tiempo  $T_1$ , el cual es el tiempo de relajación longitudinal (Weishaupt et al., 2008).

Para observar la señal de NMR, es necesario mover la magnetización longitudinal  $M_0$  a un plano transversal, lo cual se logra con un campo magnético oscilante ( $B_1$ ) perpendicular al campo magnético  $B_0$ , aplicado con una bobina emisora-receptora. Los protones en el estado de energía bajo pueden absorber energía proporcionada por  $B_1$  y cambiar al estado de alta energía. El campo  $B_1$  también causa que todos los protones precesen en fase. Estos dos efectos causados por  $B_1$  es llamado resonancia magnética.

Dependiendo del tiempo de aplicación de  $B_1$  y de la amplitud del campo oscilante, el ángulo de  $90^\circ$  desplazará  $M_0$  al plano transversal, mientras que un ángulo de  $180^\circ$  solo cambiará el signo de  $M_0$ . Cuando el campo  $B_1$  se apaga, la población de protones se desfasa y la magnetización neta disminuye; la bobina receptora que mide magnetización en la dirección transversal detecta una señal que decae. Esta señal es llamada Free Induction Decay (FID) y decae con una constante  $T_2^*$ , debido a heterogeneidades en el campo magnético  $B_0$ . Sin embargo, el desfase producido por las heterogeneidades en  $B_0$  es reversible por medio de la aplicación de pulsos de  $180^\circ$  que logran ponerlos los protones en fase otra vez. La técnica utilizada para determinar el decaimiento de la magnetización transversal es la CPMG (Meiboom & Gill, 1958), que se muestra en la Figura 2.

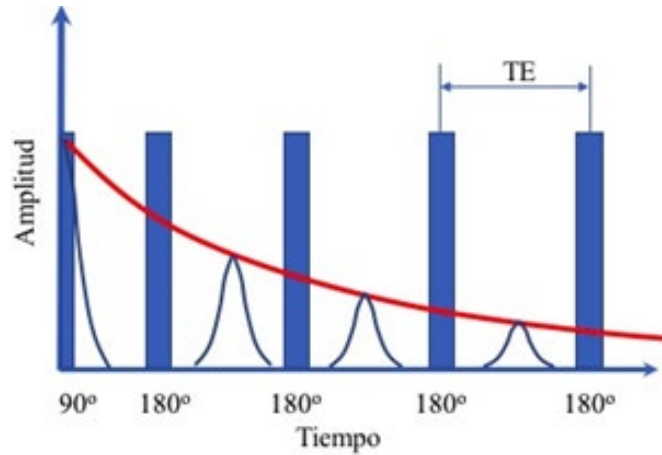


Figura 2. Secuencia de pulsos CPMG que consiste en un pulso de 90° seguido por pulsos de 180°. Se forman ecos de amplitud decreciente después de los pulsos de 180°. La amplitud es proporcional a la cantidad de protones presentes en el agua contenida en la muestra.

El decaimiento CPMG se ajusta generalmente a una ecuación de decaimiento bi-exponencial (2) para obtener las constantes de decaimiento  $T_2$  y sus correspondientes intensidades de señal. Si la relación señal a ruido es alta, el decaimiento puede descomponerse en un mayor número de componentes.

$$S(t) = M_{0,1}e^{\left(\frac{-t}{T_{2,1}}\right)} + M_{0,2}e^{\left(\frac{-t}{T_{2,2}}\right)} \quad (2)$$

donde  $S$  es la intensidad de la señal,  $t$  es tiempo,  $M_{0,1}$  y  $M_{0,2}$  son las componentes de la magnetización en equilibrio correspondientes a las constantes  $T_{2,1}$  y  $T_{2,2}$ .

El tiempo de vida de la señal  $T_2$  se relaciona con el tamaño de poro, de acuerdo con (3).

$$\frac{1}{T_2} = \rho \cdot \frac{S}{V} \quad (3)$$

donde  $1/T_2$  es la velocidad de relajación,  $\rho$  es la relaxividad de la superficie,  $S/V$  es la relación superficie/volumen del sistema poroso de la muestra.

Adicionalmente, la transformada inversa de Laplace del decaimiento proporciona la distribución de tiempo  $T_2$  (Coates et al., 1999), la cual es un proxy de la distribución de tamaño de poro de la muestra. Cuando se conoce la relaxividad de la superficie, la distribución de  $T_2$  puede convertirse a distribución de tamaño de poro. La Tabla 1 muestra la relaxividad de la superficie para algunos componentes del cemento o productos de la hidratación.

Tabla 1. Valores de relaxividad de la superficie  $\rho_2$  de materiales o productos de hidratación del cemento Portland.

Material o producto de hidratación	Relaxividad de la superficie $\rho_2$ ( $\mu\text{m/s}$ )	Referencias
C-S-H	5.51	(Dalas et al., 2014)
Agua entre capas	0.9	(Nagel et al., 2021)
Etringita	39.5-44.7	(Dalas et al., 2014)
Yeso	6.2	(Dalas et al., 2014)
Cemento Portland blanco (secado)	3.73	(Nagel et al., 2021)
Calcita sintética	2.74	(Dalas et al., 2014)

Con relación a la imagenología por resonancia magnética, aplicada al estudio de sistemas con tiempos de vida cortos, del orden de cientos de microsegundos, la técnica que se ha empleado es la SPRITE original (Balcom et al., 1996) o versiones más eficientes como la Centric Scan SPRITE (Halse et al., 2003). La Figura 3 muestra la secuencia de pulsos y gradientes de esta técnica de medición.

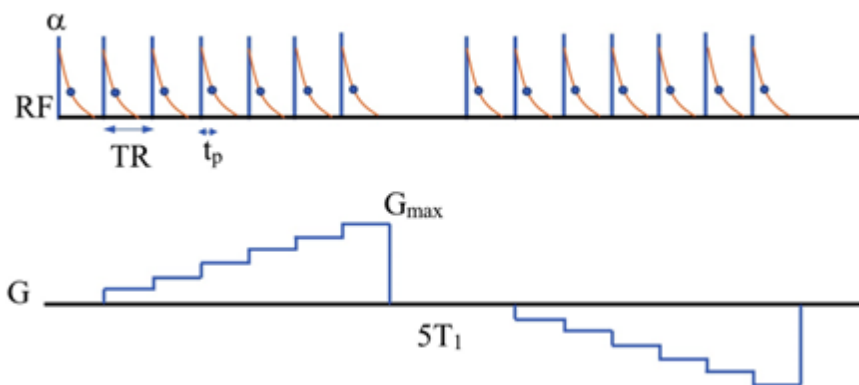


Figura 3. Secuencia de pulsos de la técnica Centric Scan SPRITE. El gradiente se aplica en rampa, adquiriendo un solo punto en cada escalón de gradiente, al tiempo  $t_p$  después de aplicar el pulso de RF. Los datos adquiridos se procesan a través de la Transformada de Fourier para obtener el perfil de distribución de humedad

### 3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Una de las grandes ventajas de la RMN es que, a diferencia de otras técnicas como la gravimétrica para medir el contenido de agua, o la intrusión de mercurio para caracterizar porosidad y distribución de tamaño de poro, que requieren necesariamente la eliminación del agua, la relaxometría o imagenología por resonancia magnética de hecho requieren agua en la muestra para la adquisición de señal. Los recipientes de las muestras no deben contener hidrógeno en su estructura, ya que contribuye a la señal de NMR observada. Usualmente se utiliza el vidrio o teflón para contener muestras frescas, ya que las endurecidas simplemente se remueven del contenedor.

Uno de los casos que puede requerir de secado parcial o total de la muestra son experimentos de absorción de fluidos, en cuyo caso se puede secar a una temperatura de 50 °C o por medio de intercambio de fluidos para reducir el daño a la delicada microestructura de la pasta de cemento hidratada. En caso de colocar recubrimientos base resinas sobre las muestras, es importante que la señal con que contribuyen sea mínima y se pueda sustraer de la señal total.

#### 4. RELAXOMETRÍA POR NMR

La relaxometría se ha utilizado para conocer la evolución de la microestructura de pastas de cemento causada por la hidratación del cemento (Muller, 2014). La técnica de medición más utilizada es la conocida como CPMG que permite obtener cambios en la magnetización transversal, en la cual la intensidad de la señal es proporcional a la cantidad de agua presente en la muestra, y la constante de decaimiento se relaciona con el tamaño de poro. A partir del decaimiento CPMG también es posible determinar la distribución del tiempo de vida de la señal  $T_2$ , la cual se considera un proxy de la distribución de tamaño de poro.

Normalmente la muestra objeto de estudio se introduce dentro del magneto superconductor o en el espacio entre magnetos permanentes. Sin embargo, los sensores miniatura fueron diseñados para ser embebidos en la muestra, por lo que en este caso puede ser sumergirlo en el concreto fresco y utilizar la información obtenida para monitorizar el desarrollo de resistencia mecánica en función del tiempo (Floriberto Díaz-Díaz et al., 2013). Este tipo de sensor, del tamaño de un agregado grueso de 1 pulgada aproximadamente, ha mostrado ser útil para obtener señal aún cinco años y medio después de haber sido embebido en un cilindro de concreto. La Figura 4 muestra el sensor construido y el sensor ya embebido en un cilindro de concreto endurecido. El sensor se conecta a un espectrómetro de RMN portable para ejecutar la secuencia CPMG y obtener el decaimiento de la magnetización transversal. Se observa en las Figura 2c y 2d que existe una relación lineal entre la resistencia a la compresión de cilindros de concreto con relaciones agua/cemento = 0.60 y la velocidad de relajación  $1/T_2$ . Debe mencionarse que una distancia de 28 mm del sensor a una barra de refuerzo de 3/8 de pulgada no causó cambio alguno en la frecuencia de resonancia. Cuando se colocó a 14 mm de la barra, se produjo un incremento del 1.6 % en la frecuencia, lo cual se pudo corregir con el circuito de sintonía externo construido para este fin.

Otro tipo de sensores de NMR de interés son los unilaterales, los cuales, a diferencia de los sensores imbebibles, no son invasivos y tienen la ventaja de que se pueden realizar mediciones en una muestra de cualquier tamaño. En este caso, la señal se obtiene de una pequeña región de la muestra cercana a la superficie del sensor. El arreglo de tres magnetos es un ejemplo de este tipo de sensores que fue propuesto por Naranjo et al. (García-Naranjo et al., 2014) para realizar mediciones en rocas de interés en el área de la industria del petróleo. La Figura 5 muestra un esquema del arreglo de tres magnetos con una antena elíptica de superficie. Una de las aplicaciones que se han realizado de este sensor en materiales base cemento es la determinación del frente de carbonatación a través de cambios en el tiempo de relajación  $T_2$  y en la intensidad de la señal.

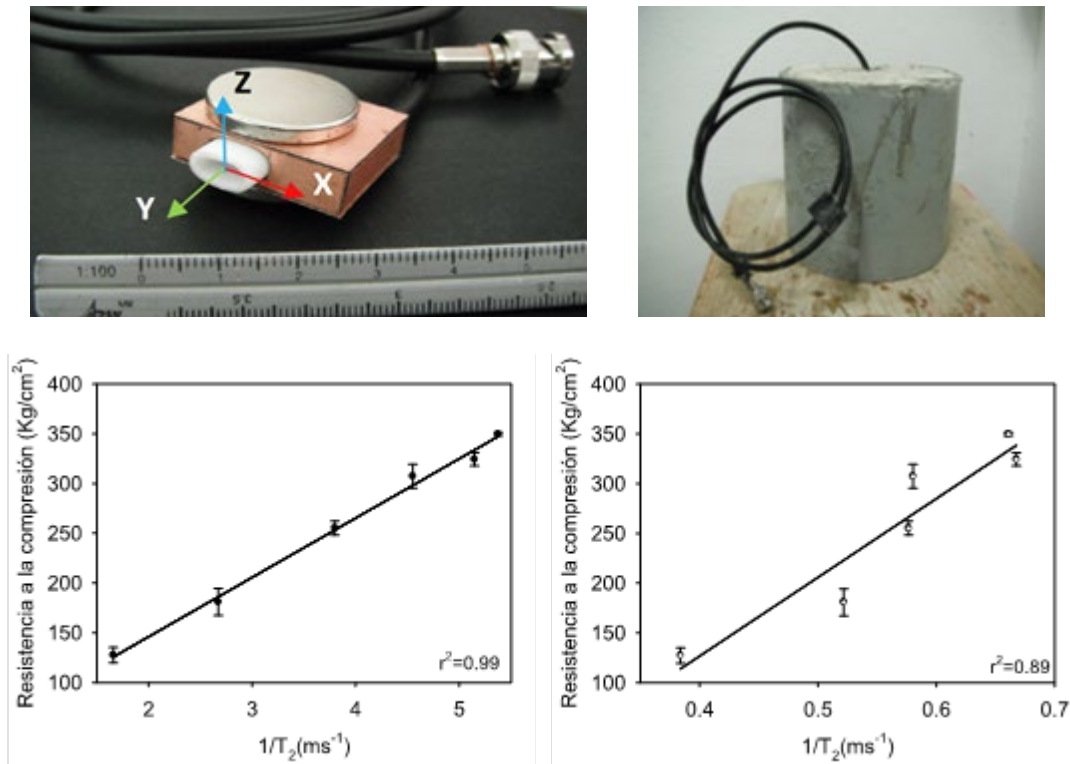


Figura 4. Sensor miniatura imbebible de NMR. a) sensor construido mostrando el tubo de teflón de sección transversal elipsoidal donde penetra la muestra de mortero del concreto, b) Sensor embebido en un cilindro de concreto, Resistencia a la compresión vs la rapidez de relajación de la señal ( $1/T_2$ ) obtenidos de especímenes de concreto con relación  $a/c = 0.60$ , c) Utilizando la componente corta, y d) Utilizando la componente larga (Floriberto Díaz-Díaz et al., 2013).

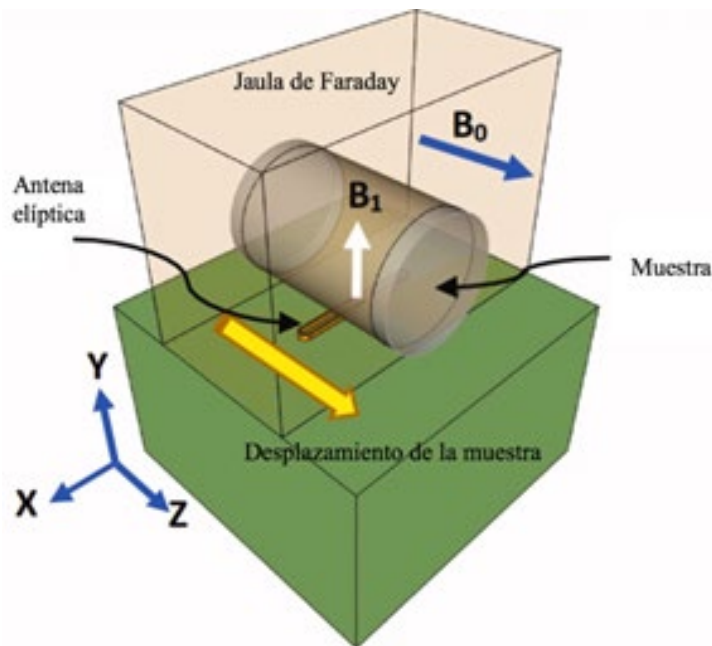


Figura 5. Esquema del arreglo de tres magnetos propuesto por Naranjo et al (García-Naranjo et al., 2014). La antena original fue circular y posteriormente se fabricó una antena elipsoidal para reducir la distancia entre puntos de medición (F. Díaz-Díaz et al., 2020).

La Figura 6 muestra los cambios en  $T_2$  y en la intensidad de la señal, producto de los cambios causados por la carbonatación en la estructura porosa de la pasta de cemento y en la relaxividad de la superficie de los sólidos en contacto con la solución de poro (P. F. J. Cano-Barrita et al., 2017). La relaxividad de la calcita ha sido reportada como  $2.74 \mu\text{m/s}$ , comparada con  $5.51 \mu\text{m/s}$  para el C-S-H (ver Tabla 1), lo cual de acuerdo con (3) explicaría el incremento en  $T_2$  en la zona carbonatada. En una pasta carbonatada y saturada con agua, los cristales de carbonato de calcio modifican esta propiedad de la superficie al estar también en contacto con la solución de poro. La intensidad de la señal disminuye en la zona carbonatada debido a la reducción de porosidad causada por la precipitación de carbonato de calcio. La profundidad a la cual se observaron cambios de  $T_2$  causados por carbonatación fue 1.44 veces la indicada por la fenolftaleína (F. Díaz-Díaz et al., 2020), menor que 2.0 veces la reportada con el uso de otras técnicas analíticas como TGA, XRD, and FTIR (Chang & Chen, 2006).

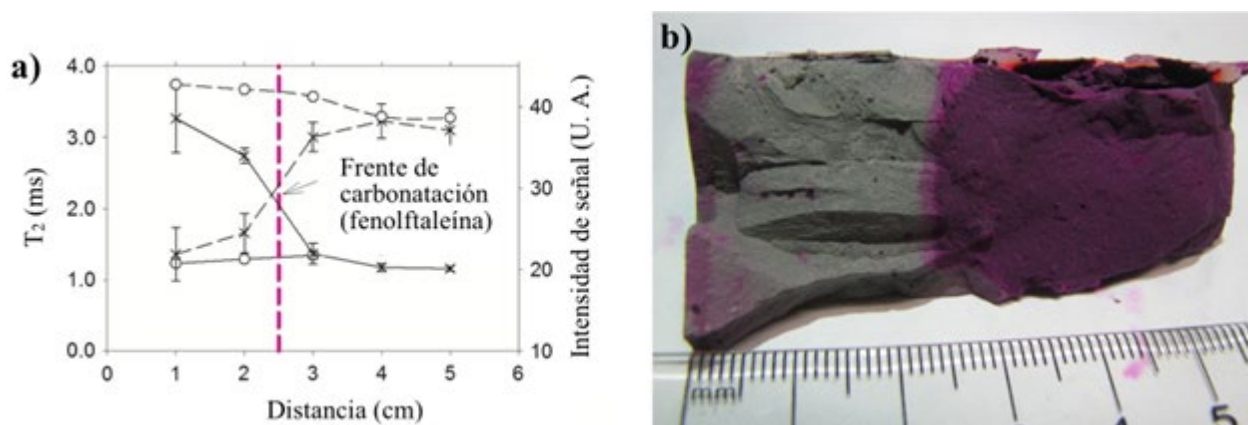


Figura 6. a) Componente larga del tiempo de vida de la señal (línea sólida) e intensidad de la señal (línea discontinua) versus distancia en una muestra de 6 cm de largo carbonatada (cruces) y control (círculos), b) Fotografía que indica el frente de carbonatación después de rociar una solución de fenolftaleína sobre la superficie. (P. F. J. Cano-Barrita et al., 2017).

Otra aplicación del arreglo de tres magnetos ha sido en la determinación del contenido de agua en especímenes de mortero de cemento Portland durante absorción capilar (P. F. de J. Cano-Barrita & Díaz-Díaz, 2021). Debido al tiempo requerido para examinar un punto de la muestra, de aproximadamente una hora, la medición a tiempos menores a 1 día no es adecuada. Esto es debido al movimiento del frente húmedo durante la medición que produciría un perfil incorrecto de la distribución de agua. La Figura 7 muestra la comparación entre los contenidos de agua de un espécimen de mortero con relación  $a/c = 0.60$  durante absorción capilar, obtenidos a través de mapeo de  $T_2^*$  por imagenología de resonancia magnética (Beyea et al., 1998) y por medio del desplazamiento de la muestra sobre el arreglo de tres magnetos para obtener señal de NMR en cada posición. Se observa que el arreglo de tres magnetos provee información similar a la obtenida con un sistema de imagenología por RM, aunque el tiempo de medición es mucho menor en este último. A partir de esta información de los dos perfiles y la inversión de datos realizada con el software Hydrus (Šimůnek et al., 2016), fue posible determinar la permeabilidad saturada, obteniendo valores similares.

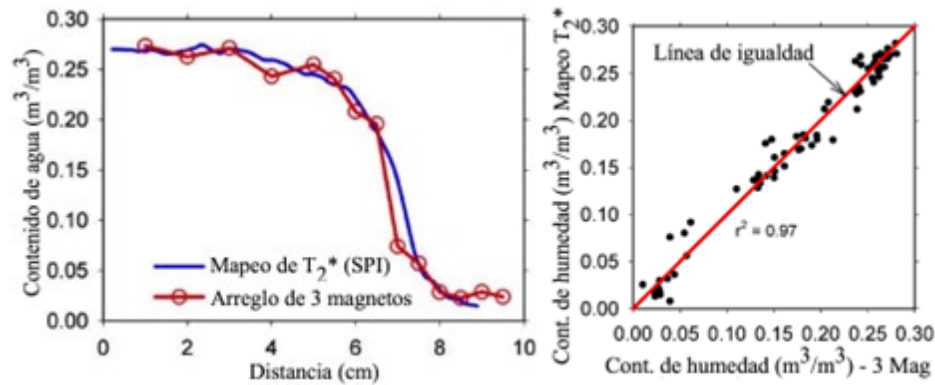


Figura 7. a). Distribución del contenido de agua utilizando mapeo de  $T_2^*$  con la técnica SPI de imagenología por RM y con el arreglo de tres magnetos, b) Relación entre los contenidos de agua obtenidos con ambas técnicas de medición. (P. F. de J. Cano-Barrita & Díaz-Díaz, 2021)

Desde el punto de vista de durabilidad, otro núcleo de interés en el área de materiales base cemento es el  $^{35}\text{Cl}$  debido al rol de los iones cloruro en la corrosión del acero de refuerzo. Aún cuando la imagenología por RMN ha demostrado su utilidad en la determinación de perfiles de distribución de iones cloruro (Cano et al., 2002; Pel et al., 2016), la baja sensibilidad del  $^{35}\text{Cl}$  comparado con el  $^1\text{H}$  (aproximadamente 10 veces menos sensible) ha requerido del uso de campos magnéticos mayores a 1.5 T. Una estimación del tiempo requerido para realizar una medición con el arreglo de tres magnetos (Figura 5), por ejemplo, indicó varios meses para una sola medición, lo cual es totalmente impráctico. En un estudio reciente (Díaz-Díaz, 2021) se utilizó un arreglo Halbach (Figuras 8a y 8b) que genera un campo de aproximadamente 1 Tesla para obtener señal en soluciones de NaCl a distintas concentraciones. Las figuras 8c y 8d muestran la relación lineal entre la intensidad de la señal de cada núcleo y la concentración de NaCl, obteniendo mejores resultados para el  $^{23}\text{Na}$ , comparado con los del  $^{35}\text{Cl}$ . No fue posible obtener señal de una pasta de cemento saturada con una solución de 2.8 M, por lo que se requiere mejorar la antena de RF para excitar una mayor cantidad de muestra u homogenizar mejor el campo magnético.

## 5. IMAGENOLÓGÍA POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Cuando ha sido importante conocer la distribución de fluidos o especies iónicas en función del tiempo dentro de un material base cemento, se ha utilizado la técnica SPI (Single Point Imaging) (Emid & Creighton, 1985) o versiones más eficientes como la SPRITE (Balcom et al., 1996) o la Centric Scan SPRITE (Halse et al., 2003), las cuales son utilizadas para obtener imágenes en 1, 2 y 3 dimensiones en muestras con tiempos de vida de la señal cortos, del orden de cientos de microsegundos. En este tipo de muestras, las técnicas tradicionales utilizadas en imagenología para propósitos médicos son inapropiadas al no captar señales que decaen muy rápido. Las técnicas mencionadas se han utilizado para monitorizar el ingreso de agua a través de capilaridad en materiales insaturados o totalmente secos (R. Enjilela et al., 2017; Razieh Enjilela et al., 2018). La Figura 9 muestra perfiles de contenido de agua durante absorción capilar en muestras de mortero de cemento Portland ordinario:arena. En estas figuras se observan dos comportamientos distintos del ingreso de agua a la muestra, mientras que en la Figura 9b) se observa una penetración continua del frente húmedo, adicional a un incremento en el contenido de agua, en la Figura 9c) el frente húmedo se establece durante los primeros 5 días y posteriormente se redistribuye el agua. Las mediciones gravimétricas no son capaces de revelar estas diferencias o por lo menos es difícil prever el comportamiento observado.

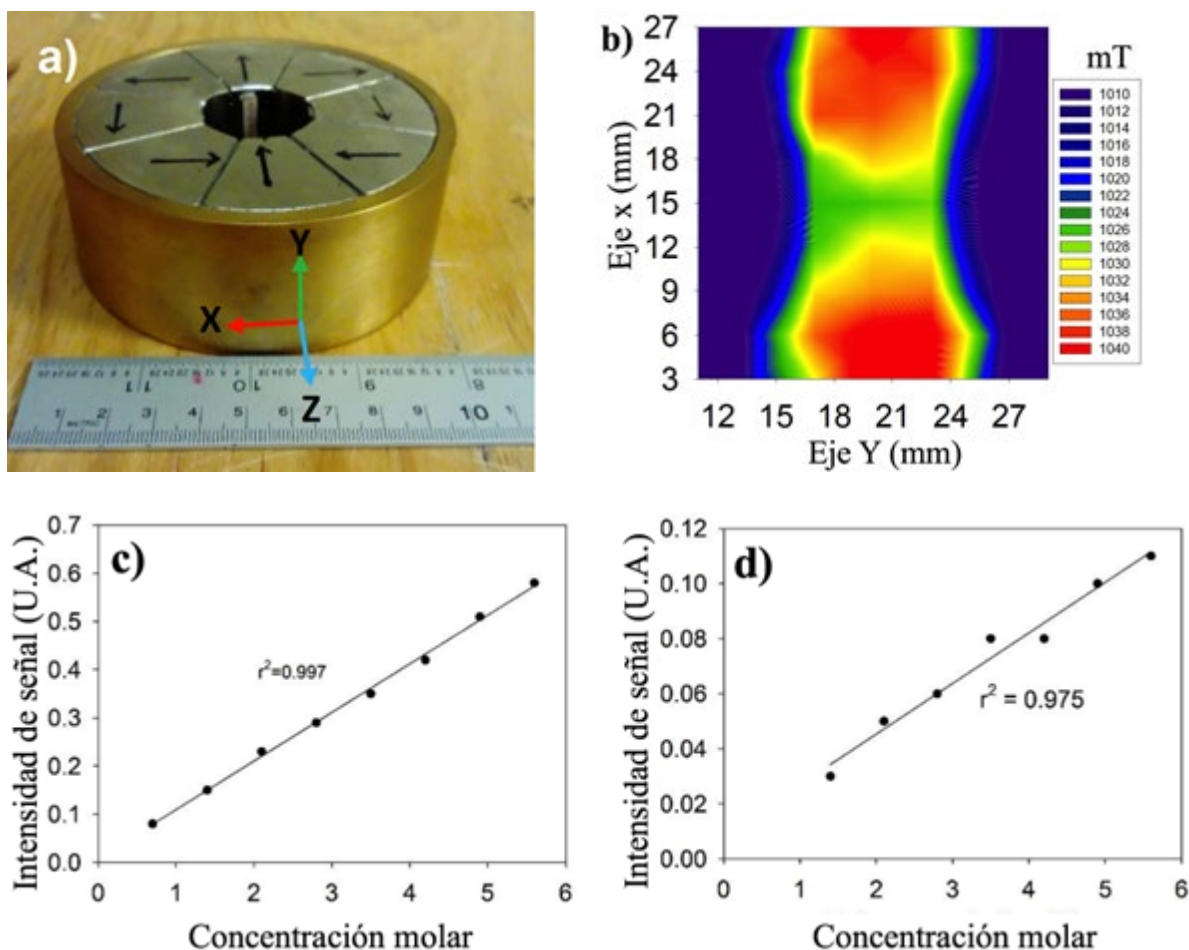


Figura 8. a) Arreglo de magnetos Halbach utilizado para la obtención de señal de  $^{23}\text{Na}$  y  $^{35}\text{Cl}$ , b) Campo magnético en el plano XY, Relación entre la concentración molar de NaCl y la intensidad de la señal para: c)  $^{23}\text{Na}$  y d)  $^{35}\text{Cl}$ . (Díaz-Díaz, 2021).



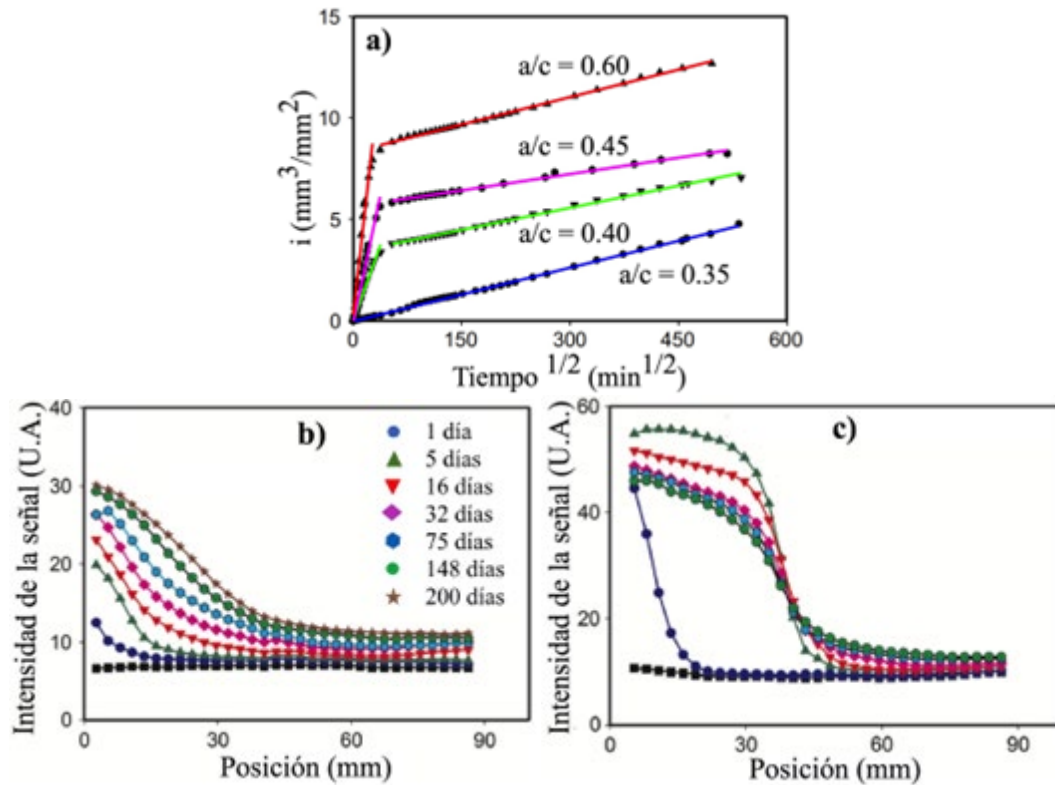


Figura 9. Absorción de agua en mortero de cemento blanco hasta 200 días, a) Cantidad de agua absorbida por unidad de área transversal de la muestra versus la raíz cuadrada del tiempo, b) Perfiles de intensidad de la señal para mortero  $a/c = 0.35$  y c) Perfiles de intensidad de la señal para mortero  $a/c = 0.45$ . (Razieh Enjilela et al., 2018)

## 6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se describen algunas aplicaciones de la resonancia magnética, especialmente de bajo campo en dispositivos portables o de escritorio. Estos dispositivos demuestran su potencial para estudiar de manera no destructiva y no invasiva, distintos procesos de interés en el área de la ciencia y la tecnología de materiales base cemento. En algunos casos, como en la obtención de señal de  $^{35}\text{Cl}$ , se requiere incrementar el campo magnético de los dispositivos portables. En otros casos solo se necesita reducir el tiempo de adquisición de la señal para poder monitorizar procesos relativamente rápidos que pueden modificar el objeto de estudio durante el tiempo de adquisición de la señal.

## 7. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la SIP del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para el proyecto SIP clave 20221260.

## 8. REFERENCIAS

Balcom, B. J., Macgregor, R. P., Beyea, S. D., Green, D. P., Armstrong, R. L., & Bremner, T. W. (1996). Single-point ramped imaging with T1 enhancement (SPRITE). *Journal of Magnetic Resonance - Series A*, 123(1), 131–134. <https://doi.org/10.1006/jmra.1996.0225>

- Beyea, S. D., Balcom, B. J., Prado, P. J., Cross, A. R., Kennedy, C. B., Armstrong, R. L., & Bremner, T. W. (1998). Relaxation time mapping of short T<sub>2</sub> nuclei with single-point imaging (SPI) methods. *Journal of Magnetic Resonance*, 135, 156–164. <https://doi.org/10.1006/jmre.1998.1537>
- Bhattacharja, S., Moukwa, M., D’Orazio, F., Jehng, J. Y., & Halperin, W. P. (1993). Microstructure determination of cement pastes by NMR and conventional techniques. *Advanced Cement Based Materials*, 1(2), 67–76.
- Blümich, B., Perlo, J., & Casanova, F. (2008). Mobile single-sided NMR. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 52(4), 197–269. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2007.10.002>
- Blümich, Bernhard. (2019). Low-field and benchtop NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, 306, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2019.07.030>
- Cano-Barrita, P. F. de J., & Díaz-Díaz, F. (2021). Moisture distribution during water absorption of ordinary portland cement mortars obtained with low-field unilateral magnetic resonance. In *Materials* (Vol. 14, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/ma14154279>
- Cano-Barrita, P. F. J., Balcom, B. J., & Castellanos, F. (2017). Carbonation front in cement paste detected by T<sub>2</sub> NMR measurements using a low field unilateral magnet. *Materials and Structures*, 50(2), 150. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1019-5>
- Cano, F. de J., Bremner, T. W., McGregor, R. P., & Balcom, B. J. (2002). Magnetic resonance imaging of <sup>1</sup>H, <sup>23</sup>Na, and <sup>35</sup>Cl penetration in Portland cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1067–1070. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00747-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00747-0)
- Chang, C. F., & Chen, J. W. (2006). The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1760–1767.
- Coates, G. R., Xiao, L., & Prammer, M. G. (1999). *NMR logging applications*. Halliburton Energy Services.
- Dalas, F., Korb, J.-P., Pourchet, S., Nonat, A., Rinaldi, D., & Mosquet, M. (2014). Surface relaxivity of cement hydrates. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(16), 8387–8396.
- Díaz-Díaz, F. (2021). *Sensores de resonancia magnética para caracterizar aspectos de durabilidad del recubrimiento del concreto*. Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional.
- Díaz-Díaz, F., Cano-Barrita, P. F. D. J., León-Martínez, F. M., & Castellanos, F. (2020). Unilateral low-field magnetic resonance measurements of carbonation depth in unsaturated and saturated Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106237>
- Díaz-Díaz, Floriberto, Cano-Barrita, P. F. de J., Balcom, B. J., Solís-Nájera, S. E., & Rodríguez, A. O. (2013). Embedded NMR sensor to monitor compressive strength development and pore size distribution in hydrating concrete. *Sensors (Switzerland)*, 13(12), 15985–15999.
- Emid, S., & Creyghton, J. H. N. (1985). High Resolution NMR Imaging in solids. *Physica*, 128B, 81–83.
- Enjilela, R., Cano-Barrita, P. . de J., Komar, A., Boyd, A. J., & Balcom, B. J. (2017). Monitoring steady state moisture distribution during wick action in mortar by magnetic resonance imaging (MRI). *Materials and Structures*, 50, 1–12. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1017-7>
- Enjilela, Razieh, Cano-Barrita, P. F. J., Komar, A., Boyd, A. J., & Balcom, B. J. (2018). Wet front penetration with unsteady state wicking in mortar studied by Magnetic Resonance Imaging (MRI). *Materials and Structures*, 51, 1–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1142-y>
- Enjilela, Razieh, MacMillan, B., McAloon, M. J., Petrov, O. V., Vashae, S., & Balcom, B. J. (2019). Controlling susceptibility mismatch effects, signal lifetimes, and SNR through variation of B<sub>0</sub> in MRI of rock core plugs. *Journal of Magnetic Resonance*, 307, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2019.106575>
- García-Naranjo, J. C., Guo, P., Marica, F., Liao, G., & Balcom, B. J. (2014). Magnetic resonance core-plug analysis with the three-magnet array unilateral magnet. *Petrophysics*, 55(3), 229–239.

- Gummerson, R. J., Hall, C., Hoff, W. D., Hawkes, R., Holland, G. N., & Moore, W. S. (1979). Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging. *Nature*, *281*(5726), 56–57. <https://doi.org/10.1038/281056a0>
- Halperin, W. P., Bhattacharja, S., & D'orazio, F. (1991). Relaxation and dynamical properties of water in partially filled porous materials using NMR techniques. *Magnetic Resonance Imaging*, *9*, 733–737.
- Halperin, W. P., Jehng, J. Y., & Song, Y. Q. (1994). Application of spin-spin relaxation to measurement of surface area and pore size distributions in a hydrating cement paste. *Magnetic Resonance Imaging*, *12*(2), 169–173. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(94\)91509-1](https://doi.org/10.1016/0730-725X(94)91509-1)
- Halse, M., Goodyear, D. J., MacMillan, B., Szomolanyi, P., Matheson, D., & Balcom, B. J. (2003). Centric scan SPRITE magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance*, *165*(2), 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2003.08.004>
- Kaufmann, J., & Studer, W. (1995). One-dimensional water transport in covercrete-application of non-destructive methods. *Materials and Structures*, *28*(2), 115–124. <https://doi.org/10.1007/BF02473185>
- Manz, B., Coy, A., Dykstra, R., Eccles, C. D., Hunter, M. W., Parkinson, B. J., & Callaghan, P. T. (2006). A mobile one-sided NMR sensor with a homogeneous magnetic field: the NMR-MOLE. *Journal of Magnetic Resonance*, *183*(1), 25–31.
- Marko, A., Wolter, B., & Arnold, W. (2007). Application of a portable nuclear magnetic resonance surface probe to porous media. *Journal of Magnetic Resonance*, *185*(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2006.10.009>
- Meiboom, S., & Gill, D. (1958). Modified Spin-Echo Method for Measuring Nuclear Relaxation Times. *Review of Scientific Instruments*, *29*(8), 688–91.
- Muller, A. C. A. (2014). *Characterization of porosity & C-S-H in cement pastes by 1H NMR* (Vol. 6339). (Tesis de Doctorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.
- Nagel, S. M., Strangfeld, C., & Kruschwitz, S. (2021). Application of  $^1\text{H}$  proton NMR relaxometry to building materials – A review. *Journal of Magnetic Resonance Open*, *6–7*(December 2020), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.jmro.2021.100012>
- Pel, L., Donkers, P. A. J., Kopinga, K., & Noijen, J. J. (2016).  $^1\text{H}$ ,  $^{23}\text{Na}$  and  $^{35}\text{Cl}$  Imaging in Cementitious Materials with NMR. *Applied Magnetic Resonance*. <https://doi.org/10.1007/s00723-015-0752-6>
- Perlo, J., Casanova, F., & Blümich, B. (2005). Profiles with microscopic resolution by single-sided NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, *176*(1), 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2005.05.017>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, *15*(7), 1–25. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- Weishaupt, D., Kochli, V. D., & Marincek, B. (2008). *How Does MRI work?* (Second). Springer Berlin Heidelberg. [papers3://publication/uuid/F2EC282D-FF52-4C88-8720-3E66239857DE](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77222-2)



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-738-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. PC – 65 – 71



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Módulo de elasticidad dinámico en rocas obtenido mediante la velocidad de pulso ultrasónico y la densidad

M. A. Navarrete-Seras<sup>1,2\*</sup>, E. M. Alonso-Guzmán<sup>1,2</sup>, W. Martínez-Molina<sup>1,2</sup>, H. L. Chávez-García<sup>1,2</sup>, M. Arreola-Sanchez<sup>2</sup>, J. A. Borrego-Perez<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [mnavarrete@umich.mx](mailto:mnavarrete@umich.mx)

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Básicas y matemáticas, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>2</sup>Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040

### RESUMEN

El módulo de elasticidad de las rocas es una parte importante para estimar el comportamiento de las rocas en la construcción o su desempeño como agregado pétreo en mezclas asfálticas y de concreto hidráulico. Las rocas estudiadas fueron obtenidas de diferentes canteras de la región Morelia, Michoacán. El modelo matemático desarrollado se obtuvo con datos de pruebas realizadas en el laboratorio tales como velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y densidad, que permite clasificar el material utilizado en la zona de acuerdo a sus características físico-mecánicas. El módulo de elasticidad dinámico es un parámetro que se puede obtener con el equipo de velocidad de pulso ultrasónico, lo cual trae ventajas debido a que es una prueba no destructiva, que permite utilizar la misma muestra para realizar otros ensayos. Por lo tanto, se obtuvieron modelos matemáticos que permiten estimar el módulo de elasticidad dinámico para las canteras de la región en estudio con coeficientes de determinación  $R^2$  bastante aceptables, a la par se compararon los resultados obtenidos en muestras cilíndricas y cúbicas.

**Palabras clave:** rocas; modelo; pruebas no destructivas; módulo de elasticidad dinámico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales, las rocas de construcción naturales se han considerado una parte valiosa y esencial de la industria de la construcción. Las construcciones y monumentos que se han creado son testimonio de extraordinarios logros técnicos y artísticos (Siegesmund and Sneathlage, 2011). El módulo de elasticidad de la mampostería es uno de los principales parámetros utilizados tanto en la evaluación de las estructuras existentes como en el diseño de nuevas. La práctica actual en la determinación del módulo de elasticidad de este tipo de material estructural presenta importantes incertidumbres, que a su vez afectan considerablemente los resultados del análisis estructural (Gonen and Soyoz, 2021).

Existen varias investigaciones que determinan el módulo de elasticidad estático y dinámico de diferentes rocas empleadas en la construcción tal como se menciona a continuación:

Teymen (2021) determinó que la prueba  $V_p$  se incluye en casi todas las ecuaciones de regresión múltiple (MR) desarrolladas para el módulo de elasticidad realizadas en su investigación, ya que el módulo de elasticidad dinámico se puede calcular a partir de las mediciones de la velocidad de las ondas P y S (Teymen, 2021). Villacreses et al. (2021) desarrollaron un nuevo dispositivo para medir el módulo de Young en geomateriales, el cual basa su funcionamiento en la propagación de ondas solitarias no lineales a lo largo de una cadena llena de esferas (Villacreses *et al.*, 2021). Makoond (2020) proporciono una expresión empírica para estimar el módulo de elasticidad estático de los componentes de la mampostería de ladrillo a partir de su contraparte dinámica (Makoond *et al.*, 2020). Hussain (2020) estudiaron las relaciones entre Young módulo (estático ( $E_s$ ) y dinámico ( $E_d$ )) generado a partir de la prueba triaxial y su forma reducida ( $E^*$ ) derivada de la medición del martillo de impulso (Hussain *et al.*, 2020).

En este trabajo de investigación, se estudiaron canteras de roca de la región Morelia, Michoacán, México (Figura 1). Se obtuvieron modelos matemáticos que permiten predecir el módulo de elasticidad dinámico a partir de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y la densidad. Además de comparar la diferencia del módulo de elasticidad dinámico en muestras con forma cilíndrica (Figura 2) y cubica, con un coeficiente de correlación aceptable.



Figura 1. Cantera el Colegio (material triturado).



Figura 2. Muestras con forma cilíndrica.

## 2. PROCEDIMIENTO

Las muestras se obtuvieron de diferentes canteras de la región Morelia, las cuales se llevaron al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la UMSNH. Se labraron cubos de 5cmx5cmx5cm y se obtuvieron núcleos de roca (Figura 3), a estas muestras se le aplicó la prueba no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y se obtuvo la densidad.

h



Figura 3. Extractora de núcleos de roca.

## 2.1. Densidad

Este método cubre la determinación de la densidad media de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir el volumen de vacíos entre las partículas). Dependiendo del procedimiento la densidad ( $\text{kg/m}^3$  o  $\text{lb/ft}^3$ ) se expresa como secado al horno (OD), superficie saturada seca (SSD), o como densidad aparente (Navarro, Martínez and Espinoza, 2011; D18.12, 2015).

## 2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Las mediciones ultrasónicas han ido ganando importancia como herramientas no destructivas para evaluar daños estructurales en edificios históricos y obras de arte. En estos métodos, las mediciones de la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) se correlacionan con la porosidad (Siegesmund and Sneathlage, 2011).

Las propiedades elásticas de un material sólido y las velocidades sísmicas o acústicas están totalmente determinadas por las constantes elásticas (rigidez). En el caso de un esfuerzo unidimensional,  $\epsilon$  es proporcional  $\sigma$  a través del módulo de elasticidad o módulo de Young  $E$ , descrito por la ley de Hooke (1).

$$\sigma = \epsilon E \quad (1)$$

Esta relación lineal solo es válida para deformaciones pequeñas y reversibles y siempre que el material esté por debajo de una tensión específica (Siegesmund and Sneathlage, 2011).

En esta investigación se utilizó una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS. Además, se aplicó la norma ASTM D2845-08 y el módulo de elasticidad fue obtenido por la ecuación (2) sugerida por la misma norma (D18.12, 2008).

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2),$$

donde  $E$  es igual módulo de elasticidad dinámico,  $V_p$  es velocidad de onda primaria y  $V_s$  es velocidad de onda secundaria, esta última es determinada como  $V_s = \frac{2}{3}V_p$  (González-De-Vallejo and Ferrer, 2011).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Una vez realizadas las pruebas mencionadas con anterioridad se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 1, se puede observar que los módulos de elasticidad dinámicos son menores para las rocas volcánicas provenientes de canteras de material pétreo (Cerritos, Huiramba, Joyitas, Comanja, Cuenembo, Tigre, Mascutan, y el Melon): muestras cilíndricas  $77676.93874 \text{ kg/cm}^2$  y muestras cubicas  $94674.03756 \text{ kg/cm}^2$ . En el caso de las rocas provenientes de canteras de material pétreo triturado (AGC Y El Colegio): muestras cilíndricas  $489195.8259 \text{ kg/cm}^2$  y muestras cubicas  $523484.4068 \text{ kg/cm}^2$ .

Tabla 1. Resultados del módulo de elasticidad dinámico realizado en muestras de roca con forma cilíndrica y cubica.

Nombre	<i>Ed</i> cilindros kg/cm <sup>2</sup>	<i>Ed</i> cubos kg/cm <sup>2</sup>
Cerritos (C)	148177.4	136994.7
Huiramba (H)	68388.2	70389.1
Joyitas (J)	48025.9	68111.1
Comanja (CO)	116397.9	135309.8
Cuenembo (CU)	101238.1	78437.4
Tigre (T)	86063.8	73373.3
Mascutan (K)	25127.3	38927.6
Melon (M)	27996.8	155849.2
AGC (G)	398720.7	484513.9
El Colegio (S)	579670.9	562454.9

Se realizó una correlación lineal entre los módulos de elasticidad dinámico de muestras con forma cilíndrica y forma cubica (Figura 4), dicha correlación lineal tiene un R<sup>2</sup> aceptable ya que valores cercanos a 1 indica que hay una buena correlación entre los datos (Garza-Ulloa, 2018).

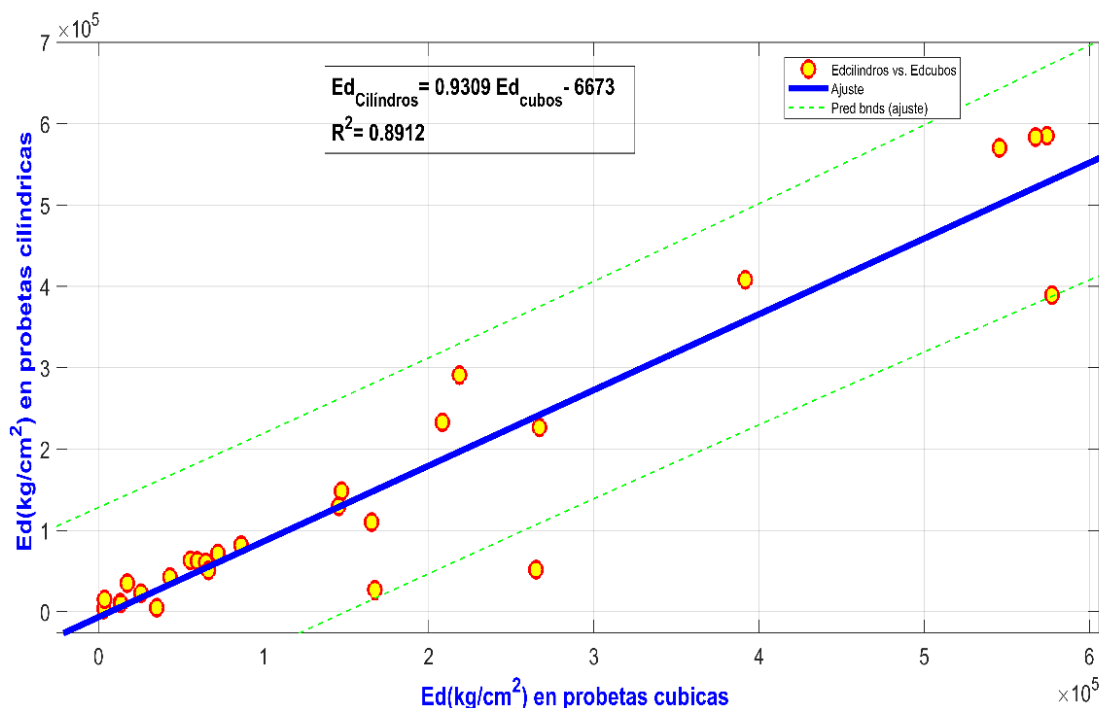


Figura 4. Correlación lineal del módulo de elasticidad dinámico.

En cuanto a la densidad de las rocas, se correlaciono con la velocidad de pulso ultrasónico obtenida con la ecuación de la norma ASTM D2845-08 y las ondas *V<sub>p</sub>*.



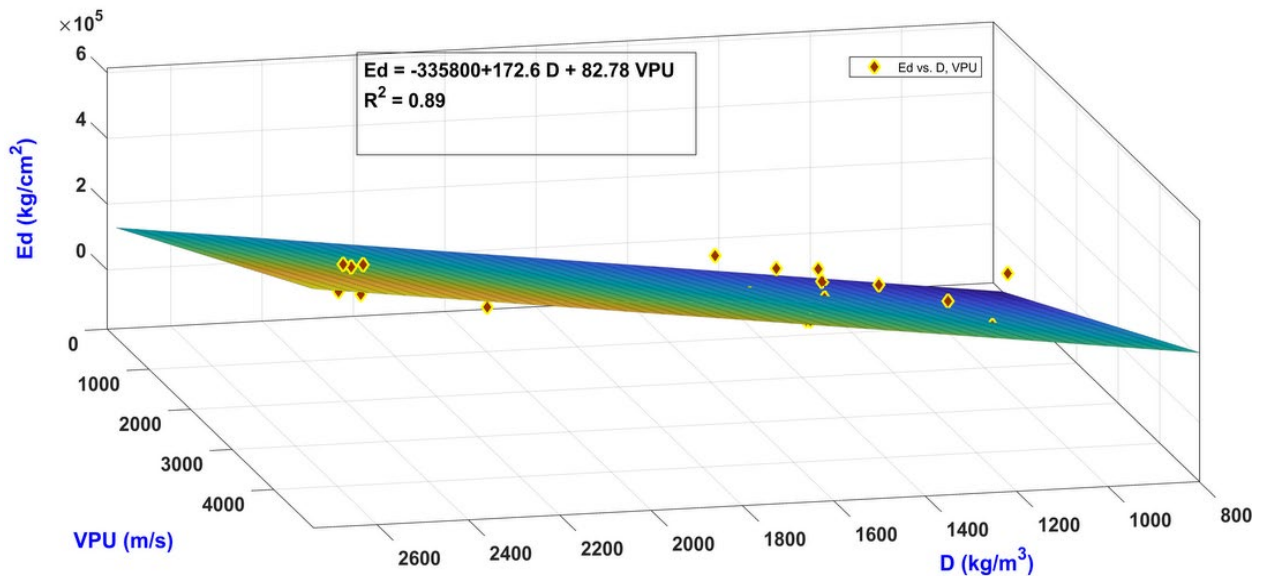


Figura 5. Modelo matemático de regresión lineal múltiple.

En la regresión lineal múltiple de la Figura 5 se utilizaron más de una variable explicativa, lo cual permite tener más variables en el modelo y por lo tanto se vuelve más preciso. El coeficiente de determinación  $R^2$  es aceptable lo que indica que dichas variables se correlacionan entre sí, el modelo permite estimar el módulo de elasticidad dinámico en muestras cilíndricas.

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos son mayores en las muestras con forma cubica, sin embargo, el modelo matemático nos indica que hay una buena correlación entre los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos en muestras cubicas y cilíndricas con un coeficiente de determinación  $R^2$  igual 0.89.

Además, también se observa en la regresión lineal múltiple y el modelo matemático obtenido que la densidad está directamente relacionada con la velocidad de pulso ultrasónico. Por lo tanto, las rocas provenientes de materiales pétreos volcánicos tienen menores módulos de elasticidad dinámicos comparados con las rocas provenientes de canteras de materiales pétreos triturados, ya que el coeficiente de determinación también es aceptable.

La presente investigación permite clasificar el material pétreo empleado en la región Morelia. Se seguirá obteniendo más parámetros y obtener más modelos matemáticos que nos permitan inferir su comportamiento dentro de los elementos estructurales.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al patrocinador de: Proyectos CIC en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH; CONACYT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Proyecto 321260: Desarrollo de un modelo de producción social replicable de vivienda y hábitat; SEP-Prodep; Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

## 6. REFERENCIAS

- D18.12, A. S. (2008) *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (Withdrawn 2017)*.
- D18.12, A. S. (2015) *Standard Test Method for Laboratory Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C127-04*. American Society for Testing Materials (ASTM).
- Garza-Ulloa, J. (2018) ‘Methods to develop mathematical models: traditional statistical analysis’, in *Applied Biomechatronics using Mathematical Models*. Elsevier, pp. 239–371. doi: [10.1016/B978-0-12-812594-6.00005-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812594-6.00005-6).
- Gonen, S. and Soyoz, S. (2021) ‘Investigations on the elasticity modulus of stone masonry’, *Structures*, 30, pp. 378–389. doi: [10.1016/j.istruc.2021.01.035](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.035).
- González-De-Vallejo, L.-I. and Ferrer, M. (2011) *Geological Engineering*. CRC Press/Balkema.
- Hussain, M. et al. (2020) ‘Unconventional rocks elastic properties profile and geomechanical characterization’, *Marine and Petroleum Geology*, 122, p. 104670. doi: [10.1016/j.marpetgeo.2020.104670](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104670).
- Makoond, N. et al. (2020) ‘Relationship between the static and dynamic elastic modulus of brick masonry constituents’, *Construction and Building Materials*, 259, p. 120386. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120386](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120386).
- Navarro, L., Martínez, W. and Espinoza, A. (2011) *ANÁLISIS DE MATERIALES, Manual de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales*. Edited by FIC-UMSNH.
- Siegesmund, S. and Snelthage, R. (2011) *Stone in Architecture Properties, Durability*. Fourth. Edited by Springer. Springer. doi: [10.1007/978-3-642-14475-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2).
- Teymen, A. (2021) ‘Statistical models for estimating the uniaxial compressive strength and elastic modulus of rocks from different hardness test methods’, *Heliyon*, 7(5), p. e06891. doi: [10.1016/j.heliyon.2021.e06891](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06891).
- Villacreses, J. P. et al. (2021) ‘Feasibility of the use of nonlinear solitary waves for the nondestructive measurement of Young’s modulus of rocks and compacted materials’, *Transportation Geotechnics*, 26, p. 100437. doi: [10.1016/j.trgeo.2020.100437](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100437).



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-752-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. PC – 72 – 80



Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Estimación de la pérdida de masa de acero embebido en concreto de altas prestaciones expuesto a un ambiente marino natural con ciclos de congelamiento y deshielo

G. F. Gómez Luna<sup>1\*</sup>, J. G. Eпитacio Félix<sup>1</sup>, P. Castro Borges<sup>2</sup>, P. Montes García<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [ggomezl1600@alumno.ipn.mx](mailto:ggomezl1600@alumno.ipn.mx)

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional CIIDIR-Oaxaca, Calle Hornos No. 1003, Col. Nochebuena, Sta. Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, Oaxaca, México.

<sup>2</sup> Cinvestav del IPN, Unidad Mérida, Km 6, antigua carretera a Progreso, 97310, Mérida, Yucatán, México.

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la diferencia entre la pérdida de masa estimada y la pérdida de masa experimental del acero embebido en concreto de altas prestaciones expuesto a un ambiente marino natural con ciclos de congelamiento y deshielo durante siete años. La actividad corrosiva se monitoreo anualmente mediante la técnica de resistencia a la polarización lineal. Al finalizar el periodo de exposición, se extrajeron las varillas y se evaluó la pérdida de masa experimental por diferencia de pesos. La pérdida de masa estimada se calculó con base en las lecturas de densidades de corrosión empleando la ecuación de la Ley de Faraday. Los resultados indican que la pérdida de masa estimada no difiere significativamente de la pérdida de masa experimental, pero la correlación entre ambas es moderada.

**Palabras clave:** ambiente natural; corrosión; resistencia a la polarización lineal; pérdida de masa; Ley de Faraday.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado (CR) es el material más empleado en la industria de la construcción a nivel mundial, ya que reúne propiedades que ningún otro material confiere; entre ellas resistencia, flexibilidad, costo relativamente bajo y durabilidad en determinados ambientes. Sin embargo, en ambientes agresivos, por ejemplo, ambientes marinos con alto contenido de cloruros, la durabilidad del CR disminuye debido a la corrosión del acero de refuerzo.

La corrosión es un fenómeno complejo que afecta a los materiales y puede ocasionar la pérdida de su funcionalidad y altos costos de mantenimiento, reparación o reemplazo de dichos materiales. Debido a su complejidad, los métodos han sido poco efectivos para la prevención y control de la corrosión; muestra de ellos son los desorbitantes costos globales de corrosión. Es decir, los costos de la corrosión son comparables con el 2 % al 4 % del PIB mundial (Jacobson, 2016). De acuerdo con la Figura 1, una de las primeras evaluaciones documentadas indica que el costo anual global de la corrosión (CGC) fue de 70 billones USD (Mehta, 1975), mientras que recientemente, en el año 2016, se estimó en 2,500 billones USD (Koch et al., 2016), lo que resulta alarmante para el mundo entero.

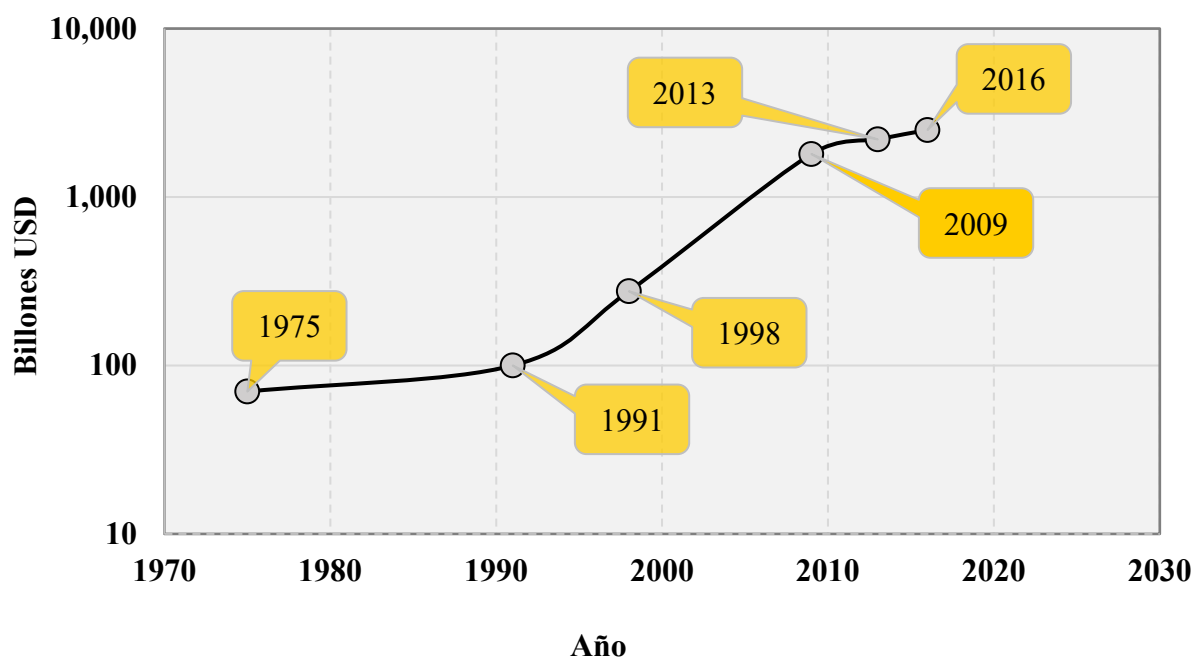


Figura 1. Costos globales de la corrosión (Koch et al., 2016)

Por otro lado, la corrosión del acero de refuerzo en CR tiene un alto impacto ambiental debido a que las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la industria de la construcción generan entre el 40 % y el 50% de los gases de efecto invernadero, siendo la fabricación del acero y del cemento las que más contaminan en este rubro (García et al., 2014). En lo que se refiere a la durabilidad de las estructuras, la corrosión disminuye el área transversal del acero de refuerzo, lo cual afecta las propiedades del elemento estructural. La pérdida de sección transversal del acero causa la pérdida de ductilidad de los elementos estructurales, por lo tanto, las estructuras pueden presentar una falla de tipo frágil, incluso con las mismas cargas para las que fue diseñado o ante eventos inesperados como los sismos.

Con base en lo anterior, el entendimiento de los mecanismos involucrados en el fenómeno de la corrosión y su cuantificación son desafíos para los especialistas en el área. Diversos métodos de prevención se han propuesto sin que a la fecha se tenga el problema resuelto, la mayoría de los métodos de prevención funcionan solo bajo ciertas condiciones y la combinación de dos o más

métodos podría mejorar el desempeño de los materiales en condiciones ambientales adversas; sin embargo, a la fecha el problema continúa latente.

Para evaluar la efectividad de las técnicas de prevención se emplean métodos de cuantificación de la corrosión que pueden ser destructivos o no destructivos, siendo estos últimos prácticos y económicos; no obstante, son los que generan mayor incertidumbre debido a que su confiabilidad está limitada por la gran cantidad de variables que intervienen en la corrosión del CR.

La pérdida de masa (PM) del acero de refuerzo obtenida de manera destructiva por diferencia de pesos es uno de los parámetros más significativos para evaluar la corrosión, debido a que es la evidencia física del daño. No obstante, al destruir el espécimen se imposibilita su monitoreo sobre el tiempo. Es por ello que la estimación de la PM en estructuras en servicio de manera destructiva no es una opción. En cambio, las técnicas no destructivas de monitoreo de la corrosión, por ejemplo, la de resistencia a la polarización lineal (RPL), se emplea exitosamente sin destruir el elemento obteniendo como resultado la densidad de corrosión del acero de refuerzo ( $i_{\text{corr}}$ ). Además, con los resultados de  $i_{\text{corr}}$  se puede estimar la PM estimada a través de la ecuación de la Ley de Faraday, ya que la PM es directamente proporcional a la cantidad de corriente que circula en el sistema. No obstante, se ha reportado que el número de variables que intervienen en la experimentación afecta el cálculo de la PM estimada, algunos resultados han demostrado que la PM estimada es 18 % superior a la PM experimental (Feng et al., 2021).

Con base en lo anterior, es necesario evaluar la confiabilidad de la PM estimada a través de la ecuación de la Ley de Faraday en elementos de CR expuestos a deterioro por corrosión en ambientes naturales a largo plazo, especialmente cuando estos elementos experimentan congelamiento y deshielo. Por cual, se evaluó la diferencia entre la PM estimada y la PM experimental de varillas expuestas a deterioro por corrosión en un ambiente marino natural durante siete años.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.2.1 Obtención de los datos

De un estudio previo (López, 2012) se obtuvieron 27 PM experimentales donde cada PM corresponde al promedio de dos varillas de 15 mm de diámetro embebidas en un espécimen de concreto de altas prestaciones. Los 27 especímenes fueron elaborados con diferentes mezclas, el diseño de las mezclas consideró tres relaciones agua material cementante, 0.29, 0.37 y 0.45, la sustitución parcial del cemento por ceniza volante, 20% y 40%, y la adición de nitrito de calcio como inhibidor de la corrosión, 12.5 L/m<sup>3</sup> y 25 L/m<sup>3</sup> (detalles de la mezcla en Montes et al., 2004). Los especímenes estuvieron expuestos a un ambiente marino natural con ciclos de congelamiento y deshielo (Tabla 1), en la Bahía de Maine, EUA (Figura 2), por un periodo de siete años. La actividad corrosiva del acero de refuerzo se monitoreó anualmente durante el verano mediante el método de RPL; y el equipo utilizado para este propósito fue un potenciostato CMS 105 de GAMRY Instruments Inc. La prueba de RPL se realizó con base en la norma ASTM G59, y el valor de la densidad de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) de cada varilla se estimó utilizando el software Echem Analyst®.

Tabla 1. Ciclos de congelamiento y deshielo  
(Government of Canada, 2022 y Transportation Module Context 2022)

Año de exposición	Ciclos de congelamiento y deshielo
1	79
2	92
3	60
4	79
5	64
6	100
7	73



Figura 2. Exposición de los especímenes de concreto reforzado en el ambiente marino natural en la Bahía de Maine, EUA

### 2.2.2 Pérdida de masa experimental

Al concluir el periodo de exposición los especímenes se retiraron del ambiente marino natural y se llevaron al laboratorio de ingeniería de la Universidad de New Brunswick, Canadá, donde se extrajeron cuidadosamente las varillas utilizando una cortadora de concreto. Las varillas se limpiaron mecánicamente para retirar el concreto adherido, y para eliminar los productos de corrosión se sumergieron por 30 minutos en una solución de cloruro de hidrógeno (HCl), que contenía 0.5% de  $\text{SnCl}_2$  y 0.2% de  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , de acuerdo con la norma ASTM G1-03 (Figura 3). Posteriormente, las varillas se pesaron y se obtuvo PM experimental restando el peso de las varillas obtenido antes que se expusieran al ambiente natural del peso de las varillas expuestas.



Figura 3. Limpieza de las varillas en HCl

### 2.2.3 Pérdida de masa estimada

Para la obtención de la PM estimada, en primer lugar, se calculó la corrosión total (CT) de cada varilla con base en las lecturas de  $i_{corr}$  registradas durante el periodo de exposición, de acuerdo con la norma ASTM G109. En segundo lugar, se empleó la ecuación de la Ley de Faraday (1):

$$PM = \frac{CT \cdot M}{n \cdot F} \quad (1)$$

Donde: PM = pérdida de masa (gr), CTI = corrosión total integrada (Coulombs), M = peso atómico del hierro (55.845 gr/mol), n = número de electrones transferidos del hierro y F = constante de Faraday (96500 Coulombs/mol). Dicha ecuación se basa en la intensidad de corriente que fluye en el acero durante el proceso de corrosión y no en las variables que la afectan, por lo tanto, su aplicación es válida tanto en ambientes naturales como en ambientes simulados.

En virtud de que los especímenes estuvieron expuestos a ciclos de congelamiento en el invierno y deshielo en el verano, se consideró el valor de n en la ecuación 1 igual con 2 durante el invierno y n igual con 3 durante el verano, ya que en densidades de corriente altas que ocurren durante el verano el ánodo libera predominantemente  $Fe^{3+}$ , o ambos  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  (Nossoni and Harichandran, 2012). Para evaluar la diferencia estadísticamente significativa entre la PM experimental y la PM estimada se empleó el software estadístico SPSS®, mediante la prueba t de Student. Finalmente, para evaluar la relación entre ambas PM se correlacionaron la PM estimada y la PM experimental. Los resultados derivados de la aplicación de la metodología descrita previamente se presentan a continuación.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se presentan las  $i_{corr}$  de las varillas extraídas de los especímenes de concreto, se observa que la condición de corrosión de la mayoría fue de baja a moderada. Aproximadamente el 26 % de las varillas presentaron corrosión alta; sin embargo, en algunos casos no fue posible obtener las  $i_{corr}$  en los últimos años, debido al deterioro de los conectores de las varillas.

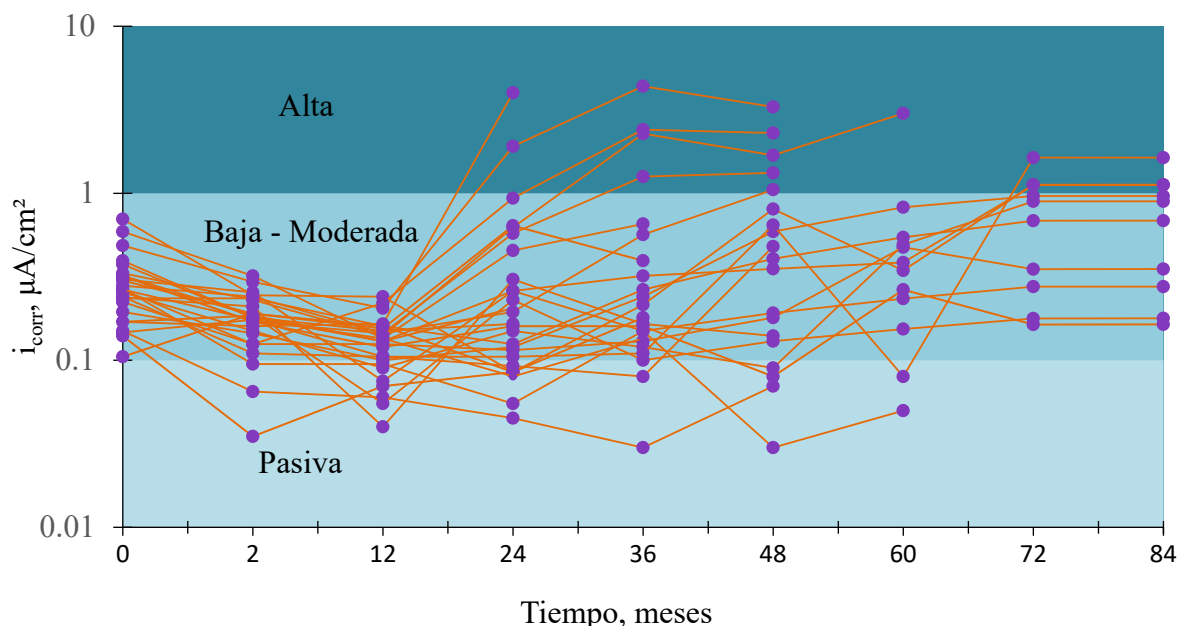


Figura 4.  $i_{corr}$  de las varillas expuestas en el ambiente natural por siete años

Con base en los resultados de  $i_{corr}$  se estimó la PM estimada, la cual se muestra en la Figura 5, donde se observa que no hubo diferencia significativa ( $p = 0.443$ ) entre la PM experimental y la PM estimada; estos resultados se deben principalmente a las condiciones de corrosión de baja-moderada y pasiva que predominaron en los resultados de  $i_{corr}$  descritos previamente. Adicionalmente, es importante mencionar que los valores de las PMs de las varillas fueron bajos, puesto que variaron entre 1 y 2 %.

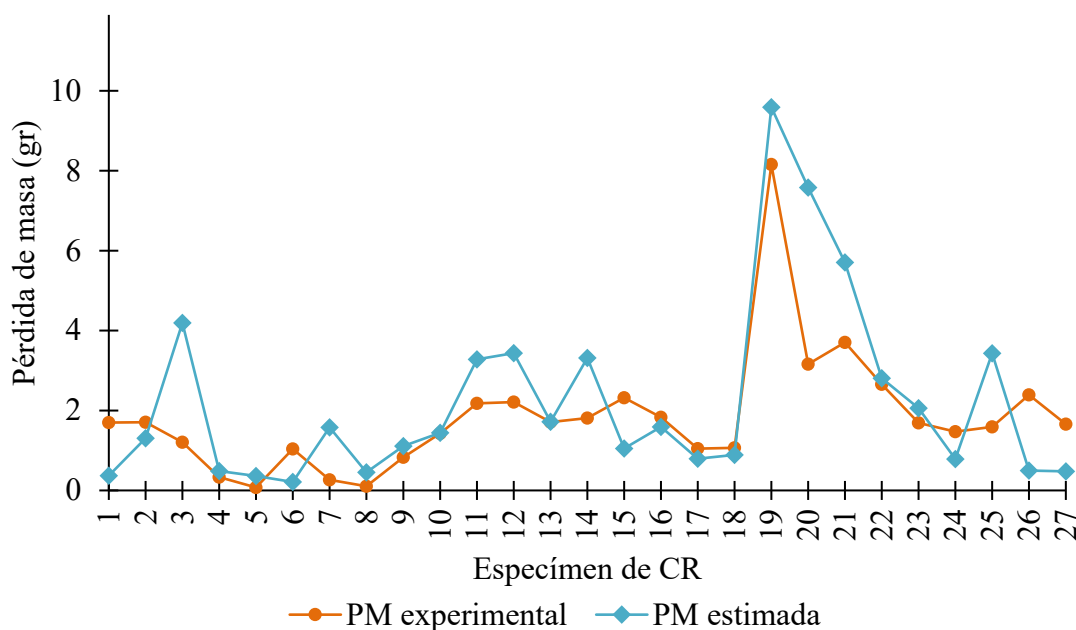


Figura 5. Resultados de la PM experimental y la PM estimada



La Figura 6 muestra la correlación entre la PM estimada y la PM experimental en la cual se observa que solo el 65.94 % de la PM experimental se puede predecir a partir de las  $i_{corr}$ . Esto se puede deber a que los especímenes evaluados estuvieron expuestos en un ambiente marino natural con ciclos de congelamiento y deshielo y solo se tomó una lectura anual de  $i_{corr}$ , la cual no representa la actividad corrosiva de las varillas durante todo el año. En el invierno la temperatura está por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$  y, por lo tanto, la actividad corrosiva disminuye debido al congelamiento de la solución de poro del concreto, mientras que en verano la temperatura incrementa, la solución de poro se descongela y la corrosión se reactiva.

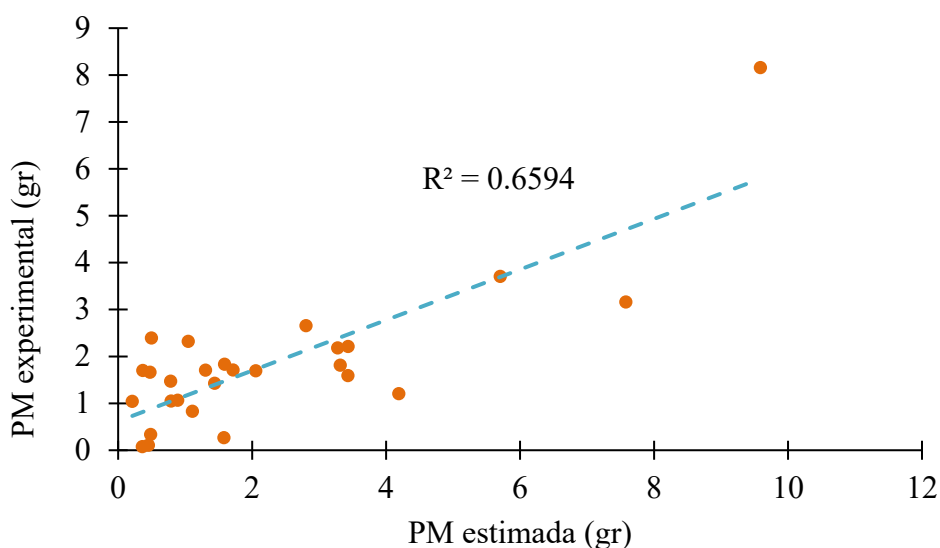


Figura 6. Correlación entre la PM experimental y la PM estimada

Franco et al., 2022, reportó que la  $i_{corr}$  es confiable para predecir la pérdida de masa del acero de refuerzo en laboratorio, siempre y cuando se tomen lecturas en periodos cortos que reflejen la condición del ambiente; sin embargo, Feng et al., 2021 y Dixit and Gupta 2021, reportaron que en ambientes controlados acelerados donde la corrosión es alta, la PM estimada suele sobreestimarse y los resultados difieren considerablemente de la PM experimental. Por otra parte, Paul et al., 2017, observaron en un ambiente controlado acelerado que la PM estimada es superior a la PM experimental, pero al establecer la relación entre la PM estimada y la PM experimental encontró una relación lineal ( $R^2 = 0.9466$ ) entre ambas PM,

Los resultados de la presente investigación demuestran que en niveles de corrosión pasivo y bajo-moderado la PM estimada no se sobreestima. Sin embargo, las variables como la humedad ambiental, la temperatura, la presión, los agentes agresivos, etc., que no se pueden controlar en un ambiente natural, afectan la correlación entre la PM estimada y la PM experimental. Estos resultados sugieren que en ambientes naturales debe haber mayor corrosión para poder evaluar y conocer las verdaderas diferencias entre la PM experimental y la PM estimada; por lo tanto, se requieren más estudios a largo plazo en ambientes naturales, ya que la mayoría de los trabajos se llevan a cabo en condiciones de laboratorio.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- La pérdida de masa estimada calculada a través de la ecuación de la Ley de Faraday no difiere significativamente de la pérdida de masa experimental, en varillas embebidas en concreto expuesto en un ambiente natural con ciclos de congelamiento y deshielo, cuando los niveles de corrosión son bajos.
- Bajo las condiciones estudiadas, el 65.94 % de la pérdida de masa experimental se puede predecir a partir de la pérdida de masa estimada por la ecuación de la Ley de Faraday.
- Las lecturas anuales de densidades de corrosión no reflejan la actividad corrosiva de las varillas durante todo el año, por lo tanto, la pérdida de masa estimada debe tomarse con reserva; sin embargo, se propone manipular el valor de  $n$  (número de electrones transferidos) entre 2 y 3 en la ecuación de la Ley de Faraday, en función de la variación de la temperatura ambiental, para que la PM estimada represente mejor las condiciones de exposición reales.

### Recomendaciones

- Para estimar la pérdida de masa estimada en ambientes naturales empleando la ecuación de la Ley de Faraday, se recomienda emplear concretos de menor calidad o exponer los especímenes por más tiempo, con el objetivo de que haya mayor corrosión y pérdida de masa que evaluar, además de monitorear la actividad corrosiva en periodos que reflejen las condiciones ambientales reales.
- La precisión de la PM estimada, calculada con la ecuación de la ley de Faraday, se afecta por el número de variables que intervienen en el proceso de deterioro, por lo cual, se sugiere considerar todas las variables posibles; por ejemplo, la humedad ambiental, la presión, la temperatura, los agentes agresivos (cloruros, sulfatos, CO<sub>2</sub>, etc.) y el viento, entre otros.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CIIDIR Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional y a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de New Brunswick por todas las facilidades para desarrollar la investigación. G.F. Gómez-Luna agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca nacional de manutención en el programa doctoral que cursa.

## 6. REFERENCIAS

- ASTM International. (2020). G59-97 [Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements](#)
- ASTM International. (2017). G1-03 [Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens](#)
- ASTM International. (2022). G109 [Standard Test Methods for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments](#)
- Dixit, M., Gupta, A.K. (2021). Assessment of Corrosion in Rebars by Impressed Current Technique. In: Kumar Shukla, S., Raman, S.N., Bhattacharjee, B., Bhattacharjee, J. (eds) Advances in Geotechnics and Structural Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 143. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6>

- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2022). Effect of Cl<sup>-</sup>-induced corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel embedded in ternary concretes containing FA and UtSCBA. *Construction and Building Materials*, 339, 127655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127655>
- Feng, W., Tarakbay, A., Memon, S. A., Tang, W., & Cui, H. (2021). Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review. *Construction and Building Materials*, 289, 123165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123165>
- Fontana, M., (1986). Corrosion engineering (Third edition, pp 167). USA: McGraw-Hill.
- García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. *Int J Life Cycle Assess.*19:3–12. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0614-0>
- Jacobson, G. A. (2016). NACE International's IMPACT Study Breaks New Ground in Corrosion Management Research and Practice. *The Bridge*, 46(2). <https://www.nae.edu/Publications/Bridge/155266/155346.aspx>
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. *NACE international*, 216, 2-3.
- López, H.Z., (2012). Evaluation of Corrosion in Cracked High Performance Concrete Exposed to a Natural Chloride Environment (pp. 227-239). Canada: University of New Brunswick.
- Mehta, P. K. (1975, October). Evaluation of sulfate-resisting cements by a new test method. In *Journal Proceedings* (Vol. 72, No. 10, pp. 573-575).
- Montes, P., Bremner, T. W., & Lister, D. H. (2004). Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 243-253. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00043-X)
- Nossoni, G., & Harichandran, R. (2012). Current efficiency in accelerated corrosion testing of concrete. *Corrosion*, 68(9), 801-809. <https://doi.org/10.5006/0428>
- Paul, S. C., Babafemi, A. J., Conradie, K., & van Zijl, G. P. A. G. (2017). Applied voltage on corrosion mass loss and cracking behavior of steel-reinforced SHCC and mortar specimens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 1-9. DOI: 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0001807.
- Government of Canada Station Results -Historical Data. Disponible en: [https://climate.weather.gc.ca/historical\\_data/search\\_historic\\_data\\_stations\\_e.html?searchType=stnProv&timeframe=1&lstProvince=NB&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2017&Year=2017&Month=5&Day=29&selRowPerPage=25&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0](https://climate.weather.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_e.html?searchType=stnProv&timeframe=1&lstProvince=NB&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2017&Year=2017&Month=5&Day=29&selRowPerPage=25&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0) , [Consultado por última vez el 18 de septiembre de 2022]
- Transportation Module Context. Temperature: Freeze-Thaw Cycles. Disponible en: <https://climatedata.ca/explore/sector/transportation/transportation-module-context/> [Consultado por última vez el 18 de septiembre de 2022]



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-780-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. PC – 81 – 91



Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Corrosión de acero de refuerzo en mezclas con agregado de concreto reciclado y cenizas puzolánicas

C. Bernabé Reyes<sup>1\*</sup>, J. M. Ponce Ortega<sup>1</sup>, A. Torres Acosta<sup>2</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>3</sup>, W. Martínez Molina<sup>3</sup>

\*Autor de Contacto: [cipriano.bernabe@umich.mx](mailto:cipriano.bernabe@umich.mx)

<sup>1</sup> Posgrado de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro, Querétaro, México.

<sup>3</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

### RESUMEN

Incluir materiales alternativos en las mezclas de concreto posibilita tomar parte de la responsabilidad en el cuidado del medio ambiente. En el presente estudio se elaboraron mezclas de concreto con relación a/c=0.45, con sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña (SCBA, 10%) y sustitución de grava por concreto de agregado reciclado (RCA 50%). Se caracterizó la SCBA por medio de análisis SEM. Se empleó arena volcánica y cemento CPC 30R RS. Las barras de acero embebidas fueron grado 42 de 3/8” de diámetro. El concreto en estado endurecido se caracterizó mediante pruebas destructivas y no destructivas. Se midieron los potenciales de corrosión en el acero usando un electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>. La solución de saturación se preparó con 3.5% NaCl. La velocidad de corrosión se midió con un potencióstato usando la técnica de resistencia a la polarización lineal (Rpl). Los concretos con RCA y SCBA presentaron los valores de potenciales más negativos, lo que coincide con altas velocidades de corrosión.

**Palabras clave:** concreto hidráulico; corrosión; concreto reciclado; ceniza de bagazo de caña.

## 1. INTRODUCCIÓN

En México no se tienen estudios que indiquen el impacto del fenómeno de la corrosión en la economía del país (Orozco Cruz, 2007; Cadena Franco, Veloz Rodríguez, Reyes Cruz, Coreño Alonso, & Vázquez García, 2010; Ramírez Reyes, y otros, 2011). Hernández y Mendoza (2006), citados por Castañeda y Rodríguez en 2014, mencionan que el estimado del costo directo de los trabajos de mantenimiento y reparación de las estructuras de concreto reforzado expuestas a zonas costeras afectadas por la corrosión del acero, representa el 3.1% del producto interno bruto (PIB). Este dato corresponde a los Estados Unidos de Norteamérica desde el año 1999 al 2001 (Castañeda Valdéz & Rodríguez Rodríguez, 2014). El costo global de la corrosión se estima en 2.5 billones de dólares estadounidenses, lo que equivale al 3.4% del PIB mundial calculado para el año 2013, según lo reportado en el informe de NACE Internacional en 2016 (Koch, y otros, 2016). Otros autores estiman un valor de 3.5% como porcentaje del PIB (González Fernández & Miranda Vidales, 2007). Estudios como el realizado por Ueli en 2018, estiman que el 10% de los costos directos relacionados a la prevención, control y reparación de la corrosión corresponden a las estructuras de concreto reforzado, correspondiendo el 5% a los puentes de concreto reforzado (Angst, 2018). El concreto hidráulico es un material resistente, elaborado a partir de cemento hidráulico, que, si bien confiere propiedades de resistencia y durabilidad, en su producción se generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, aproximadamente 0.6 toneladas de CO<sub>2</sub>/ton de cemento. Esto genera gran preocupación, considerando que estas emisiones tienen repercusión en el calentamiento global asociado al efecto invernadero (Escalante, Navarro, & Gomez, 2011; Ruchansky, 2013). La producción mundial de cemento para el año 2005 fue de 2305 millones de toneladas, cifra que se incrementa a 3844 en estimaciones realizadas para el año 2030 (Akashi, Hanaoka, Matsuoka, & Kainuma, 2011). Dentro de la producción de cemento, los tres principales procesos que generan el CO<sub>2</sub> son: la descarbonatación de piedra caliza en el horno (aproximadamente 525 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de Clinker), quema de combustible en el horno (335 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento) y por uso de energía eléctrica (valores que rondan los 50 kg de CO<sub>2</sub> por ton de cemento). Estos valores representan un factor de emisión de CO<sub>2</sub> de 0.91, que incluye el transporte de cemento a la planta de mezclado (Özbay, Erdemir, & Durmus, 2016). Los productos generados en los procesos agroindustriales son objeto de estudio de diferentes disciplinas, ya que pueden representar un serio problema de contaminación, o bien, pueden ser empleados con una ventaja técnica y económica, tal es el caso de la ceniza de bagazo de caña (SCBA), la cual tiene en su composición aluminio y silicio que le confieren propiedades puzolánicas (Srinivasan & Sathiya, 2010) y puede representar una alternativa apropiada como sustituto parcial de cemento en las mezclas de concreto hidráulico (Jha, Sachan, & Singh, 2021). En el presente estudio se utilizó SCBA generada en los procesos de producción de azúcar de la región de Michoacán como sustitución del cemento en un 10%, y agregado de concreto reciclado (RCA) en sustitución del agregado grueso en un 50%.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Materiales

El cemento usado fue CPC 30 R, resistente a sulfatos como característica especial. La arena utilizada en la investigación fue cien por ciento volcánica, obtenida del banco de material “Joyitas”, ubicado en la comunidad de Joyitas, ubicado en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se usó grava natural triturada del banco de material Trickal de la ciudad de Morelia. La caracterización de los materiales pétreos se realizó por medio de las pruebas de humedad de absorción, densidad, masas volumétricas y cribado, considerando las especificaciones de la normativa mexicana. El agua de

mezclado se obtuvo de la red municipal de agua potable, la cual cumple con las características para ser utilizada en mezclas de concreto hidráulico NMX-C-122-ONNCCE-2018. La ceniza de Bagazo de Caña (CC) usada en la investigación se obtuvo del “Ingenio Pedernales” que se encuentra en la población de Pedernales, Municipio de Tacámbaro, Michoacán. La SCBA fue sometida a proceso de triturado y cribado, usando para la investigación las partículas menores a 0.149 mm, con la finalidad de aprovechar una mayor cantidad de material con una reducción de consumo de energía utilizada en el proceso de preparación. La SCBA se sustituyó por el CPC en 10%. EL RCA se sustituyó por el 50% de agregado natural triturado. Las características de los agregados se encuentran en la Figura 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de la grava natural triturada, material reciclado y arena utilizada en el estudio.

	<b>M.V.S.S</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>M.V.S.V</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Densidad</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Absorción</b> [%]	<b>T.M.</b> [plg.]	<b>M.F.</b>
<b>CCA</b>	1396	1549	2.64	1.6	1/2	---
<b>RCA</b>	1148	1280	2.16	6.0	3/4	---
<b>Arena</b>	1343	1496	2.40	3.5	---	2.7

## 2.2 Proporciones de mezclas

Las cantidades de materiales calculadas por el método del ACI para la elaboración de un metro cúbico de concreto, considerando la relación a/c igual a 0.45, y agregado RCA, se muestran en la Tabla 2. Para lograr el revenimiento se utilizó aditivo plastificante marca CRISOTÁN, utilizando 8 cc por kilogramo de cemento.

Tabla 2. Materiales por metro cúbico obtenidos del Método de Diseño de Mezclas del ACI usando Agregado de Concreto reciclado (RCA).

<b>Material</b>	<b>a/c=0.45</b>	
	<b>Vol. (l)</b>	<b>Masa (Kg)</b>
Cemento	147	456
Grava	343	741
Arena	285	684
Agua	205	205
Total	1000	2086

## 2.3 Pruebas físico-mecánicas

Se usaron especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro y 20cm de altura para las pruebas a compresión y resistividad eléctrica. La aplicación de la carga se realizó con una máquina Forney con capacidad de 150 ton, Figura 1. La carga se aplica a una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de aplicación de carga se considerará dentro del intervalo de 2.55 kgf/cm<sup>2</sup>/s ± 0.51 kgf/cm<sup>2</sup>/s (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).



Figura 1. Aplicación de carga axial en cilindros de concreto.

La resistividad eléctrica se midió usando un resistómetro marca Nilsson, como se muestra en la Figura 2. Se usaron almohadillas para garantizar el contacto de la superficie del cilindro de concreto con las placas de acero. La evaluación de la resistividad eléctrica se realizará considerando los criterios especificados por la normativa mexicana NMX-C-530 (NMX-C-530-0NNCCE, 2018).



Figura 2. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.

#### 2.4 Pruebas electroquímicas

Los prismas elaborados para las pruebas electroquímicas fueron de dimensiones de 5cmx10cmx20cm. Fueron embebidas dos barras de acero de 3/8 de pulgada de diámetro. Como electrodo de referencia se utilizó una barra de grafito de 6 mm de diámetro, como las que se muestran en la Figura 3. La distancia entre barras y electrodo fue de 1 pulgada, misma distancia que se mantuvo entre los elementos metálicos y los bordes de los especímenes.

Se preparó una solución de NaCl al 3.5% para exponer los especímenes, simulando una exposición severa por cloruros en ciclos de húmedo-secado.

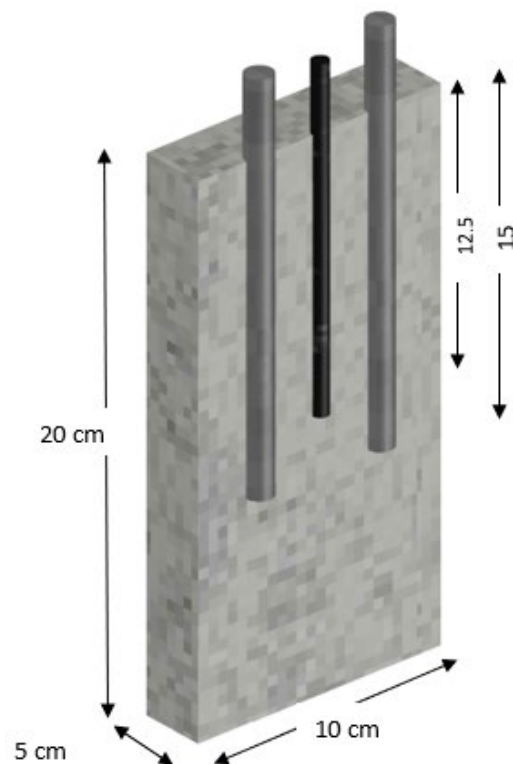


Figura 3. Esquema de la configuración de electrodos dentro de la probeta prismática de concreto, unidades en cm.

La evaluación electroquímica se realizó por medio de potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) y Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ). Los potenciales de corrosión se midieron utilizando un electrodo de media celda de  $Cu/CuSO_4$  y un multímetro de alta impedancia,  $\geq 20M\Omega$ , como se muestra en la Figura 4.

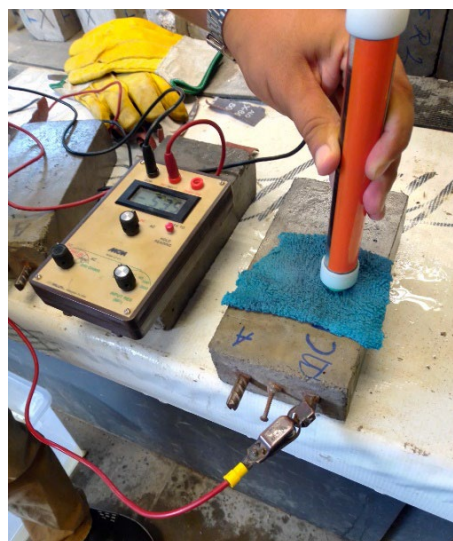


Figura 4. Configuración de la prueba de potenciales de corrosión.

Se utilizó la configuración de tres electrodos para la ejecución de la prueba de  $R_{pl}$ , siendo el electrodo de trabajo la barra de acero grado 42, electrodo de referencia la barra de grafito y el contra electrodo la barra de acero colocada de manera adjunta a la barra de grafito, tal como se muestra en la Figura 5. Se utilizó un potenciostato marca Gamry Instruments, modelo E600 con un software



de operación Versión 6.33 para medir la resistencia a la polarización lineal.

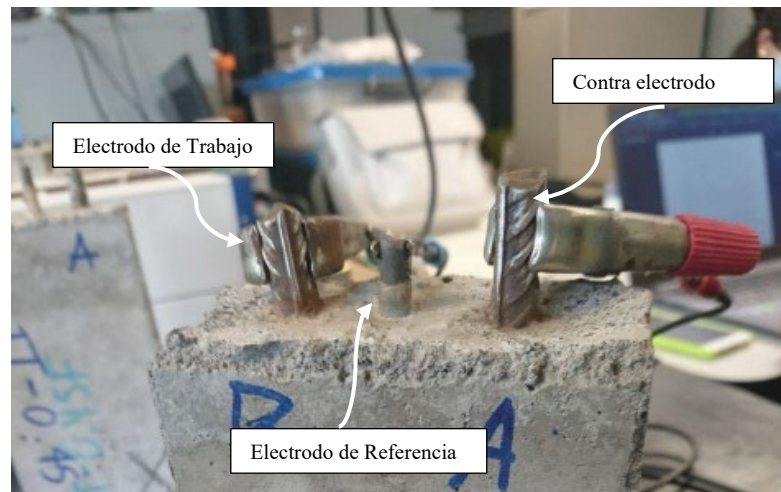


Figura 5. Configuración de las conexiones de los electrodos.

Un estudio realizado por González et al. (1995) sobre los valores de la constante B en diferentes sistemas metal-medio sugieren que las condiciones del sistema influyen en la determinación de los valores de las pendientes de Tafel ( $b_a$  y  $b_c$ ), no logrando exactitud en el método de RpI. Destacan que las capas superficiales protectoras de producto de corrosión contribuyen a la dispersión de los valores de la constante B (González, Albéniz, & Feliu, 1996).

Una vez obtenido el valor de RpI, se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) mediante las ecuaciones (1) y (2) (1957) (ASTM-G59, 2003):

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{Rp} \quad (1)$$

$$B = \frac{b_a b_c}{[2.303(b_a + b_c)]} \quad (2)$$

Donde  $i_{corr}$  es la densidad de corriente en  $\mu A/cm^2$ ; B es el factor de Stern-Geary que depende de las pendientes de Tafel: anódica ( $b_a$ ) y catódica ( $b_c$ ), en V; Rp es la resistencia a la polarización en  $ohm\text{-}cm^2$ .

De la ecuación 2,  $b_a$  y  $b_c$ , son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente (ASTM-G5, 2004).

### 3. RESULTADOS

En la Figura 6 se muestran los resultados del análisis granulométrico de la arena volcánica usada en la investigación. Se observa que la arena cumple con los límites permisibles de tamaños de partícula entre la malla ASTM No 4 y la malla ASTM No 100.

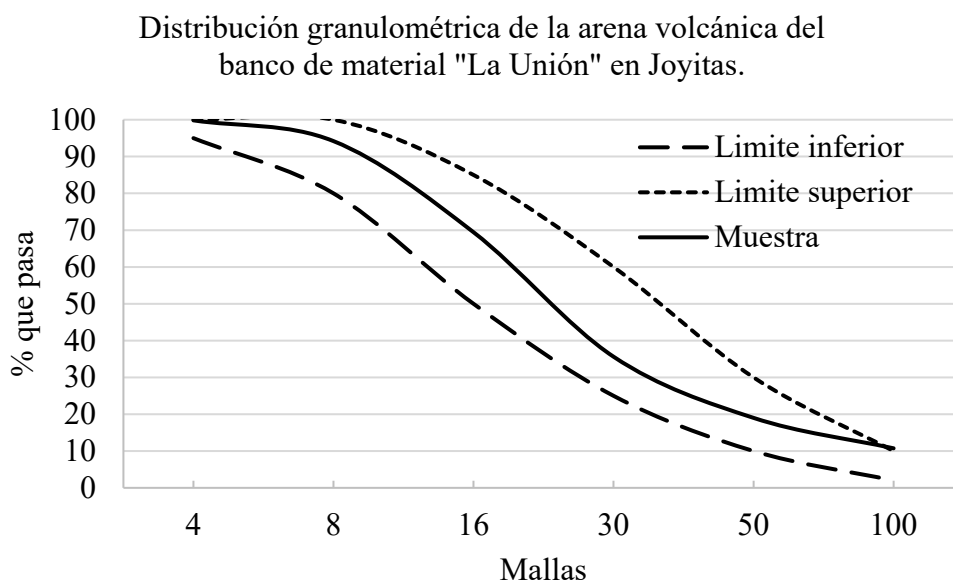


Figura 6. Curva de distribución granulométrica de la arena volcánica.

En la Figura 7 se observa una composición de grava natural triturada con una cantidad de agregado grueso superior a los límites establecidos en la normativa (NMX-C-111-ONNCCE, 2018), sobre todo los tamaños de 1/2". En cuanto a los tamaños de partícula de 3/8" se encuentran en el límite.

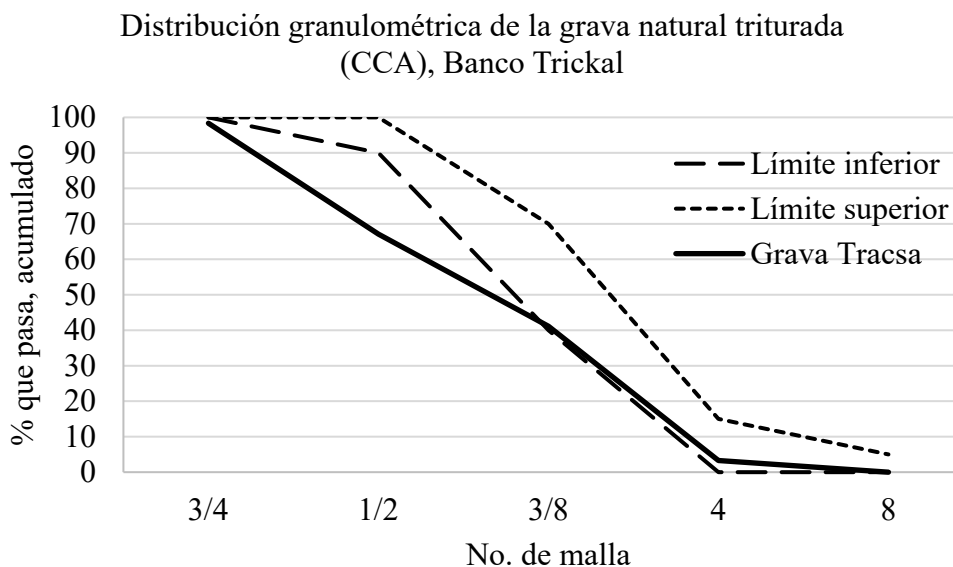


Figura 7. Curva de distribución granulométrica de la Grava natural triturada.

El agregado de concreto reciclado presentó una distribución de tamaños de partícula fuera de los límites de la normativa mexicana, sobre todo en los tamaños de 3/4" y 1/2", como se muestra en la Figura 8.

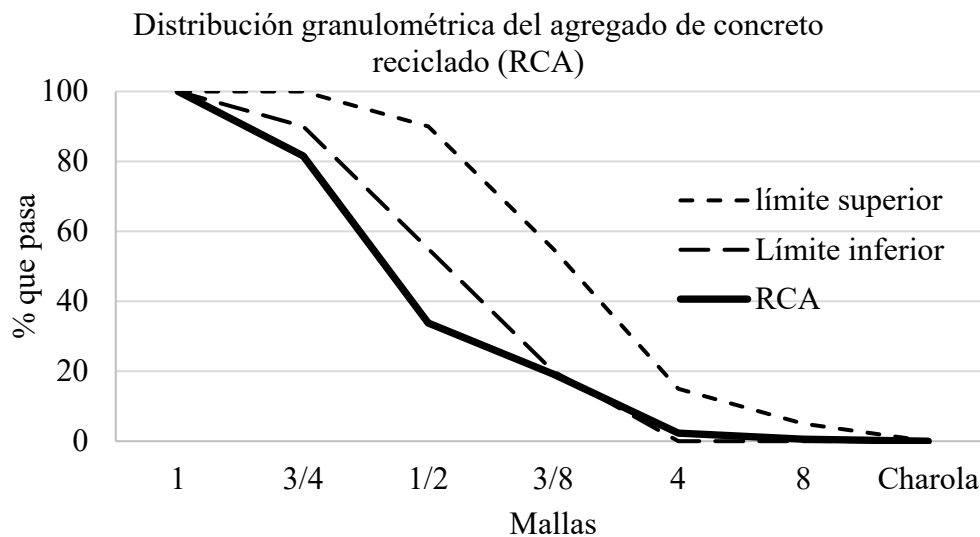


Figura 8. Curva de distribución granulométrica del agregado de concreto reciclado.

El esfuerzo a compresión se mantuvo constante en ambas mezclas para las edades de 28 a 90 días, tanto la que contiene SCBA como la mezcla control con 100% de agregado natural triturado. Los menores valores los presentó la mezcla con SCBA, con 34 MPa. La mezcla control presentó valores superiores a los 43 MPa, tal como se muestra en la Figura 9.

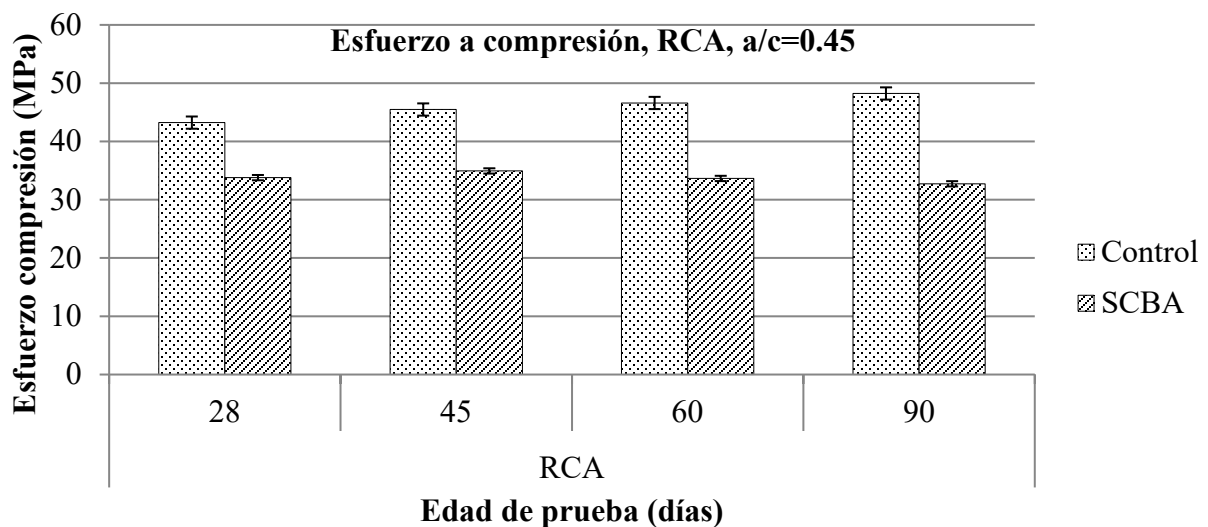


Figura 9. Valores de Resistencia a compresión hasta edad de 90 días de mezclas elaboradas con agregado de concreto reciclado (RCA) y relación a/c de 0.45.

Los resultados de resistividad eléctrica muestran valores semejantes a los del concreto control, Figura 10, indicando que la presencia de SCBA no reduce de manera considerable este parámetro que depende directamente de la porosidad.

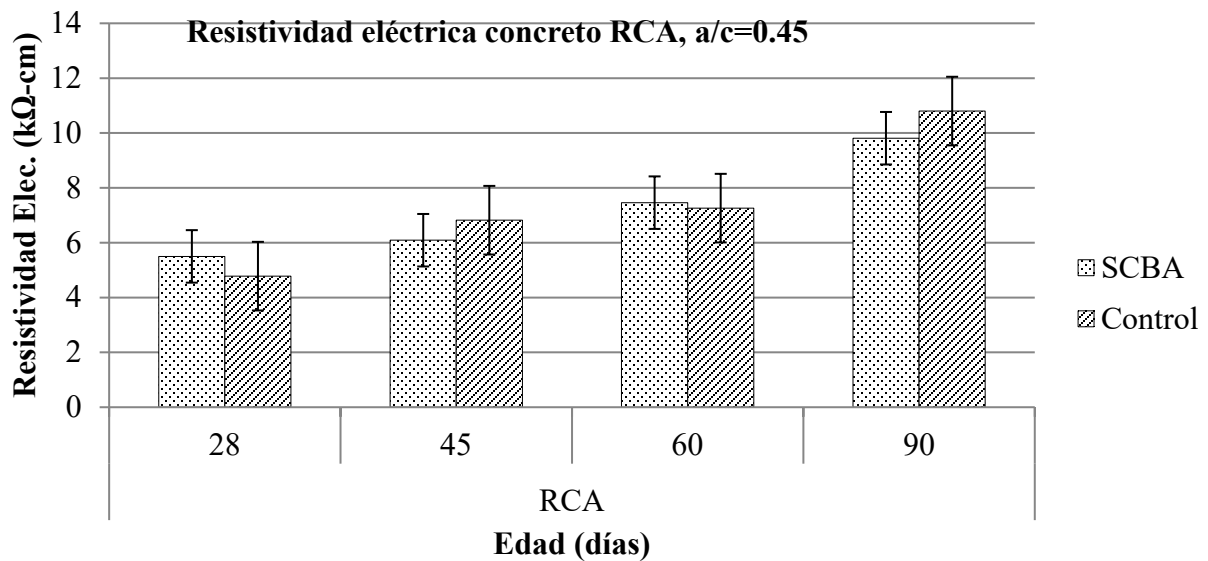


Figura 10 Resultados de resistividad eléctrica de la mezcla de concreto con agregado reciclado y relación a/c=0.45.

En la Figura 11 se presentan los resultados de los potenciales de corrosión. La etapa de pasivación del acero se presenta cuando se realizó el curado en agua de la red potable municipal. Los resultados de las pruebas electroquímicas se realizaron en dos etapas, retomando pruebas a los 1400 días después de 4 ciclos de prueba en solución de NaCl 3.5%. Los potenciales más negativos se presentaron en el acero embebido en el concreto con SCBA y RCA, lo cual coincide con los valores de resistividad eléctrica, en los que se infiere una mayor porosidad de la mezcla.

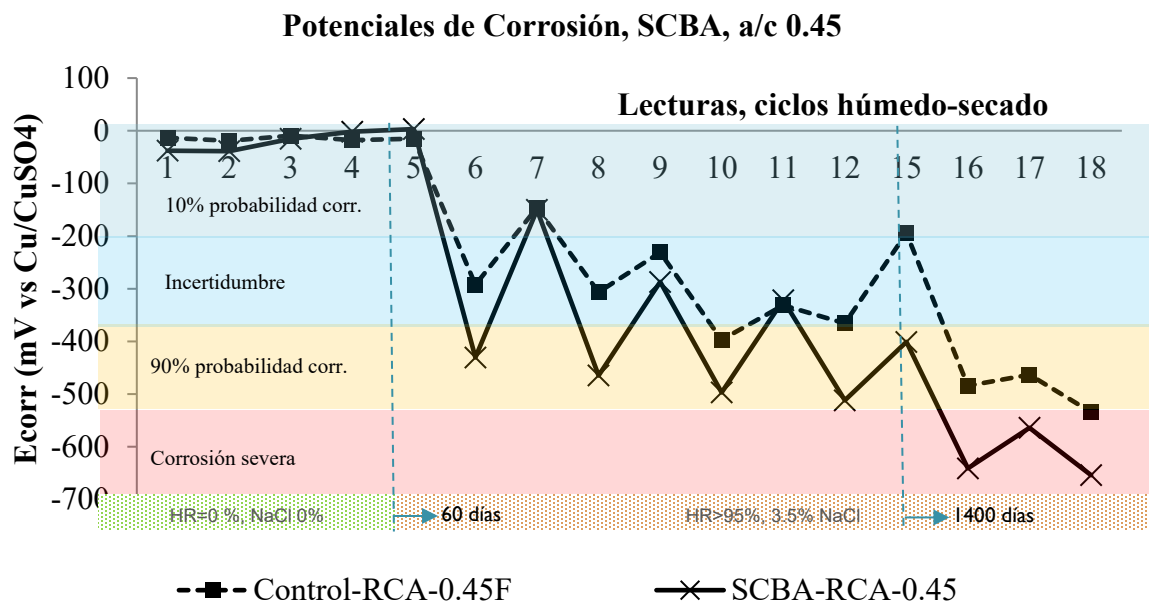


Figura 11 Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de SCBA, relación a/c=0.45.

Las velocidades de corrosión muestran una tendencia que coincide con los resultados de potenciales de corrosión, Figura 12. La muestra de concreto con SCBA y RCA presentó un

agrietamiento que impidió seguir con las mediciones, lo cual representa el efecto de las altas velocidades de corrosión.

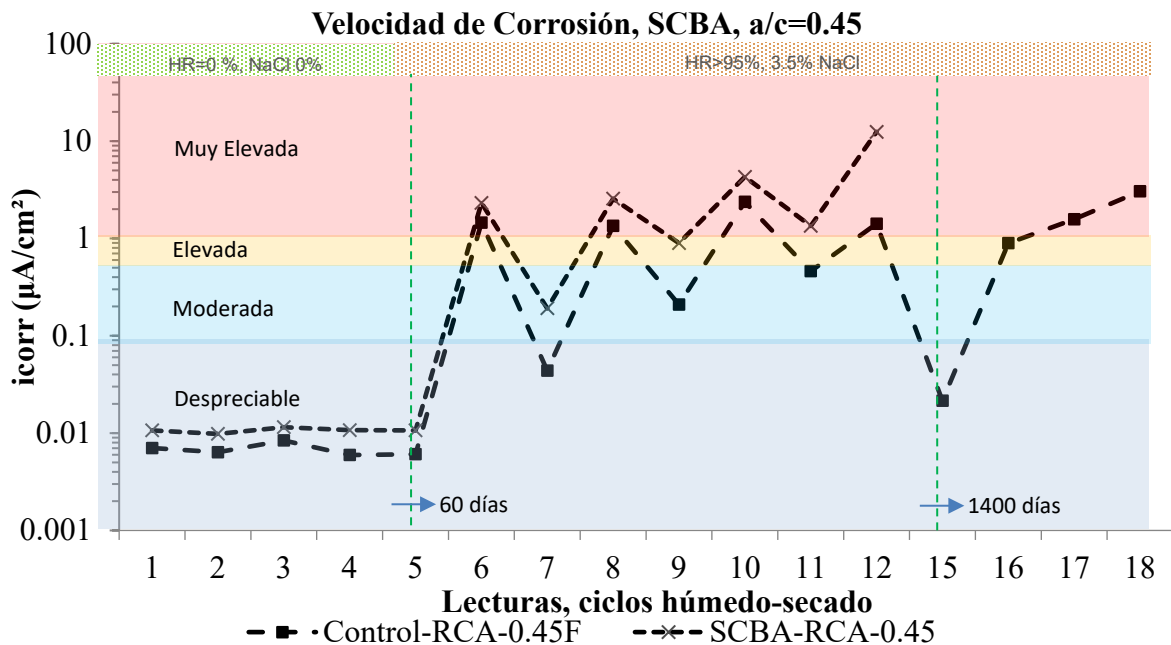


Figura 12. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de SCBA, relación a/c=0.45.

#### 4. CONCLUSIONES

El uso de SCBA y concreto generado en la demolición de estructuras de concreto, tienen importancia no solo en el aspecto de la construcción de estructuras bajo criterio de resistencia mecánica, sino también desde una perspectiva de construcción sustentable. Es importante que, al usar estos materiales, no resulte contraproducente su utilización a causa de un elevado consumo de energía para su tratamiento. Al observar los resultados de esfuerzos a compresión se observa una reducción de la resistencia mecánica, sin embargo, es importante mencionar que la ceniza se utilizó con tamaños de partícula menores o iguales a 0.149 mm, diferente a las investigaciones en las que se trata de disminuir el tamaño de partícula para lograr eficiencia en la reacción. De igual manera se obtuvieron resultados menos favorables de potenciales de corrosión para las mezclas con RCA y SCBA, lo que indica una reducción en la protección del acero, eso se infiere por la porosidad de la mezcla. Sin embargo, el hecho de tener bajos resultados ante el ataque de cloruros, no significa que el concreto no pueda ser utilizado en ambientes no agresivos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONACYT por el soporte para la realización de la investigación y al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil por los espacios de trabajo facilitados para la realización de la experimentación.

## 6. REFERENCIAS

- Akashi, O., Hanaoka, T., Matsuoka, Y., & Kainuma, M. (2011). A projection for global CO2 emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes. *Energy*(36), 1855-1867. doi:10.1016/j.energy.2010.08.016
- Angst, U. M. (2018). Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Mater Struct*(51). doi:https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6
- Cadena Franco, J., Veloz Rodríguez, M., Reyes Cruz, V., Coreño Alonso, O., & Vázquez García, R. (2010). ELECTROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF CHIRAL IMINIC COMPOUNDS WITH POSSIBLE APPLICATIONS TO CORROSION INHIBITION. *NACE INTERNATIONAL MEXICAN SECTION*.
- Castañeda Valdéz, A., & Rodríguez Rodríguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 45, 52-59. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181632610001.pdf>
- Escalante, I., Navarro, A., & Gomez, L. Y. (2011). Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza. *Revista ALCONPAT*, 156-169.
- González Fernández, J., & Miranda Vidales, J. (2007). *Corrosión en las Estructuras de Hormigón Armado: Fundamentos, Medidas, Diagnóstico y Prevención*. España: Gráficas Varona.
- Jha, P., Sachan, A., & Singh, R. (2021). Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. *Materials Today: Proceedings*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.751
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. Houston: NACE International.
- Orozco Cruz, R. (2007). Revista de divulgación Científica Veracruzana. En *Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico* (Vol. XX).
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmus, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*(105), 423-434. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153
- Ramírez Reyes, J., L., Pereyra Díaz, D., García Navarro, N., Valencia Arguelles, L., & Juárez Rivera, V. (2011). La corrosión atmosférica y su impacto en la economía veracruzana. *Revista de Divulgación Científica Y Tecnológica de la Universidad Veracruzana*, XXIV(1).
- Ruchansky, A. (2013). Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña como adición mineral al cemento Portland.
- Srinivasan, R., & Sathiyaa, K. (2010). Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete. *International Journal for Service Learning in Engineering*, 5(2), 60-66. doi:https://doi.org/10.24908/ijlsle.v5i2.2992
- Sun, D., Huang, C., Cao, Z., Wu, K., & Zhang, L. (2021). Reliability assessment of concrete under external sulfate attack. *Case Studies in Construction Materials*(15). doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00690



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-807-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. PC – 92 – 98



Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Comparación entre el perfil de concentración de cloruros y el de carbonatación en muestras de concreto expuestas a ambiente marino

A. Bacelis<sup>1</sup>, P. Castro Borges<sup>2</sup>, M. G. Balancán Zapata<sup>2</sup>,  
A. A. Torres Acosta<sup>3</sup>, O. Troconis de Rincón<sup>4</sup>

\*Autor de Contacto [pcastro@cinvestav.mx](mailto:pcastro@cinvestav.mx)

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Av. Héroe de Nacozari No. 480, San Francisco de Campeche, Campeche 24079, México

<sup>2</sup> Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Km. 6 Antigua Carretera a Progreso, C.P. 97320, Mérida, Yucatán, México

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Epigmenio González No.500, San Pablo, CP 76703, Querétaro, Querétaro, México.

<sup>4</sup> Centro de Estudios de la Corrosión de la Universidad del Zulia, P.O. 10482, Maracaibo, Venezuela

### RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es discutir la posible relación empírica entre el comportamiento de perfiles de cloruros y la profundidad de carbonatación (perfiles de pH) en vigas de concreto simple con relación a/c de 0.65, expuestas en un ambiente marino aproximadamente a 1 km de la playa, específicamente en la Estación Meteorológica de la CONAGUA en Progreso, Yucatán. Las vigas han sido expuestas en este micro-ambiente por cerca de 20 años y forman parte del proyecto DURACON (Durabilidad del Concreto) del CyTED. En este trabajo se realizó una comparación de los perfiles de cloruros y los perfiles de pH, obtenidos a través de la técnica ex-situ leaching, para poder obtener una posible correlación en su comportamiento. Se discuten pros y contras de los resultados y se anticipan correcciones para mejorar el método.

**Palabras clave:** perfil de concentración de cloruros, perfil de carbonatación, concreto reforzado, ambiente marino.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzado expuestas a un ambiente marino agresivo son vulnerables al ataque de varios iones dañinos como los iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) (Sun, et al, 2022), los cuales aceleran la corrosión en el metal de refuerzo de estas estructuras. Este fenómeno ha sido estudiado en el Proyecto DURACON (Efecto del ambiente en la durabilidad del concreto reforzado) el cual investiga la influencia de los parámetros meteorológicos, urbanos y marinos en el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado (Troconis, et al, 2015; Troconis, et al, 2016; Troconis, 2006). En este proyecto están involucrados 11 países en los cuales se distribuyeron un total de 46 sitios de prueba, uno de ellos en la Estación Meteorológica de la CONAGUA en Progreso, Yucatán. Este tipo de microambiente es muy corrosivo por lo que es considerado tipo C4 (Maldonado and Veleza, 1999) en la escala de agresividad de acuerdo con la norma ISO 9223 (ISO 9223, 2012). Esta agresividad se debe en parte a la cantidad de cloruros que se encuentran en el ambiente y la combinación de las características ambientales propias del sitio de exposición. Una de las definiciones del umbral de cloruros o valor crítico de cloruros ( $C_{\text{crit}}$ ) para el inicio de la corrosión dice que cuando el contenido de cloruros excede cierto límite (dado por la razón entre  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ ), el acero de refuerzo se despasiva provocando el incremento de la velocidad de corrosión (Kenny and Katz, 2020). Adicionalmente, si en el ambiente existe la presencia de  $\text{CO}_2$ , causante de la disminución del valor del pH del concreto (carbonatación), y debido a la interacción de éste con los  $\text{OH}^-$  libres en los poros del concreto, el proceso de corrosión del acero puede incrementarse por un efecto combinado cloruros-carbonatación.

Debido a la importancia de estos dos parámetros (la concentración de cloruros y el valor del pH) en la despasivación del acero de refuerzo, el objetivo principal de este trabajo es discutir la posible relación empírica entre el comportamiento de perfiles de cloruros y la profundidad de carbonatación (perfiles de pH) en vigas de concreto reforzado con relación a/c de 0.65 expuestas en un ambiente marino a 1 km de la playa.

## 2. METODOLOGÍA

Se elaboraron 12 especímenes prismáticos de concreto (15 cm x 15 cm x 50 cm) pertenecientes al Proyecto DURACON (Figura 1a) (Troconis, et al, 2015; Troconis, et al, 2016; Troconis, 2006), 6 especímenes con acero de refuerzo y 6 sin refuerzo. Se utilizaron dos relaciones agua/ cemento (a/c), 0.65 y 0.45, tres especímenes por cada tipo, los cuales han estado expuestos por casi 20 años en un micro-ambiente marino en la Estación Meteorológica de la CONAGUA en Progreso, Yucatán aproximadamente a 1 km de la playa. En este trabajo se muestran los resultados para los especímenes con relación agua cemento de 0.65 sin refuerzo (concreto simple).

Las caras de los especímenes fueron orientadas en dirección a los vientos predominantes (noreste) y otra con dirección hacia los vientos no predominantes (suroeste), Figura 1.





Figura 1. Sitio de exposición.

## 2.1 Perfiles de cloruro y pH

Para la obtención de los perfiles de cloruros se realizó el corte de un segmento de 5 cm como se muestra en la Figura 2b. Este corresponde al cuarto corte desde su exposición. Se obtuvieron dos perfiles por cada muestra, es decir un perfil se obtuvo en la dirección de vientos predominantes (VP) hacia vientos no predominantes (VNP), un perfil más en la dirección de la cara superior hacia la cara inferior (Figura 2c), en ambas direcciones se obtuvieron muestras de polvo a distintas profundidades (Figura 2d) las cuales fueron utilizadas para determinar su concentración de cloruros, así como el valor de pH correspondiente a cada profundidad.

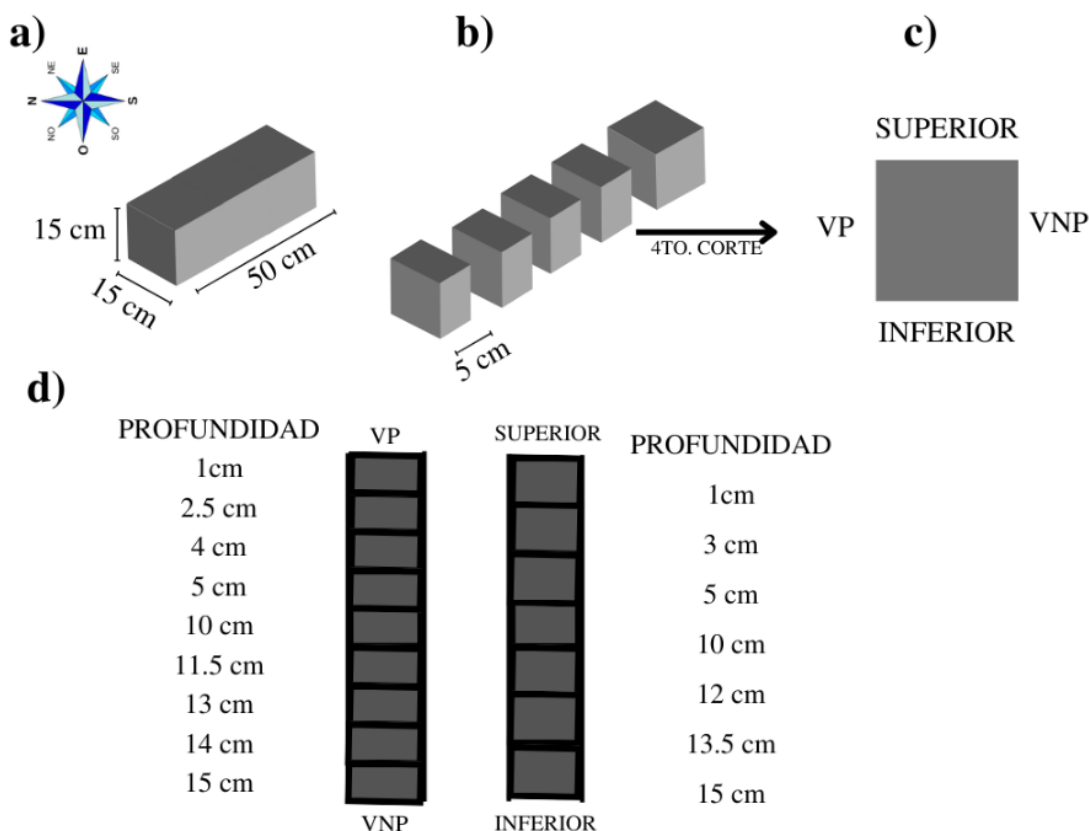


Figura 2. Esquemas de los a) prismas de concreto, b) cortes de los prismas, c) vista frontal, y d) distribución de profundidades de ambas direcciones usadas (caras orientadas de VP a VNP, y de superior a inferior).

### 2.1.1 Determinación de la concentración de cloruros

La concentración de cloruros fue determinada mediante la técnica del ión selectivo de cloruros (Castro-Borges, 1995), obteniendo un perfil de concentración para cada dirección.

### 2.1.2 Determinación del valor del pH

El valor de pH se obtuvo mediante la técnica de Ex Situ Leaching (ESL), la cual se realizó según lo sugerido por M. Alonso y J. L. García Calvo (2012). Se tomó polvo de las diferentes profundidades mencionadas anteriormente. Posteriormente se tomaron 3 g de la muestra y se mezclaron con 3 ml de agua desionizada y se agitó durante 15 minutos, el valor del pH se registró de la suspensión directamente sin filtrar, la medición del valor de pH se realizó hasta obtener un valor estable, para ello se utilizó medidor de pH comercial con una precisión de  $\pm 0.01$ .

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra los perfiles de los valores promedio de la concentración de cloruros en % por peso de cemento, así como el perfil de pH en ambas direcciones de la medición. En la dirección de VP a VNP (Figura 3a) se observan tres regiones claramente definidas:

- I) la primera, cuya medida rango va de los bordes de los especímenes hacia el centro, y se puede observar una caída en el valor del pH debido a la carbonatación del concreto después de casi 20 años. En esta región se observan pequeñas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  a pesar del bajo valor pH presentado;
- II) la segunda región, se encuentra en el final de la zona anterior y aproximadamente 1 cm

hacia el centro de las muestras, su valor de pH está por debajo de 12, y la caída es menor en la cara orientada hacia VP, además las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  son las más altas registradas;

- III) la última región comprende los 10 cm centrales donde el valor de pH se mantiene cercano a 12 y presenta concentraciones de  $\text{Cl}^-$  por debajo de 0.4 un valor tolerable de contenido de cloruro por % de peso de cemento (RILEM Committee, 1994).

Por su parte la dirección de la cara superior hacia la inferior (Figura 3b) presenta un comportamiento similar, mostrando también tres regiones bien definidas para el contenido de  $\text{Cl}^-$  con un comportamiento parecido en profundidades similares que en la dirección analizada previamente. Mientras que en los valores de pH la primera región

- A) está bien definida y abarca aproximadamente 1 cm del borde hacia el centro y el contenido de  $\text{Cl}^-$  es pequeño (cercano a 0.2 % peso de cemento);
- B) la segunda región corresponde a la ubicada a los valores de profundidad 3 y 13 cm, donde se observa que la profundidad más cercana a la cara inferior (13 cm) de esta zona presenta un valor de pH menor a 12 y presenta el mayor contenido de  $\text{Cl}^-$  atribuido al almacenamiento de humedad y al desgaste del recubrimiento inferior, mientras la profundidad de 3 cm presenta un valor de pH cercano a 12 y su concentración de  $\text{Cl}^-$  también supera los valores tolerables, sin embargo, estos no son tan altos, la diferencia de este valor respecto a los demás bordes se debe probablemente a su mayor profundidad.
- C) Por último, la tercera zona también tiene un grosor de 10 cm y está comprendida del centro del espécimen hacia los bordes, sus valores de pH están por arriba de 12 y su contenido de  $\text{Cl}^-$  está por debajo de los 0.4 indicando de nueva cuenta un valor tolerable de cloruros (RILEM Committee, 1994).

D)

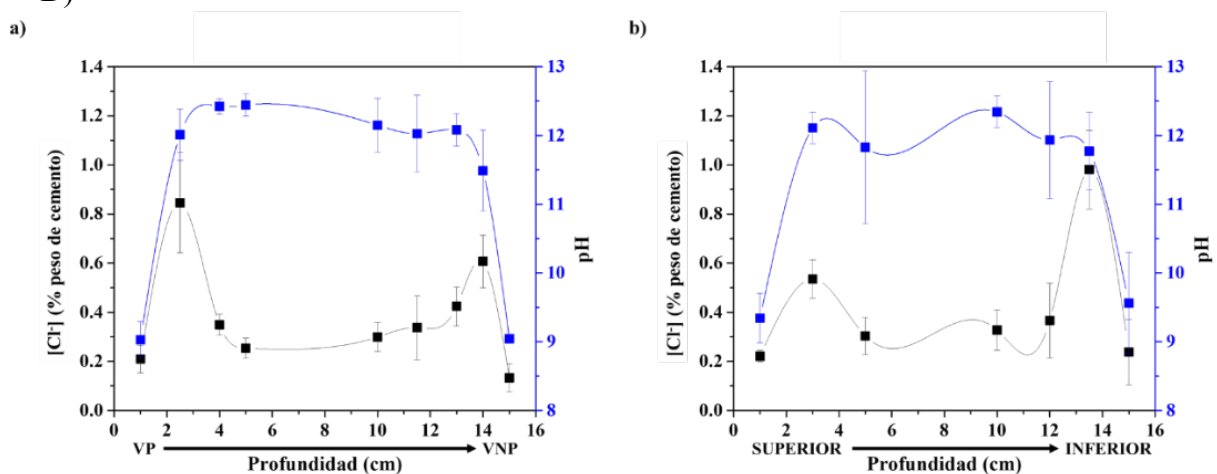


Figura 3. Perfiles de concentración de cloruros en % por peso de cemento y de pH a distintas profundidades en las direcciones de a) VP a VNP, y b) de superior a inferior.

El efecto inhibitor de los iones de hidróxido contra la corrosión inducida por cloruros es reconocido como un factor importante que influye en los valores de umbral de cloruros (Venu, et al 1965; Hausmann, 1967; Gouda, 1970). El valor crítico de cloruros es presentado en términos de relaciones  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  el cual atribuye el único efecto inhibitor a la presencia de iones de hidróxido, y la disminución del valor crítico de cloruros al aumentar el valor del pH (Gouda, 1970). La Figura 4 presenta la  $C_{\text{crit}}$  en las diferentes profundidades de los especímenes en ambas direcciones de acción. En la dirección de VP a VNP (Figura 4a) se observa una disminución de la  $C_{\text{crit}}$  al incrementar el pH, es importante mencionar que a pesar de la baja concentración de cloruros en los

bordes de las muestras (Figura 3a) el  $C_{crit}$  es mucho mayor que en las regiones que presentan las mayores concentraciones de cloruros. Por su parte la dirección orientada de la cara superior hacia la cara inferior (Figura 3b) muestra una tendencia similar que la mencionada anteriormente, con la diferencia en la región II desde la cara superior donde el  $C_{crit}$  es similar al resto de la muestra, esto debido a que se encuentra a mayor profundidad y a su valor de pH como se mencionó anteriormente. Por otra parte, el límite inferior del  $C_{crit}$  dado por la proporción  $[Cl^-]/[OH^-]$  es de 0.6 basado en consideraciones de probabilidad de corrosión según (Hausmann, 1967), por encima de este valor existe mayor probabilidad de que el acero de refuerzo sufra corrosión. Se puede observar que en ambas direcciones este valor (0.6) solo es rebasado en la región de carbonatación del concreto (pH ~ 9), esta información nos permite determinar que barras de refuerzo en concreto con un recubrimiento mayor a 1 cm de espesor a pesar de la disminución del valor del pH no se encuentran en una alta probabilidad de corrosión, por ejemplo, otros especímenes también pertenecientes al proyecto DURACON con características similares a los usados en este estudio pero con varillas a distintas profundidades (1.5, 2 y 3 cm).

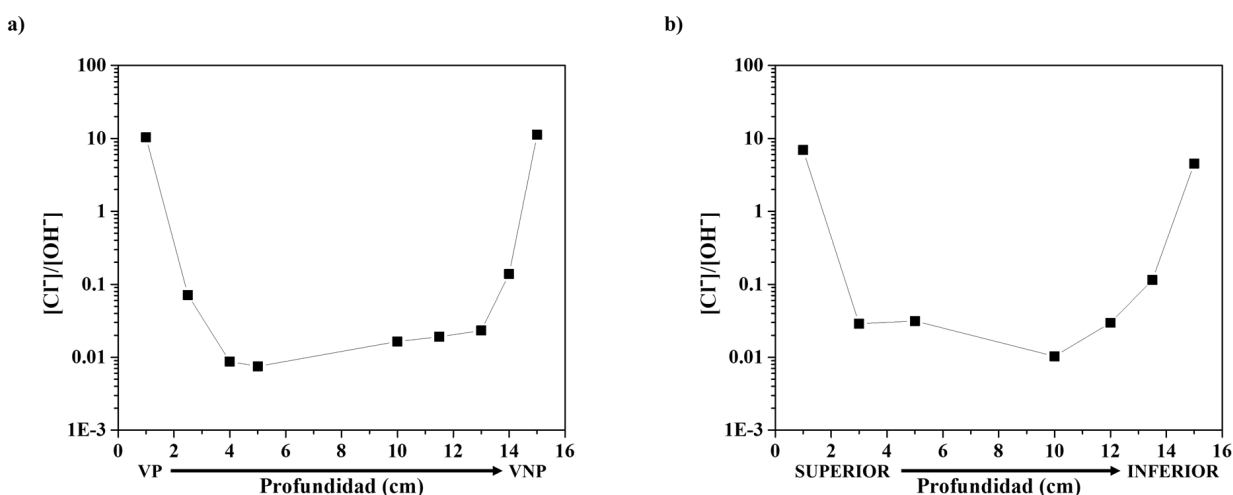


Figura 3. Perfiles de concentración crítica de cloruros dado por la razón  $[Cl^-]/[OH^-]$  a distintas profundidades en las direcciones de a) VP a VNP, y b) de superior a inferior.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se observaron tres regiones con distintas características, en las cuales el valor de pH disminuye de la región central hacia los bordes, y la concentración de cloruros es mayor en la región comprendida entre los bordes y el centro.
- Se observaron condiciones menos adversas en la cara orientada hacia vientos predominantes, así como en la cara superior.
- Se observó una  $C_{crit}$  que disminuye hacia el centro de los especímenes cuyos valores indican la región más agresiva para el acero de refuerzo en la zona carbonatada.

#### 5. REFERENCIAS

Alonso, M., García Calvo, J. L. (2011), *Development of an Accurate Methodology for Measuring the Pore Fluid pH of Low-pH Cementitious Materials*. 13th International Congress on the Chemistry of Cement; (CISDEM) Comunicaciones congresos, URL: <http://hdl.handle.net/10261/50594>

- Castro Borges, P. (1995). "Difusion y corrosion por iones cloruro en el concreto reforzado". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/89702>
- Gouda, V. K. (1970), *Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel: I. Immersed in Alkaline Solutions*, British Corrosion Journal, vol. 5, no. 5, pp. 198–203, <https://doi.org/10.1179/000705970798324450>.
- Hausmann, D. A. (1967), *Steel corrosion in concrete--How does it occur?*, Materials Protection Publisher: National Association of Corrosion Engineers, Vol 6, No 11, PP 19-23.
- International Organization for Standardization (2012), ISO 9223:2012. *Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Classification, Determination and Estimation*, 2nd ed.; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- Kenny A., Katz, A. (2020), Steel-concrete interface influence on chloride threshold for corrosion—Empirical reinforcement to theory,” *Construction and Building Materials*, Vol. 244, p. 118376, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118376>
- Maldonado L., Veleza, L. (1999), *Corrosivity category maps of a humid tropical atmosphere: The Yucatán Peninsula, México*, Materials and Corrosion, vol. 50, no. 5, pp. 261–266. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4176\(199905\)50:5<261::AID-MACO261>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4176(199905)50:5<261::AID-MACO261>3.0.CO;2-G)
- RILEM Committee (1994), *Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion*. *Materials and Structures* 27 (7), 415–436. <https://doi.org/10.1007/BF02473446>
- Sun, D., Cao, Z., Huang, C., Wu, K., De Schutter, G., Zhang, L. (2022), “*Degradation of concrete in marine environment under coupled chloride and sulfate attack: a numerical and experimental study*,” *Case Studies in Construction Materials*, V 17, p. e01218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01218>
- Troconis De Rincón, O., DURACON Collaboration (2006), *Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results*, *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 952–962. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.005>
- Troconis de Rincón, O., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., Mejía de Gutierrez, R., Del Vasto, S., Saborio, E., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Martínez-Molina, W., Alonso-Guzmán, E., Castro-Borges, P., Moreno, E. I., Almeraya-Calderón, F., Gaona-Tiburcio, C., Pérez-López, T., Salta, M., Melo, A. P., Martínez, I., Rebolledo, N., Rodríguez, G., Pedrón, M., Millano, V., Sánchez, M., Partidas, E. (2015), *Concrete Carbonation in Ibero-American Countries DURACON Project: Six-Year Evaluation*, *Corrosion*, 71 (4): 546–555. <https://doi.org/10.5006/1385>
- Troconis De Rincón, O., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., De Gutiérrez, R. M., Del Vasto, S., Saborio, E., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Lomeli-González, M. G., Araujo-Arreola, N., Martínez-Molina, W., Alonso-Guzmán, E., Castro-Borges, P., Balancan-Zapata, M., Pérez-López, T., Sosa-Baz, M., Baltazar-Zamora, M., Mendoza, K. (2016). *Reinforced concrete durability in marine environments DURACON project: Long-term exposure*. *Corrosion*, 72(6), 824-833. <https://doi.org/10.5006/1893>
- Venu, K., Balakrishnan, K., Rajagopalan K. S. (1965), *A potentiokinetic polarization study of the behaviour of steel in NaOH-NaCl system*, *Corrosion Science*, vol. 5, no. 1, pp. 59–69, 1965. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(65\)90108-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(65)90108-3)



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-809-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. PC – 99– 108



X CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Análisis de la influencia del clima y su variabilidad en la vida útil de un pavimento

J. F. Mendoza<sup>1\*</sup>, E. M. Alonso<sup>2</sup>, W. Martínez<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [fernando.mendoza@imt.mx](mailto:fernando.mendoza@imt.mx)

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

<sup>2</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

### RESUMEN

Esta investigación analiza la influencia del clima y la variabilidad climática en la vida útil de un pavimento, con el objetivo de identificar criterios en las variables de diseño que permitan aumentar la durabilidad y resiliencia de los pavimentos. Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de pavimentos, y afectan el comportamiento de las diferentes capas del mismo, además influyen en las propiedades de los materiales que conforman el pavimento, modificando su comportamiento y desempeño. Los pronósticos del clima muestran que este continuará variando debido al cambio climático, el cual tendrá impactos significativos en la durabilidad y desempeño de los pavimentos, por lo que deben ser adaptados a las nuevas condiciones futuras del clima. El análisis permitió identificar las variables climáticas que influyen en el desempeño físico y mecánico de las diferentes capas del pavimento, mismas que deberán ser adaptadas y consideradas en los métodos de diseño para pavimentos flexibles. Las tendencias actuales deben considerar la incorporación y el análisis de los datos climáticos de una manera más adecuada en el diseño y en los modelos de deterioro de los pavimentos para asegurar la durabilidad y aumentar su resiliencia al cambio climático.

**Palabras clave:** fallas en pavimentos; cambio climático; resiliencia de la infraestructura carretera; durabilidad de materiales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los pavimentos, va más allá de los beneficios funcionales y prácticos para los usuarios de las carreteras. Los pavimentos son considerados como un activo fundamental de los sistemas de transporte, pero también es un componente básico del funcionamiento del sistema societal (Plati, 2019). De esta manera los pavimentos son catalogados como el activo más importante que integra la infraestructura carretera.

El diseño de pavimentos puede ser definido como la determinación de los espesores del pavimento y de las capas que lo integran, las cuales son colocadas en el suelo natural preparado en un medioambiente en particular (condiciones naturales) para proveer una superficie satisfactoria para el tránsito en función de determinadas condiciones externas (Scala, 1962).

Para asegurar la durabilidad de los pavimentos, diversas instituciones han desarrollado varios métodos con enfoques empíricos y mecánico-empíricos para modelar el desempeño de un pavimento y su deterioro en función de diferentes variables (Mills et al, 2006).

Las principales variables que intervienen en el diseño de un pavimento flexible, de acuerdo a Corro and Prado (1974), pueden clasificarse en tres categorías:

- a) Estructurales. Incluyen características relativas a cada una de las capas que constituyen el pavimento de la carretera, como espesores, resistencia y deformabilidad en las condiciones esperadas de servicio. Todo esto tiene que ver con los materiales que conforman la estructura y las demandas o solicitudes de diseño.
- b) Carga. Se refiere a los efectos producidos por el tránsito mezclado al circular por la carretera. En este caso son importantes datos relacionados con el tránsito medio diario anual, tasa de crecimiento anual, cargas por eje sencillo o tándem, histograma de distribución del tránsito en la sección transversal del camino, y vida de proyecto del pavimento antes que la carretera requiera reconstrucción, en cuyo caso debe definirse de antemano el criterio de falla del pavimento. El tránsito mezclado se debe transformar en tránsito equivalente en ejes sencillos, mediante el empleo de factores teórico-empíricos.
- c) Clima y condiciones regionales. Las características reológicas de los materiales que constituyen la carretera dependen de la temperatura, el régimen de precipitación, precipitación media anual, nivel freático, geología y topografía de la región.

Este último inciso describe múltiples variables que los métodos de diseño empíricos actuales no establecen claramente como considerarlas, ya que las variables meteorológicas influyen en las características físicas, mecánicas y químicas de los materiales; la temperatura (tiene un efecto sobre el estado sólido, termoelásticos, adiciones, congelamiento y deshielo), el régimen de precipitación (precipitación media y máxima anual, influyen en la humedad relativa), el nivel freático (interviene en la capilaridad en las subcapas del pavimento), la radiación solar (participa en destrucción de los enlaces del asfalto por los rayos UV), la geología (está presente en los geomateriales estabilizadores, reacciones de los materiales alcalinos, adiciones de sólidos de reciclaje o de residuos sólidos), y la topografía (se manifiesta mediante la morfología que será atacada por los vientos dominantes y su dirección predominante, ubicación con latitud y longitud) de la región (Mendoza et al, 2021).

El presente artículo de investigación resalta la importancia de considerar el clima en el diseño de pavimentos, ya que los métodos que actualmente se utilizan en México no incluyen de manera específica el clima del sitio en donde se pretenda diseñar el pavimento.

Existen una serie de investigaciones que destacan la importancia de considerar el clima de manera adecuada en los métodos de diseño de pavimentos, cuyos resultados muestran los efectos, que la temperatura, la precipitación, o las inundaciones, tienen sobre los pavimentos, los cuales se han compilado y analizado.

Adicionalmente, se pone de manifiesto en este trabajo que los métodos actuales para el diseño de pavimentos utilizan el clima en función de datos históricos, y dado que los pavimentos se diseñan para periodos de diseño que superan los 20 años, es necesario considerar la variabilidad climática asociada al cambio climático.

## 2. ANTECEDENTES

El clima sirve como un insumo esencial en el diseño del pavimento y, dependiendo de su variabilidad, puede tener un impacto significativo en el desempeño del pavimento (Li et al, 2011). Sin embargo, no siempre es considerado adecuadamente en los métodos que se utilizan para los métodos empíricos para los pavimentos flexibles. En un primer análisis se identificó cómo los métodos empíricos incluyen el clima, cuyos resultados se muestran a continuación:

- El método UNAM establece que las condiciones meteorológicas influyen en la capacidad de soporte del suelo (VRS), por lo que el valor relativo de soporte crítico para diseño considera un coeficiente de variación que incluye la incertidumbre debido al clima (Corro et al, 1981).
- El método AASHTO-93 incluye solo dos variables que representan los efectos del clima en el lugar, los cuales son, el drenaje y la variación estacional de la capacidad de soporte del suelo de cimentación o subrasante (AASHTO, 1993). Estos aspectos consideran para el diseño a la precipitación como variable. Aunque actualmente la temperatura es considerada en la selección del cemento asfáltico para el diseño de la mezcla asfáltica, pero no en el método de diseño del pavimento.

Es importante resaltar que ambos procedimientos fueron desarrollados en un solo sitio y por lo tanto no pueden representar adecuadamente las diferentes condiciones climáticas de toda una región o un país.

La caracterización medioambiental del sitio en donde se diseñe un pavimento es muy importante para garantizar un desempeño adecuado del pavimento y evitar fallas durante su periodo de diseño. En México no se cuenta con ningún modelo que permita incorporar los factores climáticos en el diseño de los pavimentos para que estos puedan hacer frente a los daños, ya sean métodos empíricos o mecánico-empíricos.

Una forma de incorporar la información climática al diseño MEPDG, es mediante el Modelo Climático Integrado (ICM, por sus siglas en inglés de Integrated Climate Model), desarrollado a fines de la década de los 80's para simular las variaciones temporales de la temperatura, la humedad y el ciclo de congelación-descongelación internas del pavimento y su impacto en las principales propiedades de los materiales que conforman un pavimento. Este programa fue reconocido como el modelo más completo que aborda los efectos del clima en los pavimentos (Lytton et al, 1989). La versión original fue analizada por Solaimanian and Bolzan (1993) y adaptada por Larson and Dempsey (1997), la cual fue denominada "Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0" (EICM, por sus siglas en inglés de "Modelo Climático Integrado Mejorado"), la cual ha sido actualizado, calibrado y validado en diferentes investigaciones (NCHRP, 2008; CalTrans, 2004). El EICM en conjunto permite predecir o simular patrones de comportamiento de las características del pavimento y de los materiales junto con condiciones ambientales de diversas variables meteorológicas que se utilizan en el método de diseño MEPDG. Sin embargo, el EICM no es posible aplicarlo en México, ya que previamente se requiere construir una base de datos con información meteorológica, calibrarla y validarla para que a través de los modelos del EICM se puedan alimentar los modelos de deterioro del MEPDG de manera automática.

Por otro lado, los métodos empíricos y el enfoque actual mecánico-empírico están diseñados con base en patrones climáticos históricos típicos que reflejan el clima local e incorporan supuestos sobre un rango razonable de temperatura y niveles de precipitación (Li et al, 2011). Por lo que no



consideran la variabilidad futura del clima en función de los diferentes escenarios del cambio climático.

### 3. ANALISIS DE LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LOS PAVIMENTOS

Sirin et al (2019) ha identificado 29 factores que afectan el desempeño del pavimento, de los cuales 3 de ellos están asociados a factores medio ambientales (condiciones climáticas extremas, precipitación intensa y los ciclos de congelamiento-descongelamiento).

Uno de las primeras investigaciones identificadas, fue llevada a cabo por Ali and Lopez (1996), donde evaluaron las correlaciones entre las propiedades estructurales del pavimento (representadas por los módulos elásticos de las capas) y los factores climáticos (representados por las condiciones de temperatura y humedad del pavimento), los cuales fueron analizados estadísticamente. Los resultados evidenciaron una estrecha correlación entre el clima y los módulos de las capas del pavimento.

A continuación, se muestra una revisión del estado del arte sobre como interactúa el clima y los pavimentos, y sus efectos.

#### 3.1 Influencia de la temperatura

Teltayev and Suppes (2019), realizaron una investigación experimental sobre la variación de temperatura y su efecto sobre la distribución de la humedad en el pavimento y la subrasante de una carretera ubicada en la región oriental de Kazajistán. De los diversos resultados se obtuvo, por ejemplo, que la variación de temperatura en la superficie y en puntos del pavimento de concreto asfáltico coincide cualitativamente con la variación de la temperatura del aire y sus ciclos diarios, mensuales y anuales, y que la temperatura en la profundidad de la subrasante se distribuye casi uniformemente durante un largo período de tiempo (desde mediados de septiembre hasta principios de abril).

En otras investigaciones compiladas por Mendoza et al (2021), describen que asociados a la temperatura se presentan otros efectos, tales como:

- Las altas temperaturas y los periodos prolongados de calor, provocan en la carpeta que la mezcla asfáltica exceda los límites plásticos, quedando propensa a las deformaciones asociadas al paso de las ruedas de los vehículos, provocando fallas y deterioros en la superficie de rodamiento.
- El módulo dinámico de la mezcla asfáltica es muy sensible a la temperatura, por lo que un perfil de distribución de temperaturas es necesario para la predicción de las fallas térmicas.
- Las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto y otros materiales que conforman el pavimento, dependen en gran medida de la temperatura. La degradación de las propiedades del material del pavimento genera agrietamientos por fatiga térmica.
- Altas temperaturas reducen la rigidez y resistencia de la capa de asfalto.

#### 3.2 Influencia de las inundaciones

Un estudio fue realizado por Lu et al. (2018), donde analizaron el impacto de las inundaciones en el desempeño del pavimento, en el cual se establecieron patrones de daños, características de inundaciones, análisis de factores de impacto y un estudio de caso, para evaluar el efecto de la humedad. Los resultados mostraron que no hay daños significativos causados por la exposición de corta duración a precipitaciones extremas, pero los eventos extremos si contribuyen a cambios en el índice de rugosidad internacional. El aumento del número de ciclos de eventos conduce a un aumento de la tasa de daño, ya que aumenta la tasa saturación del suelo.

### 3.3 Influencia de la humedad

Ackah et al (2021), determinaron que el contenido de agua es uno de los factores significativos que afectan la propiedad de estabilidad y rigidez de los suelos de subrasante. En condiciones climáticas cambiantes, como la lluvia y la sequía, el contenido de agua se vuelve más variable y por lo tanto es precursor de muchos de los problemas relacionados con la subrasante, como la formación de surcos y ondulaciones.

La humedad puede presentar diversos problemas en los pavimentos, de acuerdo al análisis realizado por Mendoza et al (2021), algunos son:

- Las deformaciones en los pavimentos están presentes en climas húmedos y se agrava a medida que aumentan los días húmedos. Esto se debe a la pérdida de la capacidad de carga de los suelos con la humedad.
- La variación de la humedad altera el módulo de resiliencia en los materiales granulares que componen la base, la sub-base y las terracerías (sub-rasante).
- El contenido de humedad reduce la rigidez de la subyacente y las capas granulares.
- La humedad y la temperatura pueden calentar la carpeta, separando la capa de asfalto del agregado, iniciando una pérdida de adhesión la cual deteriora y desintegra la carpeta asfáltica.
- Un aumento de la humedad puede disminuir el contenido de arena fina en la sub-rasante, el cual genera agrietamientos por fatiga.

### 3.4 Influencia de la radiación solar

El incremento de la radiación solar y el aumento de la radiación ultravioleta (UV) aceleran el envejecimiento del asfalto, el cual se vuelve menos flexible y susceptible a fallar por agrietamiento. Hu et al (2018) analizaron el efecto de envejecimiento del pavimento asfáltico debido a la radiación ultravioleta (UV), encontrando una estrecha correlación entre el grado de envejecimiento UV y el espesor de la carpeta asfáltica.

## 4. INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA VIDA ÚTIL DE LOS PAVIMENTOS

Las condiciones medioambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de los pavimentos (Zapata et al, 2007). Qiao et al (2019), establece que el clima influye en la tasa de deterioro del pavimento, y por lo tanto en su mantenimiento y los costos en su ciclo de vida. Por lo que resulta importante en la actualidad considerar los factores ambientales y su variación como elementos fundamentales que deben considerarse en el diseño y mantenimiento de los pavimentos. Johanneck and Khazanovich (2010) establecen que los factores climáticos tienen un mayor impacto en el desempeño de un pavimento de larga duración y que dichos factores afectan el comportamiento de las capas en el pavimento. Además, las condiciones climáticas representan variables importantes en el comportamiento de las propiedades de los materiales de los pavimentos, los cuales afectan la respuesta y desempeño del pavimento (Meagher et al, 2012).

Tighe et al (2001), evaluó el sistema de diseño AASHTO incorporando un análisis de capa elástica para determinar la respuesta del pavimento, es decir, utilizando cargas acumulativas equivalentes de un solo eje, tipo de subrasante y espesor de capa para determinar el diseño más efectivo. El sistema de diseño se actualizó y recalibró para separar los efectos del medio ambiente y del tránsito en su desempeño. Como resultado se comprobó que el desempeño total del pavimento es el efecto acumulativo del daño causado al medio ambiente y el daño causado por el tránsito.

Los resultados de las investigaciones nos hacen replantear que el deterioro de un pavimento no debe ser asociado únicamente al daño de los vehículos, sino que también el clima influye de manera muy significativa en su deterioro, por lo que las gráficas de pérdida de serviciabilidad deberían

adaptarse para considerar la pérdida de servicio debido al tránsito y la pérdida de servicio debido al clima, tal y como se ilustra en la Figura 1.

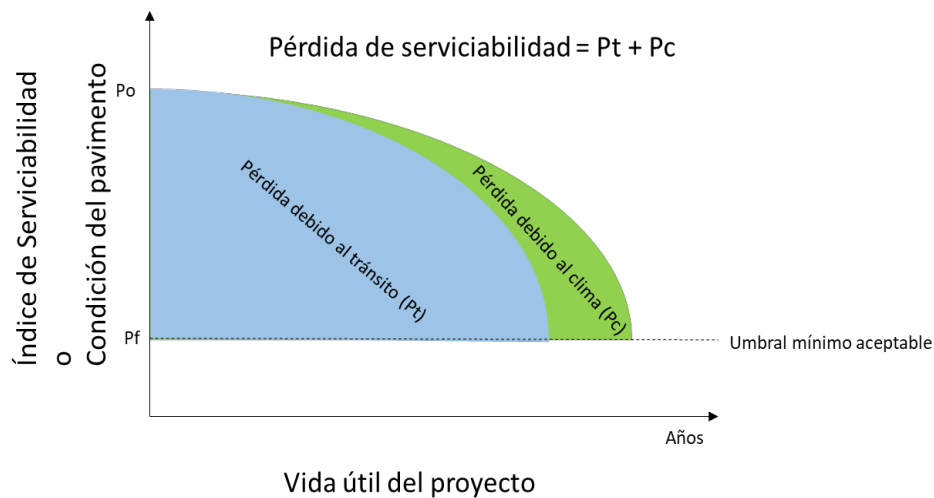


Figura 1. Deterioro de un pavimento debido al tránsito y al clima durante su vida útil

Wistuba and Walther (2013), realizaron un estudio de los parámetros del clima que influyen en el diseño de pavimentos, utilizando la teoría multicapa lineal-elástica. De esta manera evaluaron las tensiones inducidas por el tránsito y la temperatura. Este enfoque se considera de los más adecuados para estudiar el efecto de la temperatura y los factores de influencia en el diseño de pavimentos. Los autores concluyen que los pavimentos deben ser adaptados al clima y al cambio climático para resistir las fallas potenciales asociadas a diferentes climas.

De acuerdo a Qiao et al (2013), el riesgo potencial del cambio climático ha despertado especial interés en evaluar cómo puede afectar las tasas de deterioro de los pavimentos flexibles y cómo se alteraría la vida útil del pavimento como consecuencia. El análisis del ciclo de vida debe considerar las proyecciones climáticas, ya que existen ventajas operativas (reducción del mantenimiento) y económicas, en la utilización de un asfalto mejorado que uno original.

Chai et al (2014), realizaron un análisis mediante los modelos de deterioro del HDM-III (Highway Development and Management) y un análisis económico del mantenimiento, en función del clima actual y el futuro proyectado de una red de carreteras de Queensland en Australia. Se concluyó que el cambio climático influye de manera significativa en el deterioro de los pavimentos y que se prevé que el costo del mantenimiento aumente en casi un 30% baja la condición del cambio del clima en el futuro.

Taylor and Philp (2015), consideran que, si el cambio climático no es considerado en el diseño de pavimentos, se puede acelerar la degradación de la estructura, de los materiales que conforman las capas y del suelo de cimentación. El cambio climático afecta la vida de diseño y los regímenes de mantenimiento necesarios para garantizar la vida útil del pavimento.

Si no se incluyen las proyecciones del cambio climático en el diseño de los pavimentos, es muy probable que el periodo para el cual fue diseñado no se cumpla, que su vida útil sea mucho menor a la esperada.

Por otro parte, si no se considera el cambio climático en el diseño y en los modelos de deterioro, implicará que la organización de carreteras tenga que erogar mayores presupuestos para la conservación del pavimento, ya que la variación climática no incluidas en el diseño acelerará el deterioro de las capas del pavimento.

Finalmente, un inadecuado mantenimiento de los pavimentos puede conjuntamente con el clima acelerar su deterioro, por ejemplo, si se presenta una grieta generada por temperatura, la cual no es

atendida, entonces el agua producto de la precipitación puede entrar por las grietas y provocar otros daños a las capas del pavimento, reduciendo su vida útil.

## 5. ADAPTACIÓN DE LOS PAVIMENTOS AL CLIMA

El cambio climático tiene efectos significativos en el desempeño del pavimento y, por lo tanto, debe incorporarse al procedimiento de diseño del pavimento (Qiao et al, 2013).

Los diseños de pavimentos mecánico-empíricos asumen una línea base climática apoyada en patrones históricos y recientes de los diferentes factores climáticos, y no consideran la variabilidad asociada al cambio climático. Esto plantea la necesidad de considerar el cambio climático como una variable de diseño, este proceso se le denomina adaptación al cambio climático.

Para responder adecuadamente al clima y su variabilidad es necesario adaptar los pavimentos. Dawson (2014) considera diferentes opciones mediante las cuales se puede aumentar la resiliencia de los pavimentos, tales como:

- Adaptar los materiales. Los materiales que se utilizan en los pavimentos son sensibles a las condiciones medioambientales, principalmente la temperatura y el contenido del agua. Se recomienda aumentar el grado de desempeño del asfalto para que éste pueda responder de manera más efectiva con los altos cambios de temperatura. También se recomienda proveer capas más permeables, tales como bases drenables.
- Adaptar la estructura. La erosión costera y las inundaciones pueden degradar las capas del pavimento, por lo que se recomienda mover la carretera o aumentar el nivel de la subrasante, o incluir estructuras de protección.
- Adaptar el drenaje. Para mantener niveles de saturación bajos se considera esencial proveer una subestructura para el drenaje lateral, así como la consideración de mezclas asfálticas porosas.
- Adaptar el mantenimiento. El cambio climático acelerará la tasa de deterioro de los pavimentos y requerirá un aumento de los trabajos de conservación, y por lo tanto habrá un aumento de los costos de mantenimiento.
- Adaptar normativas. Las normativas de diseño deben actualizarse para considerar el cambio climático como parte de su dimensionamiento y para la selección de los materiales.

Es muy importante para hacer frente al clima y su variabilidad que se adecuen las prácticas de diseño y gestión de pavimentos, para que estos puedan conservar correctamente su desempeño durante su vida de proyecto.

## 6. SELECCIÓN DE VARIABLES CLIMATICAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Derivado del análisis del clima y sus efectos en las diferentes capas del pavimento, se identificaron para cada una de las capas la propiedad mecánica mediante la cual se puede considerar el clima y su variabilidad en los métodos de diseño actuales, así como futuras adaptaciones del método mecánico-empírico para pavimentos.

El módulo dinámico se utiliza para calcular las deformaciones horizontales y verticales de una mezcla asfáltica y permite determinar la deformación permanente máxima dentro de cada capa y la ubicación del daño máximo por fatiga. La variable climática de mayor relevancia en su comportamiento es la temperatura.

Las variaciones horizontales y verticales en los tipos de suelo del suelo de cimentación, los contenidos de humedad, las densidades, la profundidad del nivel freático y la succión deben considerarse durante el proceso de diseño del pavimento. Es por ello que el módulo de resiliencia

es un parámetro mecánico importante para representar estas propiedades, así como su variación estacional para el caso del suelo de cimentación o subrasante.

La Tabla 1 resumen las variables climáticas seleccionadas en las cuales se pueden incorporar adecuadamente el clima y su variación climática.

Tabla 1. Variables climáticas para el diseño de pavimentos

<b>CAPA DEL PAVIMENTO</b>	<b>PROPIEDAD MECÁNICA</b>	<b>COMPONENTE AMBIENTAL</b>
<b>CARPETA</b>	Módulo dinámico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> </ul>
<b>BASE</b>	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido de agua / Humedad</li> </ul>
<b>SUB-BASE</b>	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido de agua / Humedad</li> </ul>
<b>SUELO DE CIMENTACIÓN</b>	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido de agua / Humedad</li> <li>• Grado de saturación</li> <li>• Succión</li> </ul>

El trabajo a seguir, es desarrollar las modelaciones mediante las cuales se puedan incorporar las condiciones climáticas históricas, actuales y futuras en un sitio, y que están se incorporen en los modelos de deterioro en los métodos de diseño de pavimento.

## 7. CONCLUSIONES

Los pavimentos deben ser construidos para que sean duraderos y resilientes, y que funcionen satisfactoriamente durante toda su vida útil, según lo especifica Li et al (2011). Por lo que el principal desafío que se tiene en todos los países es prolongar la vida de diseño y vida remanente de un pavimento, y esto implica realizar investigación en las diferentes etapas de un pavimento, tales como, el diseño, la construcción, y el mantenimiento.

El clima y el cambio climático debe ser incorporado a los métodos de diseño de pavimentos, y cada región/país debe considerar su propia metodología para hacerlo, ya que la información del clima y las proyecciones del cambio climático son diferentes para cada lugar.

Los factores ambientales que afectan los pavimentos se pueden clasificar en dos, externos e internos. Los factores externos que tienen especial influencia en el comportamiento y durabilidad de un pavimento es la temperatura y la precipitación, el nivel freático y los ciclos de congelamiento-deshielo, aunque este último es de bajo impacto en México. Por su parte, los factores internos que impactan en el desempeño de los pavimentos es la humedad, el drenaje en las capas y la infiltración. Para mejorar la calidad y durabilidad de los pavimentos flexibles, y mejorar el comportamiento de los pavimentos bajo la influencia del clima y el cambio climático, es necesario considerar indicadores que representen la influencia del clima en el diseño de los pavimentos de manera más específica y realista.

Los métodos mecánico-empíricos permiten considerar el clima de una manera más realista, ya que consideran la interacción entre el medio ambiente, los materiales, y las cargas asociadas al tránsito. Sin embargo, el método requiere la construcción de un modelo climático que permita alimentar las consideraciones locales, por lo que el método debe ser adaptado.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades para realizar la colaboración interinstitucional para el desarrollo de investigaciones entre el Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Adicionalmente se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, quien ha otorgado financiamiento a través de becas para la realización de este proyecto.

## 9. REFERENCIAS

- Ackah, F.S., Zhuochen, N. & Huaiping, F. (2021). *Effect of wetting and drying on the resilient modulus and permanent strain of a sandy clay by RLTT*. Int. J. Pavement Res. Technol. 14, 366–377. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0067-3>
- Ali, H. A.; Lopez, A. (1996). *Statistical Analyses of Temperature and Moisture Effects on Pavement Structural Properties Based on Seasonal Monitoring Data*. Transportation Research Record. Journal of Transportation Research Board. <https://doi.org/10.1177/0361198196154000107>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide for design of pavement structures*. ISBN 1-56051-055-2. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice*. ISBN 978-1-56051-423-7. Washington, DC.
- California Department of Transportation (CalTrans). (2004). *Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)*. Pavement Research Center. University of California.
- Chaia, G.; Van Stadenb, R.; Guana, H.; Kellya, G.; Chowdhury, S. (2014). *The impacts of climate change on pavement maintenance in Queensland, Australia*. Conference: TRA 5th Conference, Transport Research Arena 2014. Paris, France
- Corro Caballero, S.; Prado Ollervide, G. (1974). *Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible*. Series del Instituto de Ingeniería No. 325. UNAM. México, DF.
- Corro, S.; Magallanes, R.; Prado, G. (1981). *Instructivo para el diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras*. Series del Instituto de Ingeniería No. 444. UNAM. México, DF.
- Dawson A. (2014). *Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes*. In: Gopalakrishnan K., Steyn W., Harvey J. (eds) *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_4)
- Hu J, Wu S, Liu Q, García Hernández MI, Zeng W, Nie S, Wan J, Zhang D, Li Y. (2018). *The effect of ultraviolet radiation on bitumen aging depth*. Materials (Basel). 2018 May 7;11(5):747. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11050747>
- Johanneck, L.; Khazanovich, L. (2010). *Comprehensive Evaluation of Effect of Climate in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Predictions*. No. 2170, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 45–55. <https://doi.org/10.3141/2170-06>
- Larson, G.; Dempsey, B. J. (1997). *Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0*. Minnesota Department of Transportation Road Research Project. Final Report DTFA MN/DOT 72114. University of Illinois. USA.
- Li, Q.; Mills, L.; McNeil, S. (2011). *The Implications of climate change on pavement performance and design*. University of Delaware University Transportation Center (UD-UTC). Delaware, USA.
- Lu, D.; Tighe, S. L.; Xie, W. (2018). *Impact of flood hazards on pavement performance*. International Journal of Pavement Engineering, 21:6, 746-752.

<https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508844>

Lytton, R.L.; Pufahl, D.E.; Michalak, C.H.; Liang, H.S.; Dempsey, B.J. (1989). *An integrated model of the climatic effects on pavements. Final report*. Texas Transportation Institute. Texas A&M University. Report: FHWA-RD-90-033. Federal Highway Administration. USA.

Meagher, W.; Daniel, J. S.; Jacobs, J.; Linder, E. (2012). *Method for Evaluating Implications of Climate Change for Design and Performance of Flexible Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2305, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 111–120. <https://doi.org/10.3141/2305-12>

Mendoza Sánchez, J. F.; Alonso Guzmán, E. M.; Martínez Molina, W.; García Roa, A. (2021). *Influencia del clima en la vida útil de un pavimento*. Memorias del XI Congreso Mexicano del Asfalto.

Mills, B.; Tighe, S.; Andrey, J.; Huen, K.; Parm, S. (2006). *Climate change and the performance of pavement infrastructure in southern Canada: Context and case study*. IEEE EIC Climate Change Conference, Ottawa, ON, 2006, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277185>

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2008). *Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23098>

Plati, C. (2019). *Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review*. Construction and Building Materials Journal. Volume 211, 30 June 2019, Pages 539-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>

Scala, A. J. (1962). *Environmental factors in flexible pavement design*. Flexible pavement design Proceedings. Paper no. 66. Australian Road Research Board.

Sirin, O.; Gunduz, M.; Shamiyeh, M.E. (2019). *Assessment of pavement performance management indicators through analytic network process*. IEEE Transactions on Engineering Management. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2952153>

Solaimanian, M.; Bolzan, P. (1993). *Analysis of the integrated model of climatic effects on pavements*. Strategic Highway Research Program. Washington, DC.

Taylor, M.A.P.; Philp, M. L. (2015). *Investigating the impact of maintenance regimes on the design life of road pavements in a changing climate and the implications for transport policy*. Transport Policy, Volume 41, 2015, Pages 117-135. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.01.005>

Teltayev, B.B.; Suppes, E.A. (2019). *Temperature in pavement and subgrade and its effect on moisture*. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 13, March 2019, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.014>

Tighe, S.; He, Z.; Haas R. (2001). *Environmental Deterioration Model for Flexible Pavement Design: An Ontario Example*. Transportation Research Record 1755. Paper No. 01-2756.

Qiao, Y.; Flintsch, G. W.; Dawson, A. R.; Parry, T. (2013). *Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2349, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 100–107.

Qiao Y, Santos J, Stoner AM, Flinstch G. (2019). *Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States*. Journal of Industrial Ecology. 2020; 24:342–355 <https://doi.org/10.1111/jiec.12936>

Wistuba, M. P.; Walther, A. (2013) *Consideration of climate change in the mechanistic pavement design*. Road Materials and Pavement Design, 14:sup1, 227-241. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774759>

Zapata, C., Andrei, D., Witczak, M. W., & Houston, W. N. (2007). *Incorporation of environmental effects in pavement design*. Road Materials and Pavement Design, 8(4), 667-693. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690094>

## Evaluación física y mecánica del concreto de alto desempeño adicionado con aditivo base policarboxilato y sílice frente al agente despasivante io cloruro

A. Maldonado Huante<sup>1\*</sup>, E. M. Alonso Guzman<sup>2</sup>, N. Díaz Gonzalez<sup>2</sup>, H. L. Chávez Garcia<sup>2</sup>,  
M. A. Mondragón Ornelas<sup>2</sup>, M. A. Villanueva Guzman<sup>2</sup>, W. Martínez Molina<sup>2</sup>,  
V. A. Ramírez Carranza<sup>2</sup>.

\*Autor de Contacto: [antoniomh.civil@gmail.com](mailto:antoniomh.civil@gmail.com)

<sup>1</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH Morelia, Michoacán, México/ Laboratorio de materiales SICC INGENIEROS, México

<sup>2</sup> Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Michoacán, México

### RESUMEN

En esta investigación se analiza la acción del ion cloruro en las estructuras de concreto desde el punto de vista de la oxidación del acero en concretos tradicionales en comparativa con mezclas de concreto adicionadas con sílice y aditivos PCE con la finalidad de observar la variación de la vida útil y los recubrimientos de protección al acero en ambos casos. Hoy en día es cada vez más necesario utilizar concretos con características durables que garanticen un buen comportamiento mecánico frente a las sollicitaciones estructurales, pero que al mismo tiempo sea resistente a los agentes ambientales. Estos concretos denominados de alto desempeño son aquellos que presentan buenas características en estado plástico, facilitando su fabricación, trabajabilidad y colocación, y que en estado endurecido adquieren mejor comportamiento mecánico y de durabilidad respecto a un concreto tradicional. Por tanto, el estudio de este material con la incorporación de nuevas adiciones es fundamental para evaluar su desempeño y hasta qué punto es posible utilizar estas nuevas tecnologías en obras civiles que aún utilizan diseños de mezclas y armados de acero convencionales en zonas donde los agentes agresivos ambientales son dañinos para estabilidad de la estructura.

**Palabras clave:** estructuras; durabilidad; concreto; aditivo.



## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día es cada vez más común y necesario utilizar concretos con características duraderas que garanticen un buen comportamiento mecánico pero que al mismo tiempo sea resistente a los agentes ambientales a los que estará expuesto. Estos concretos denominados de alto desempeño son aquellos que, por sus características de colocación, curado, trabajabilidad, velocidad de hidratación, comportamiento mecánico, contenido de cemento, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad son superiores a los concretos tradicionales. Por tanto, el estudio de estos elementos con la incorporación de nuevas adiciones es fundamental para evaluar su comportamiento y hasta qué punto es posible utilizar estas nuevas tecnologías en obras civiles que aún utilizan diseños convencionales y acero armado.

## 2. PROCEDIMIENTO

Esta experimentación se basa en la comparación de dos mezclas de concreto, una denominada “control o testigo” diseñada con un  $f'c = 420\text{kg/cm}^2$  diseñada bajo la metodología del ACI y con una relación agua/cemento (a/c) de 0.3 y otra con la adición de fibras de acero ondulado en una proporción del 10% por m3 de concreto con la misma relación agua/cemento, ambas con el uso de un aditivo superplastificante del tipo PCE, con el cual se evaluó el desempeño mecánico mediante ensayos destructivos a especímenes cilíndricos de 10x20cm y a especímenes prismáticos de 15x15x50cm los cuales se ensayaron a esfuerzos a flexión y de tensión indirecta con una edad máxima de prueba de 60 días. Ya que se observó que los esfuerzos a compresión fueron relativamente similares entre ambas mezclas se omiten dichos resultados en este documento. Como ensayos no destructivos se evaluó la resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico con la finalidad de cuantificar directamente la velocidad de hidratación y su modelo de durabilidad utilizando la ecuación de tuutti con el fin de obtener numéricamente parámetros de espesores de recubrimiento en estructuras para enfrentar el ion cloruro en el tiempo denominado tiempo de iniciación de la corrosión, dichos espesores estarán en función de la velocidad de hidratación de la mezcla y de encontrar un factor numérico que describa este fenómeno en las mezclas analizadas.

## 3. ECUACIONES AUXILIARES EN LA EXPERIMENTACION

$$ti = \frac{X_{cl}^2 * \rho_{ef} * 0.0 * \left(\frac{tn}{t_0}\right)^q}{F_{exp}} * rb, cl \quad (1)$$

$$T = \frac{2P}{DL\pi} \quad (2)$$

$$R = \frac{PL}{b*d^2} \quad (3)$$

## 4. TABLAS REFERENTES A NORMA APLICABLE DE DURABILIDAD PARA CRITERIO DE CLASIFICACION.

A continuación, se presentan algunas referencias numéricas según la normativa mexicana para clasificación de concreto durable mediante ensayos no destructivos como lo son la velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

Tabla 1. Valores de velocidad de pulso ultrasónico y su descripción según la NMX-C-275-ONNCCE-2019.

Velocidad de pulso	Descripción
>4500 m/s	Durable
3500-4500 m/s	Alta calidad
2500-3500 m/s	Mediana calidad
<2500 m/s	Baja calidad

Tabla 2. Valores de resistividad eléctrica y su descripción según la NMX-C-530-ONNCCE-2017.

Resistividad	Descripción
>100-200KΩ-cm	concreto muy denso
50-100KΩ-cm	concreto con porosidad interconectada baja
10-50KΩ-cm	concreto con porosidad interconectada de consideración
<10KΩ-cm	concreto con porosidad interconectada excesiva

## 5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos a esfuerzos de flexión y de tensión indirecta que se obtuvieron en los especímenes de la mezcla llamada control en comparación de la mezcla adicionada con fibras de acero, dichos resultados se evaluaron a distintas edades de prueba, estos ensayos corresponden a elementos cilíndricos y prismáticos que corresponden a los mencionados esfuerzos.

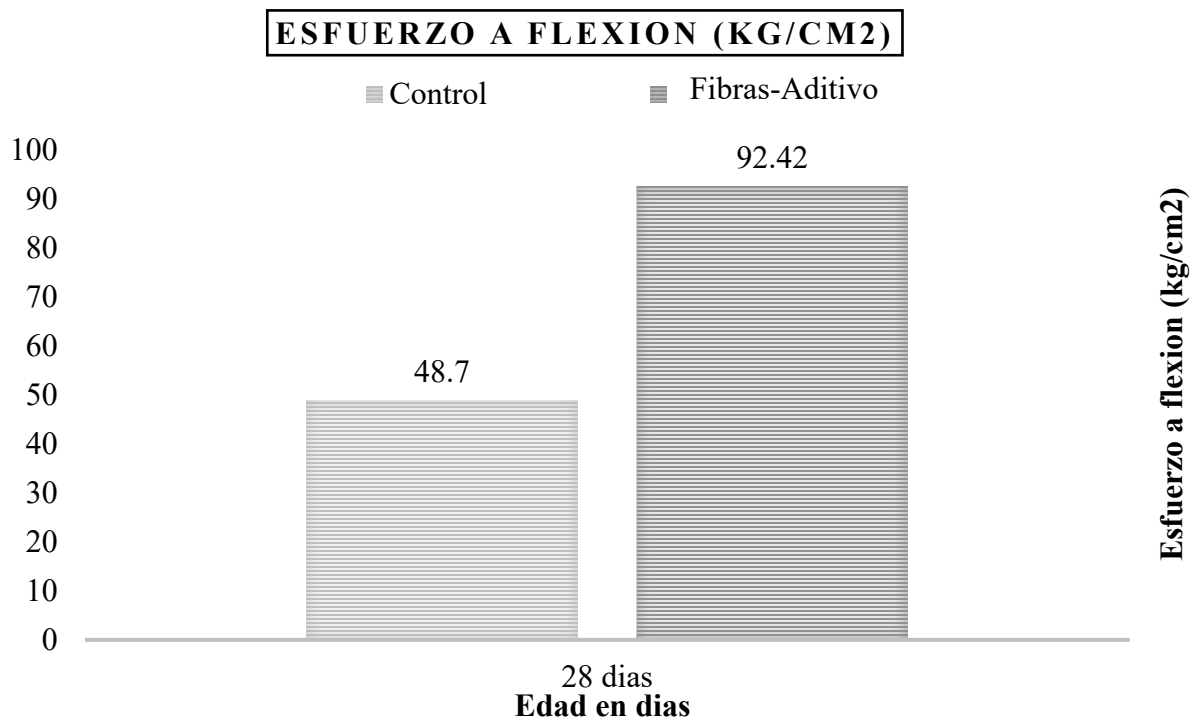


Figura 1. Comparativa de resultados de ensaye a flexión en la mezcla control vs la mezcla adicionada con fibras de acero. Dichos cálculos se obtuvieron con la aplicación de la ecuación (1).

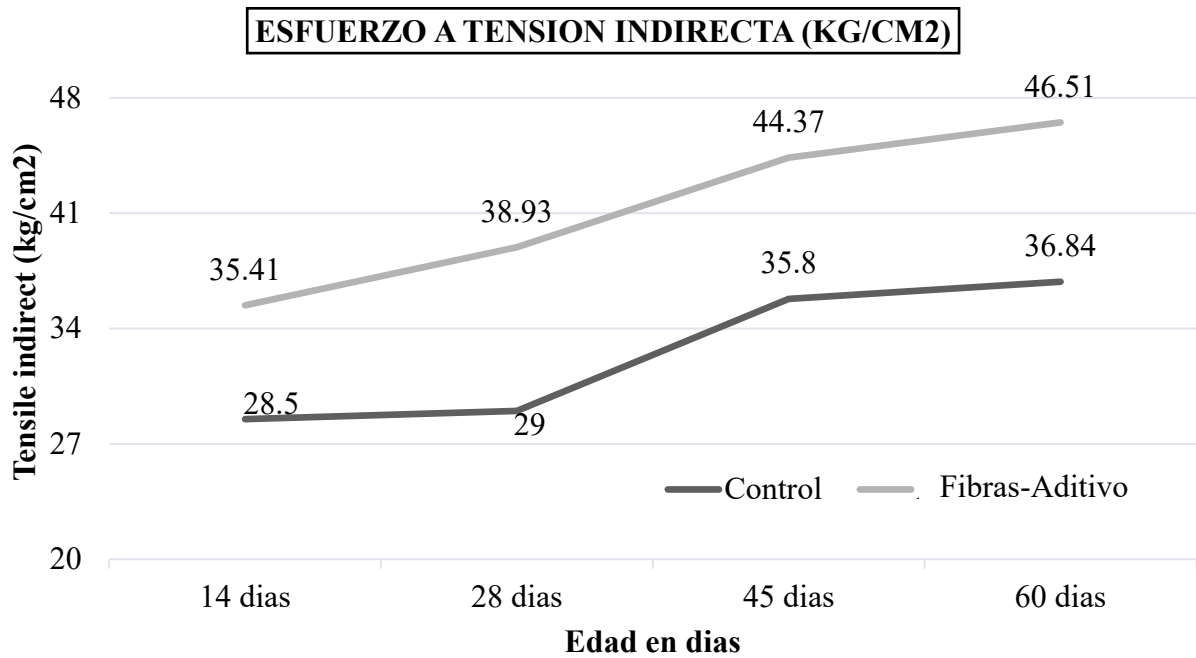


Figura 2. Comparativa de resultados de ensaye a tensión indirecta en la mezcla control vs la mezcla adicionada con fibras de acero. Dichos cálculos se obtuvieron con la aplicación de la ecuación (2)

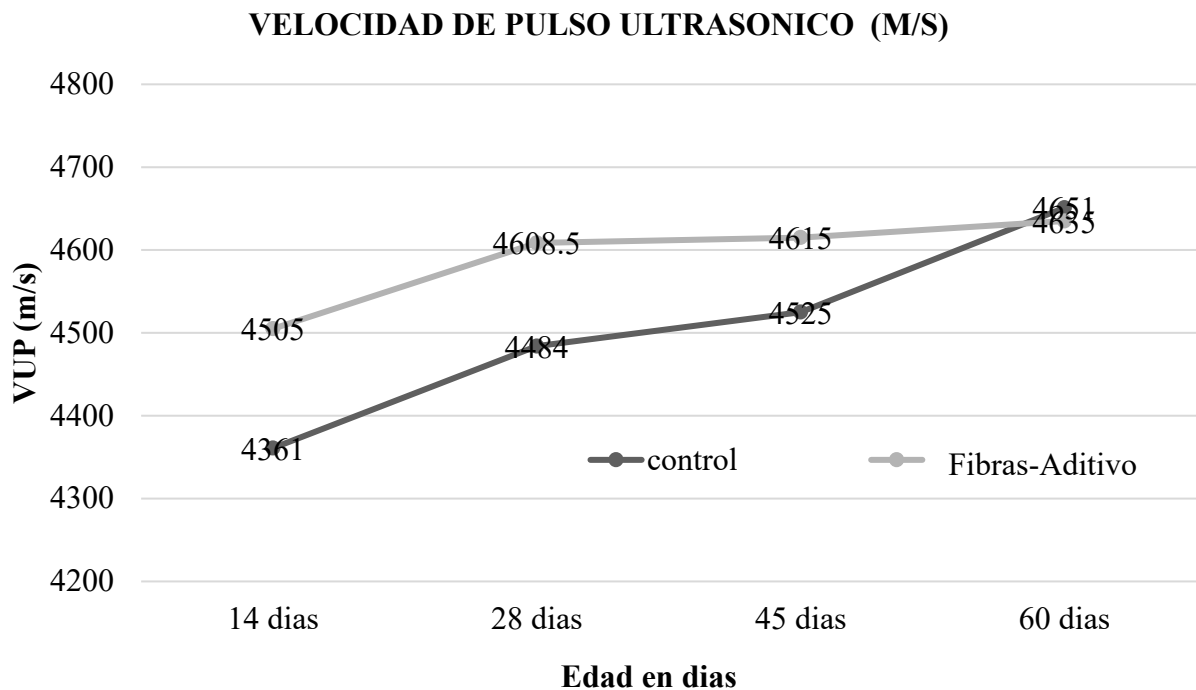


Figura 3. Comparativa de resultados del ensaye no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico en la mezcla control vs la mezcla adicionada con fibras de acero.

Una vez hecha la prueba de resistividad eléctrica a todos los especímenes se realizó una gráfica para cada mezcla para conocer la velocidad de hidratación de forma individual y de manera numérica para así también determinar el factor edad “q” implicado en la ecuación (1), dicho valor corresponde la pendiente de hidratación de la mezcla, las siguientes graficas se realizaron trazando

en el eje de las ordenadas la conductividad eléctrica que se calcula como el inverso de la resistividad y en el eje de las abscisas la edad en días.

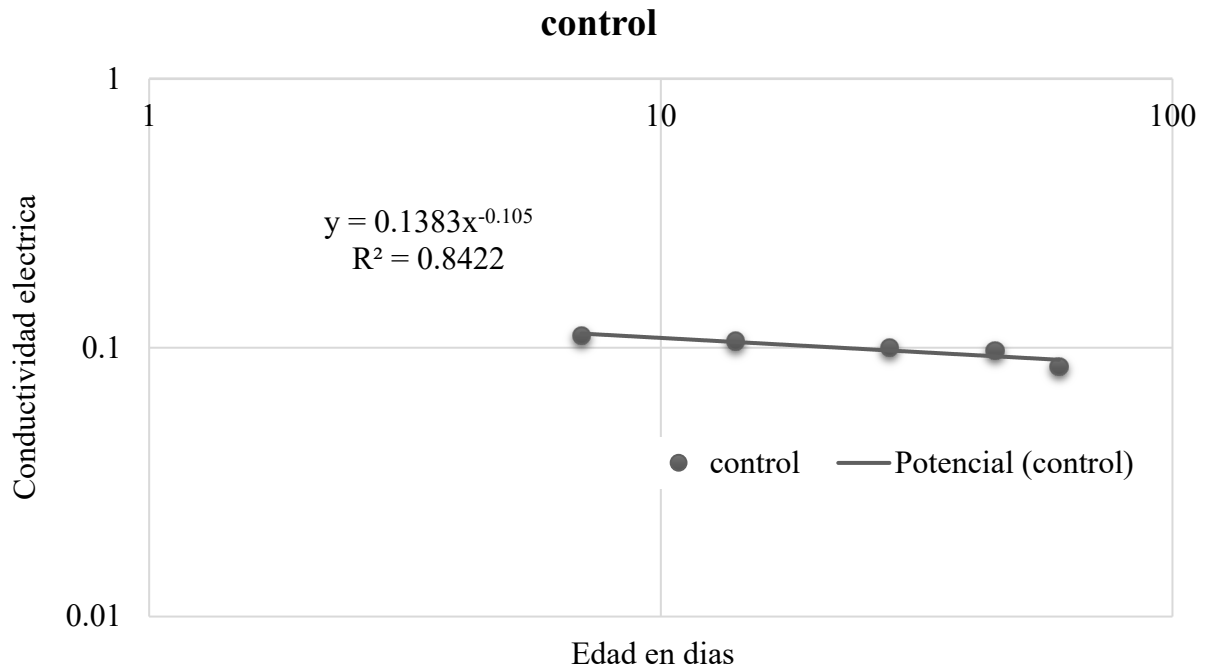


Figura 4. Grafica correspondiente a la velocidad de hidratación del factor edad para la llamada mezcla control obteniendo un factor “q” de 0.105.

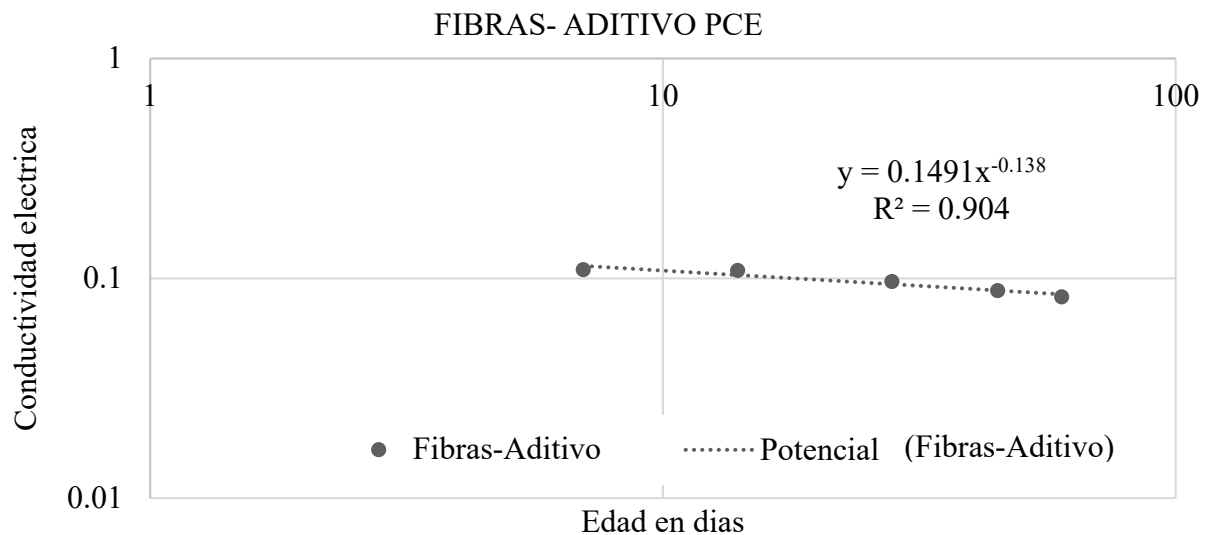


Figura 5. Grafica correspondiente a la velocidad de hidratación del factor edad para la mezcla adicionada con fibras obteniendo un factor “q” de 0.138.

Una vez aplicada la ecuación de tuutti para el cálculo de la vida útil de una estructura en condiciones de presencia del agente ion cloruro se procede a proponer los factores y a integrar el factor edad o de velocidad de hidratación junto con las variables que intervienen en dicha ecuación (1) para despejar el recubrimiento (x,cl) que protegerá al acero de refuerzo de dicho agente. Por condiciones de durabilidad se propuso un tiempo de iniciación de 100 años, es decir el tiempo que dicho ion tardara en penetrar a la estructura para llegar al acero de refuerzo.

Tabla 3. Valores de recubrimiento encontrados para las mezclas analizadas.

Mezcla	Factor Edad (q)	Factor exposición (F <sub>exp,cl</sub> )	Factor retardo (r <sub>b,cl</sub> )	Resistividad a 28 días ( $\Omega$ cm)	Tiempo de iniciación (años)	Recubrimiento X <sub>cl</sub> (cm)
Control	0.105	10000	1.5	10013.9	100	7.8
Fibras-Aditivo	0.138	10000	1.5	14598.5	100	6.4

## 6. CONCLUSIONES

Como se observó en las figuras 1 y 2 los resultados en ensayos destructivos correspondientes a esfuerzos a flexión y tensión son considerablemente mejores en la mezcla adicionada con fibras, debido a que alcanzó un incremento de 47.2% respecto de la mezcla control y un 20.8% correspondientes a esfuerzos a flexión y a tensión indirecta respectivamente, en cuestiones de criterios de durabilidad se observa que ambas mezclas incorporadas con aditivo PCE alcanzan el umbral de clasificación de durable según la tabla 1 que corresponde a la velocidad de pulso ultrasónico, esto se debe a la baja relación agua/cemento que se utilizó en dicha experimentación, ya que bajas cantidades de agua reducen la presencia de vacíos en el concreto y la incorporación del aditivo mejora la reología de la mezcla sin comprometer la baja relación de agua/cemento.

Por otra parte, en la metodología del cálculo de recubrimientos necesarios se aprecia que la mezcla control requiere un 18% más de recubrimiento, que se traduce en 1.4cm mas de concreto para proteger el acero de refuerzo de una estructura, estos espesores podrían verse más disminuidos con la adición de materiales cementantes que incrementen la resistividad eléctrica de los elementos y por lo tanto se vea modificada su velocidad de hidratación.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH Morelia, Michoacán, México/  
Laboratorio de materiales SICC INGENIEROS, México

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También agradecen el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

## 8. REFERENCIAS

- Gallo-Arciniegas, L. P., González Peñuela, G., & Carrillo León, J. (2013). *Comportamiento de concreto reforzado con fibras de acero*.  
Normas Mexicanas. (NMX). *NMX-C-275-ONNCCE-2019 – Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto*.  
Normas Mexicanas. (NMX). *NMX-C-530-ONNCCE-2017 – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado*.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-808-MX  
pp. PC – 115– 130



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Recarbonatación de estructuras de concreto reforzadas realcalinizadas bajo la norma NMX-C-553-ONNCCE-2018

J. A. Paat Estrella<sup>1\*</sup>, J. A. Miam Cuevas<sup>2</sup>, M. Y. del Pilar Reyes<sup>3</sup>, E. E. Maldonado Bandala<sup>4</sup>,  
T. Pérez López<sup>5</sup>, D. Nieves Mendoza<sup>4</sup>

\*Autor de Contacto: [josapaae@uacam.mx](mailto:josapaae@uacam.mx)

<sup>1</sup> Facultad de Mecánica y Eléctrica campus Xalapa-Veracruz. Universidad Autónoma de Campeche, México

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Campeche, México.

<sup>3</sup> Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Estado de México, México.

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Xalapa-Veracruz, México.

<sup>5</sup> Centro de Investigación en Corrosión, Campus 6, Universidad Autónoma de Campeche, México.

### RESUMEN

Se evaluó el proceso de recarbonatación de estructuras de concreto reforzado y realcalinizadas electroquímicamente a una intensidad de corriente de 1 A/m<sup>2</sup> por 28 días durante los 24 meses siguientes. Se elaboraron 66 muestras de concreto de 15 cm x 30 cm con acero de refuerzo, sometidas a carbonatación acelerada por un periodo de seis meses, para posteriormente realcalinizar bajo los parámetros establecidos en la norma NMX-C-553-ONNCCE-2018, realizando mediciones de potencial de media celda (Emc), pH y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE) durante el tiempo de realcalinización y posteriormente cada mes hasta completar dos años. Los resultados mostraron que durante el proceso de carbonatación el pH disminuyó gradualmente, de 13 a un pH de 9, coincidiendo con el valor del potencial de corrosión que disminuyó su valor inicial de -120 mV hasta aproximadamente -650 mV. El seguimiento del Emc y EIE demostraron que las varillas embebidas en concreto sometidas a un proceso de carbonatación acelerada presentaron despasivación, mismas que recuperaron el valor de pH a valores cercanos a 12 al someterlas a realcalinización electroquímica. Sin embargo, durante los meses siguientes este valor disminuyó considerablemente a pH próximos a 8, aumentando con ello la profundidad de recarbonatación aproximadamente a 2 cm.

**Palabras clave:** Realcalinización electroquímica; recarbonatación; pH; espectroscopía de impedancia electroquímica.

## 1. INTRODUCCIÓN

El acero embebido en el concreto se encuentra protegido contra la corrosión gracias al elevado carácter alcalino del concreto, sin embargo determinados factores pueden destruir esta capa protectora provocando la corrosión activa del acero. Los dos factores principales que pueden provocar esta situación son la presencia de iones agresivos (principalmente los cloruros) y la carbonatación del concreto (Montani, R., 2000).

La carbonatación es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado, debido a que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un componente que se encuentra de forma natural en la atmósfera. Este compuesto no solo modifica la estructura del concreto al modificar sus propiedades, sino que también tiene una influencia decisiva sobre la velocidad de corrosión del concreto reforzado (Stolte, E y Bohnenkamp, K., 1976).

El concreto es un material altamente alcalino con un pH entre 12,6 y 13,8, debido a los hidróxidos de calcio, sodio y potasio que se encuentran presentes en la matriz del concreto. Bajo estas condiciones de pH, el acero que se encuentra embebido dentro del concreto forma espontáneamente una capa pasiva que, aunque es de pocos nanómetros de espesor muestra una acción protectora hacia el acero de refuerzo (Bertolini, L., *et al.*, 2004). Sin embargo, esta capa puede ser destruida por agentes agresivos tales como los iones cloruro y/o el dióxido de carbono, lo que produce una despasivación del acero de refuerzo y por lo tanto un proceso de corrosión (Aguirre, A. M. y Mejía de Gutiérrez, R., 2013).

Dentro de las técnicas que se utilizan para evaluar el proceso de corrosión, se encuentran las mediciones electroquímicas de potencial de media celda (Emc) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE), que forma parte de las técnicas no destructivas. El Emc se encuentra estandarizada bajo la norma ASTM C876-91, aplicable para la evaluación in situ, e independiente del tamaño del refuerzo y de la profundidad dentro de la pasta de concreto (Rodríguez, G, *et al.* 2013). Las áreas donde hay corrosión son identificadas por medio de potenciales muy negativos, mientras que en zonas donde no hay corrosión los valores son menos negativos. El valor de este potencial puede relacionarse con la probabilidad de que la barra de acero se encuentre o no en un proceso de corrosión.

Sin embargo, es posible rehabilitar o prevenir la corrosión utilizando el método de realcalinización electroquímica, técnica que se ha utilizado para recuperar la alcalinidad del concreto cerca de la región del refuerzo. La ventaja de este método es que cuando finaliza el tratamiento, el sistema puede desmontarse y la estructura de concreto puede seguir su función sin mayores intervenciones destructivas como en el tratamiento convencional de reparación de parches.

Existen estudios sobre el tratamiento de realcalinización que se centran en comprender las características del fenómeno, tales como mecanismos de transporte involucrados, eficiencia en la repasivación del refuerzo, eficiencia de diferentes electrolitos en la realcalinización, efectos sobre las propiedades del concreto y así como los efectos secundarios, demostrando la capacidad de esta técnica para recuperar los niveles de pH protectores, e incluso que después de algunos años, la alcalinidad se mantiene en niveles altos, lo que es suficiente para proteger el refuerzo.

Esta técnica se basa en la aplicación de un campo eléctrico al sistema acero-concreto entre el acero de refuerzo, que actúa como cátodo y un ánodo colocado sobre la superficie del concreto inmerso en un electrolito, con el objetivo de inducir determinados procesos a nivel de la matriz de concreto, así como de la interfase. A nivel local, en las inmediaciones de la interfase acero-concreto, el pH aumenta y las condiciones (relativas al concreto) que inducen la pasivación del acero pueden ser regeneradas. Es importante reconocer, que algunos de los fenómenos que ocurren paralelamente contribuyen en la realcalinización; a pesar de no estar directamente asociados con el campo

eléctrico (Ihekwa, N. M. 1996). Esta corriente eléctrica suministrada generalmente es de  $1 \text{ A/m}^2$  aplicada durante periodos de 7 a 28 días en una solución 1 M de carbonato de sodio (Pollet, V. 1997).

Sin embargo, a pesar de que esta técnica permite recuperar el pH del concreto que protege al acero de refuerzo, el dióxido de carbono se encuentra de forma natural en el ambiente, lo que daría lugar a una recarbonatación del concreto y una despasivación del acero, iniciando nuevamente el proceso de corrosión. Por lo que, el objetivo de este proyecto es dar seguimiento a muestras de concreto reforzado que fueron previamente realcalinizadas, con la finalidad de demostrar el tiempo en el que el concreto se vuelve a carbonatar.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Diseño y elaboración de muestras

Se elaboraron 66 muestras de concreto con acero de refuerzo de 3/8" y 18 sin acero, con dimensiones de 15 cm x 30 cm. En esta primera etapa se cortaron las varillas con una longitud de 50 cm y posteriormente se limpiaron con una solución de HCl 1:1, cubriendo 17.5 cm de cada extremo con cinta aislante y dejando un área central de trabajo de  $15 \text{ cm}^2$ , como se muestra en la figura 1.

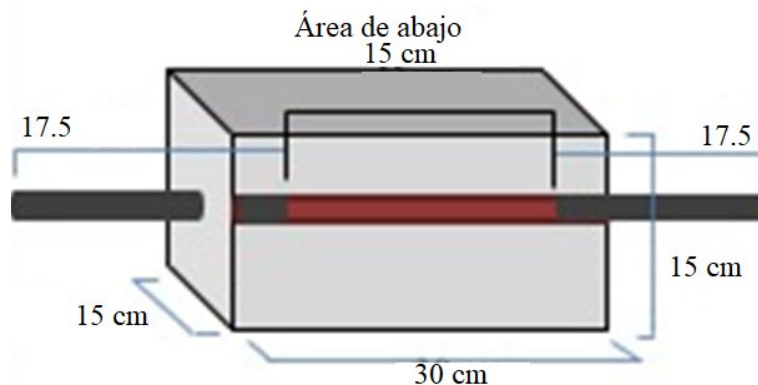


Figura 1. Características de las muestras elaboradas.

El diseño de mezcla se realizó de acuerdo con lo establecido en la ACI (American Concrete Institute) 211.1, con una relación de a/c de 0.6, utilizando cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida (CPC 30R), con un peso específico de  $3,150 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.2 Carbonatación

Con el fin de lograr una mayor carbonatación en menor tiempo, las muestras fueron colocadas en una cámara de carbonatación acelerada, debido a que la carbonatación en condiciones naturales es un fenómeno lento desde el punto de vista técnico. Durante los ensayos acelerados, las muestras de concreto se sometieron a un ambiente con una concentración de  $\text{CO}_2$  de  $4 \pm 0.5 \%$ , de acuerdo con las pruebas realizadas por Turcry, Oksri-Nelfia, Younsi, & Aït-Mok en el 2014, y con una humedad relativa entre  $60 \pm 5\%$ . Se ha propuesto que con ensayos acelerados a concentraciones de  $\text{CO}_2$  del 4% se produce en una semana la misma profundidad de carbonatación que concentraciones normales (0.03%) en un año (Moreno, M., *et al*, 2004).

### 2.3 Profundidad de carbonatación

El avance de carbonatación y recarbonatación se determinó mediante el método de vía húmeda con los indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína, utilizando como muestras "testigo", los



especímenes que se elaboraron sin acero de refuerzo. Esta prueba consistió en realizar un corte transversal a la viga de aproximadamente 4 cm de espesor, retirando todo el material suelto de la cara interna con una brocha, aplicando inmediatamente los indicadores de forma uniforme, utilizando un atomizador para una mejor distribución. Por último, se midió cada uno de los lados carbonatados.

## 2.4 Realcalinización electroquímica

Se seleccionaron 27 muestras para someter a RAE, se reforzó la pintura de las bases para que el carbonato de sodio penetrara solo por los lados de la viga. Posteriormente se cubrió cada una de las muestras con malla de acero galvanizado, que sirvió de ánodo durante la RAE (Figura 2b), se acomodaron de forma vertical en un recipiente plástico con la capacidad suficiente, al cual se le perforó un orificio en la base, para dejar al descubierto un lado de la varilla y no sea afectada por el electrolito de inmersión (carbonato de sodio 1M) (Figura 2a).

Se utilizó una conexión en paralelo a una intensidad de corriente de  $1 \text{ A/m}^2$  durante 28 días, de acuerdo con lo establecido en la NMX-C-553-ONNCCE-2018, mediante un dispositivo de distribución eléctrica que mantuviera un flujo eléctrico constante conectadas a una fuente de poder (Figura 2c).

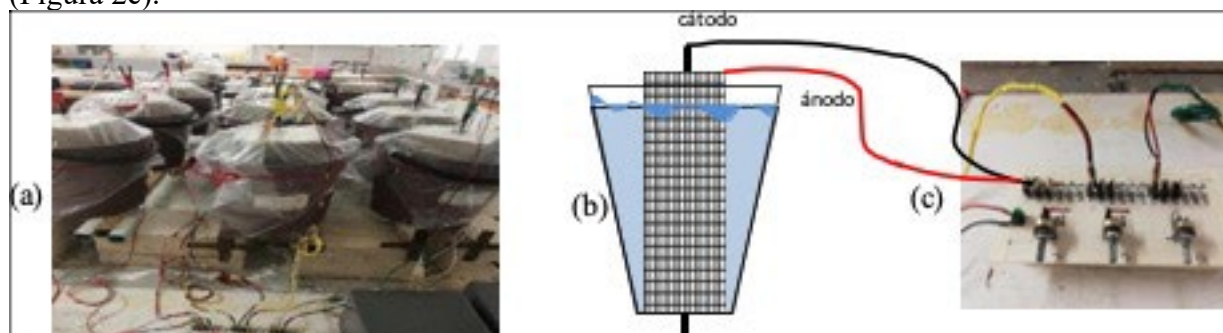


Figura 2. (a) Montaje experimental usado para la RAE, (b) Viga con refuerzo (cátodo), cubierta de malla de acero galvanizado (ánodo), sumergida en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (electrolito), conectada al dispositivo de distribución de corriente, (c) Dispositivo de distribución de la corriente.

## 2.5 Determinación de pH

Durante los 28 días de la RAE, se monitoreó el pH en la interfase concreto-acero y de la pasta de concreto por el método de los indicadores (ver apartado 2.3). Para llevar a cabo estas mediciones se interrumpía el paso de corriente eléctrica cada 7 días a partir del día de inicio de la RAE, como mencionan varios autores (Ton, Y., *et al* 2012, Yeih, W., y Chang, J., 2005). A cada muestra se le extrajeron núcleos y muestras de polvo sobre los 15 cm de varilla descubierta, utilizando una broca hueca de 1.5" de diámetro y 7 cm de longitud acoplada a un taladro (Figura 3). Durante la extracción, se determinó profundidad y pH de cada viga expuesta a realcalinización, mediante el método húmedo utilizando como indicadores fenolftaleína (vire entre 8.2 -10) y timolftaleína (vire entre 9 -10.5). La medición se realizó obteniendo un promedio del frente de carbonatación a partir de la superficie de la muestra. Adicionalmente, se determinó el pH a la profundidad de la superficie de la varilla en muestras extraídas de las muestras, mediante el método potenciométrico, establecido en la ASTM D4262–05 (2018) Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces, que determina el nivel de alcalinidad del concreto, por medio de una disolución de polvo de concreto con agua destilada.



Figura 3. Extracción de cilindros y muestras de polvo.

## 2.6 Potencial de media celda (Emc)

El seguimiento de la condición termodinámica superficial del refuerzo está basado principalmente en mediciones del potencial de media celda, que está relacionado con el estado activo o pasivo del acero de refuerzo. Esta medición consistió en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia (Cu/CuSO<sub>4</sub>) que se coloca en la superficie del concreto (American Society for Testing and Materials, 2016), ASTM C-876-15, NMX-C-495-ONNCCE-2015.

## 2.7 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica, se determinó después del proceso de carbonatación, cada 7 días, en cada una de las series hasta completar los 28 días y posteriormente cada mes hasta completar un periodo de 24 meses, con el objetivo de monitorear los posibles cambios que pudieran sufrir las estructuras de concreto reforzado después de la aplicación de la RAE. Durante este tiempo, las muestras se mantuvieron en condiciones de laboratorio, es decir, a 25°C de temperatura y 50% de humedad relativa.

Para llevar a cabo el seguimiento electroquímico se empleó un electrodo saturado de calomel como referencia, una placa de acero inoxidable como electrodo auxiliar o contraelectrodo, y un potenciostato VersaSTAT 4 conectado a un equipo de cómputo para el registro de los datos. Estos experimentos se llevaron a cabo realizando un barrido en intervalo de frecuencia de 100000 a 0.002 Hz (Figura 4). Debido a la elevada resistividad del concreto sobre todo cuando está seco, se procedió a humedecer de forma homogénea la superficie sobre la que se realizaron las mediciones

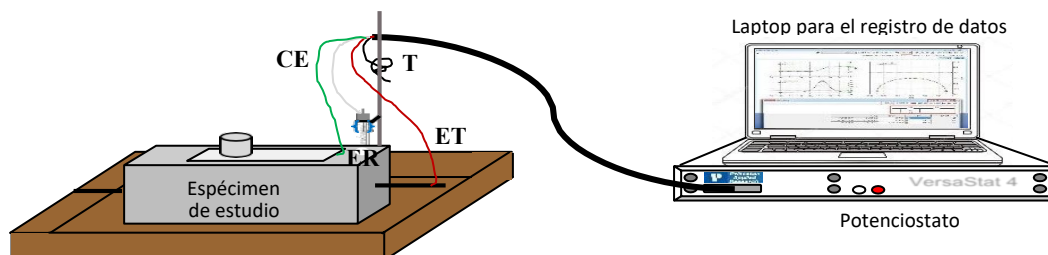


Figura 4. Equipo de trabajo, (CE, Contraelectrodo; ER, electrodo de referencia; ET, Electrodo de trabajo; T, Tierra).

## 3 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados experimentales de la realcalinización electroquímica de muestras reforzadas con una profundidad de carbonatación de 6.7 cm. Se presentan resultados de pH, profundidad de carbonatación, E<sub>mc</sub> y EIE.

### 3.1 Carbonatación

Este proceso de degradación química o deterioro del concreto por CO<sub>2</sub> se llevó a cabo durante un periodo de seis meses. La figura 5 muestra la medición del avance de la carbonatación con respecto al tiempo, utilizando los indicadores ácido-base conforme a la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016. Se aprecia una tendencia lineal en el avance de la carbonatación con el transcurso del tiempo de exposición.

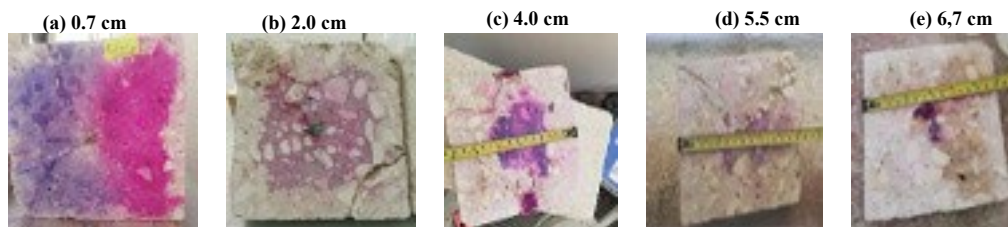


Figura 5. Profundidad de carbonatación, (a) mes 1, (b) mes 2, (c) mes 4, (d) mes 5, (e) mes 6.

#### 3.1.1 Determinación de pH

El objetivo de carbonatar las muestras previo al proceso de RAE fue disminuir el pH y poder recuperarlo mediante la realcalinización para observar los efectos causados por esta recuperación. El valor promedio de pH que se obtuvo fue de 8, lo que coincidió con lo establecido por Aguirre, A. M., *et al* (2016) y Ribeiro, P.H.L.C., *et al* (2013) quienes determinaron que el pH de la solución de poro en las zonas prácticamente carbonatadas oscilaba entre 11.5 y valores por debajo de 9 (Figura 6).

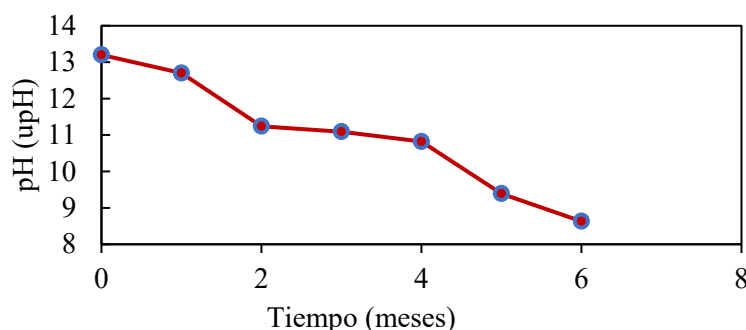


Figura 6. Valores de pH obtenidos durante el proceso de carbonatación.

#### 3.1.2 Potencial de media celda

Una vez completado el proceso de degradación química acelerada del concreto, se determinó el potencial de media celda del acero de refuerzo embebido en el concreto, esta medición representó la magnitud que indicó la probabilidad de corrosión o pasividad del mismo. Se obtuvo un valor promedio del potencial igual a -650 mV. De acuerdo a los valores establecidos la Norma ASTM C-876 (Tabla 1), valores más negativos a -350 mV, presentan el 90 % de riesgo de que exista corrosión, lo que confirmó la efectividad de la carbonatación.

Tabla 1. Valores establecidos de potencial en la norma ASTM C876-91.

Potencial Norma ASTM C-876	Riesgo de que exista corrosión	Potencial promedio de las muestras
más positivos que -200 mV	10%	Después de la carbonatación  -650 mV
entre -200 y -350 mV	Incertidumbre	
más negativos a -350 mV	90%	

En la Figura 7 se muestran las gráficas de pH al nivel del acero de refuerzo y E<sub>corr</sub>, mostrando que durante el proceso de carbonatación el pH disminuyó gradualmente, de un pH aproximado a 13 a un pH de 9 en la proximidad de la varilla, Como se observa en la gráfica 2 las gráficas de pH y E<sub>corr</sub>, muestran que durante el proceso de carbonatación el pH disminuyó gradualmente, de un pH aproximado a 13 a un pH de 9 en la proximidad de la varilla, coincidiendo con el valor del potencial de corrosión que disminuyó su valor inicial de -120 mV hasta aproximadamente -700 mV, y de acuerdo con la norma ASTM C-876-91, estos valores se encuentran por debajo del valor establecido de -350 mV con una probabilidad del 90 % de riesgo de que haya corrosión.

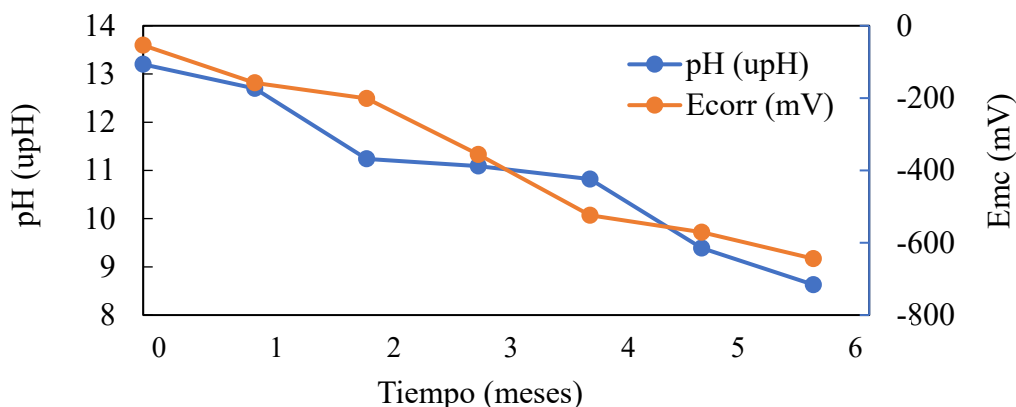


Figura 7. Seguimiento de pH y E<sub>corr</sub>.

A diferencia de la carbonatación natural, en donde los datos de CO<sub>2</sub> en función del tiempo se ajustan en su mayoría a funciones exponenciales, la carbonatación en cámaras de carbonatación acelerada presentó un comportamiento lineal. Este tipo de comportamiento en la cámara de carbonatación acelerada, se presenta debido a la cantidad de humedad que contienen los poros del concreto, ya que velocidad a la que progresa la carbonatación depende de la penetración del CO<sub>2</sub> que está determinada por la forma de la estructura de los poros y por el volumen de ellos que está ocupando por la disolución poro del concreto, ya que la velocidad de difusión del CO<sub>2</sub> en agua es 10<sup>4</sup> veces más lenta que la velocidad de difusión del mismo en el aire (Del-Valle-Moreno, A., *et al.*, 2001).

### 3.2 Realcalinización Electroquímica

#### 3.2.1 Profundidad de RAE y pH

En los primeros 7, 14 y 21 días de realcalinización (Figuras 8, 9 y 10), las muestras presentaron un ligero vire de coloración a rosa y violeta en los primeros tres centímetros de profundidad, debido a los indicadores fenolftaleína (vira a rosa a pH 8.2 intensificándose el color a > pH) y timolftaleína (vira a violeta a pH 9.2 intensificándose el color a > pH), respectivamente. A los 28 días de

realcalinización (Figura 11), se obtuvo un incremento superior a 11 (Figura 12), alcanzando el objetivo de la realcalinización electroquímica. A partir del día 21, tanto la RAE interna como la externa se observan a lo largo de los 7 cm de profundidad.

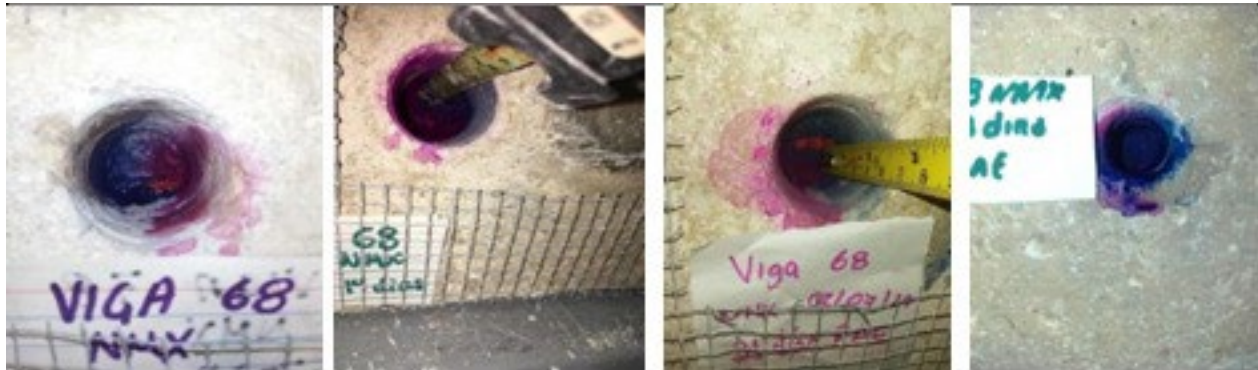


Figura 8. 7 días de RAE.

Figura 9. 14 días de RAE.

Figura 10. 21 días de RAE.

Figura 11. 28 días de RAE.

Las muestras realcalinizadas bajo los criterios de la NMX-C-553-ONNCCE-2018 correspondiente a  $1 \text{ A/m}^2$  de intensidad de corriente no presentaron aumento considerable en el pH durante los primeros 7 días de realcalinización, lo que de acuerdo con Aguirre-Guerrero, A., y Mejía de Gutiérrez, R., (2018).

Esta recuperación de pH se presentó en dos direcciones (Figuras 8, 9 y 10), 1) desde el acero de refuerzo hacia la superficie interna (RAE interna), debido a la producción de alcalinidad inducido por la aplicación de la corriente catódica y, 2) desde la superficie del concreto hacia el acero de refuerzo (RAE externa) debido a la penetración de la solución alcalina en contacto con el sistema anódico (Redaelli, E. & Bertolini, L., 2011).

En cuanto a los resultados de pH obtenidos en muestras de polvo de concreto tomadas de la interfase acero-concreto, los resultados promedio de las tres intensidades de corriente se presentan en la Figura 12. En esta figura se observa una recuperación del pH al final del proceso de RAE presentando valores entre 11 y 12 unidades de pH.

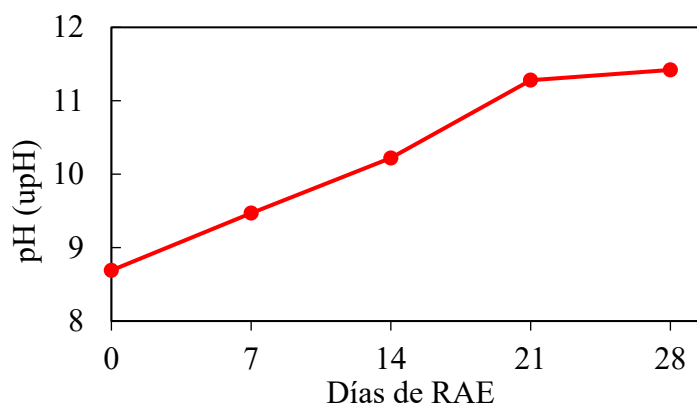


Figura 12. Valores de pH obtenidos durante los 28 días del tratamiento de la RAE.

Este incremento de pH alrededor del acero embebido es ocasionado por los iones hidroxilo que se generan en el cátodo. El electrolito alcalino penetra de la superficie hacia el interior de los poros del concreto, lo que brinda al concreto protección ante una pérdida de pH al inicio del proceso de

corrosión. De acuerdo con Bertolini, L., *et al.*, (1996), el paso de corriente a través del concreto entre el dispositivo y el acero provoca una disminución del potencial de las armaduras (se hace más catódico), reacciones electroquímicas en la superficie del ánodo y del acero y electrodifusión (migración) de iones en la solución de los poros del concreto. Además de que se presentan modificaciones químicas inducidos por las reacciones anódicas y catódicas y por la electrodifusión.

### 3.2.2 Potencial de media celda

Durante el proceso de RAE, se observó que el acero embebido mantuvo potenciales de corrosión muy negativos (menores a -350 mV), lo que de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C876-91 corresponde a un 90% de probabilidad de corrosión. Estos valores indican que el acero de refuerzo se mantuvo en un estado activo durante los 28 días de realcalinización electroquímica. En la figura 13 se observa el comportamiento del potencial de media celda que presentaron las muestras, alcanzando valores  $>-900$  mV, debido a la fuerte polarización catódica (Redaelli, E., & Bertolini, L., 2011). De las tres normatividades empleadas, fueron las muestras bajo condiciones de la NMX las que presentaron valores más bajos de  $E_{corr}$ . Sin embargo, el acero embebido en el concreto se mantuvo activo durante todo el proceso de la realcalinización electroquímica. Después del tratamiento, el E<sub>mc</sub> alcanzó valores superiores a -200 mV, lo que representa un decremento en la probabilidad de corrosión de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C876-91, lo que de acuerdo con Redaelli, & Bertolini, (2011), representa efectividad en el tratamiento y sugiere que el acero de refuerzo ha sufrido repasivación.

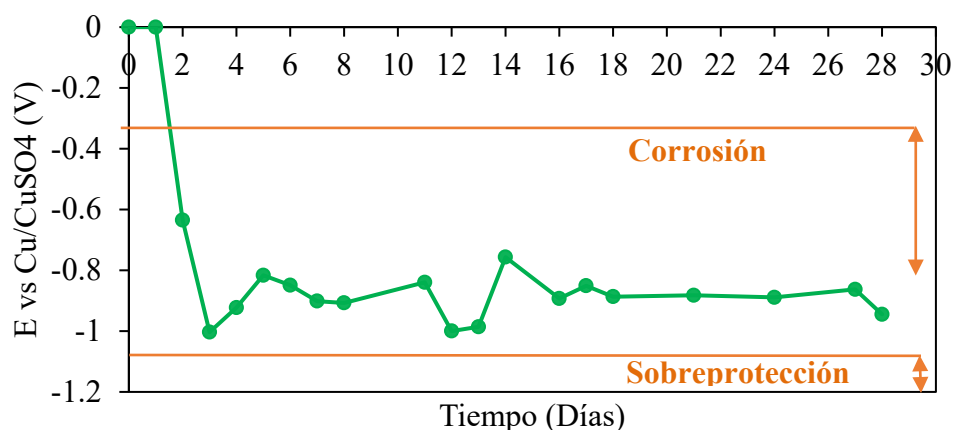


Figura 13. Valores promedio de potenciales (V) durante los 28 días de RAE sometidos a tres diferentes intensidades de corriente.

Sin embargo, estos valores no llegan a la región de sobreprotección, por lo que no representa riesgo de producir hidrógeno y por lo tanto, fragilidad en el acero.

### 3.2.3 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica

#### 3.2.3.1 Diagramas de Nyquist y Bode antes, durante y después de la carbonatación

La Figura 14, muestra el seguimiento electroquímico del estado de corrosión de la varilla de acero embebida en el concreto. Estos resultados se obtuvieron de las vigas de concreto con una relación  $a/c = 0.6$  en tres condiciones, sin carbonatar, durante el proceso de carbonatación y al término de este proceso.

Durante las condiciones mencionadas anteriormente se observan cambios en la forma y magnitud de los parámetros en las gráficas de Nyquist y de Bode. En la Figura 14(a) se muestra el gráfico de la viga después de 28 días de curado y sometidas a secado por un mes a una temperatura de 40°C

antes de ser sometidas al proceso de carbonatación, en el diagrama de Nyquist se aprecia una respuesta descendente en el gráfico de Nyquist en altas frecuencias, lo que corresponde a la respuesta de un material dieléctrico. Esto es debido a que la cantidad de agua es mínima y predomina el efecto dieléctrico del concreto.

En las muestras durante la carbonatación y después de la carbonatación, el material se ve afectado por este, lo que se puede observar por las propiedades electroquímicas que van disminuyendo comparados con el espectro de las muestras antes de carbonatar. Se observa también que el valor de la resistencia del concreto en los dos niveles de carbonatación es muy similar, lo que indica que la resistencia de poro del concreto, presenta una tendencia a mantenerse constante, pero con valores menores al concreto sin carbonatar, lo que confirma que el proceso de carbonatación ha ocasionado cambios en la matriz del concreto y por lo tanto, el concreto durante y después de ser sometido a un proceso de carbonatación induce con mayor facilidad un proceso corrosivo sobre el acero de refuerzo.

En cuanto a los diagramas de Bode (Figura 14b), el diagrama de log frecuencia vs  $|Z|$  muestra una tendencia a formar una horizontal en frecuencias bajas, mientras que el diagrama de log frecuencia vs ángulo de fase ( $\theta$ ) presenta valores entre -10 y -30 grados para las muestras analizadas durante el proceso de carbonatación y al finalizar el mismo, las muestras antes de la carbonatación presentaron valores por debajo de -10 grados. Este es un comportamiento resistivo entre los diferentes procesos mostrados en estos diagramas, confirmando que la presencia (reacciones de hidratación) o ausencia de humedad en los poros puede causar desequilibrios composicionales, disminuyendo sus propiedades electroquímicas, y que de acuerdo con el tiempo de carbonatación se va llevando a cabo la pasivación del acero de refuerzo.

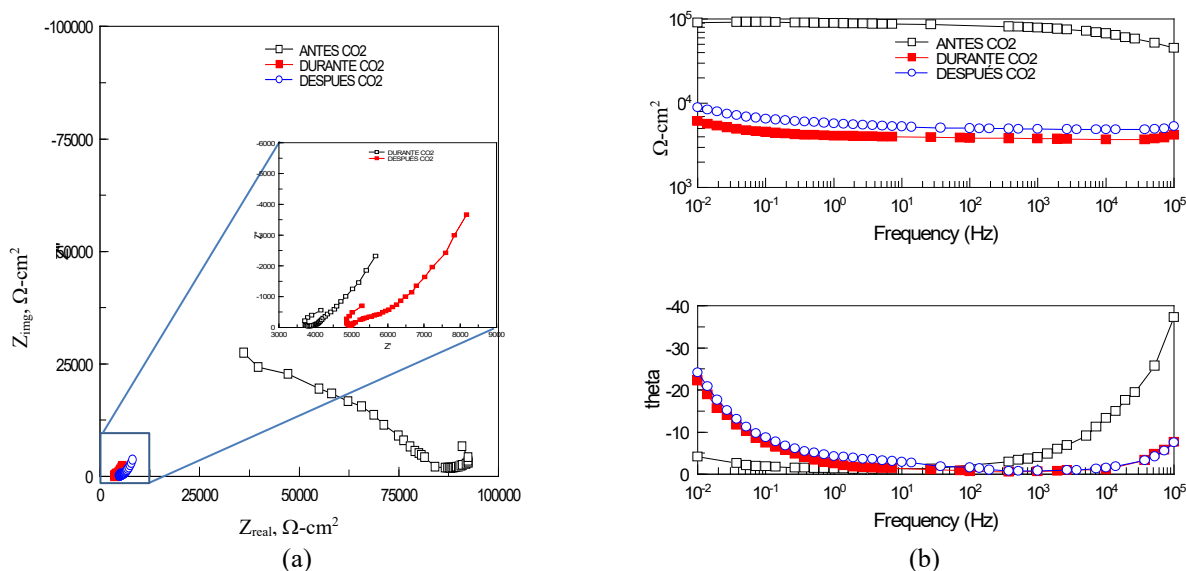


Figura 14. Gráfica de Nyquist (a) y de Bode (b) de las vigas antes, durante y después de la carbonatación.

### 3.2.3.2 Diagramas de Nyquist y Bode de muestras realcalinizadas durante 7, 14, 21 y 28 días de RAE

En la Figura 15, se presentan los resultados del comportamiento electroquímico obtenido de las varillas embebidas en muestras realcalinizadas a  $1 \text{ A/m}^2$ , correspondiente a la normatividad NMX-C-553-ONNCCE-2018, mostrando en el diagrama una comparación con los resultados de la viga carbonatada.

En el diagrama de Nyquist (Figura 15a), se observa al inicio la formación de un semicírculo dislocado que va abriéndose al transcurrir los días de realcalinización, lo que indica que la varilla

tiende a entrar en estado de pasivación. Si se compara con el semicírculo formado durante la carbonatación, es notorio un aumento en el diámetro, lo que se atribuye parcialmente a que el  $\text{CO}_2$  reacciona con los iones  $\text{OH}^-$  generados por la hidratación del cemento de modo que la concentración de iones  $\text{OH}^-$  tiende a disminuir. Entre todos los iones de los materiales a base de cemento, el ion  $\text{OH}^-$  se considera el más conductor (Snydera, K. A., *et al.*, 2003). Por lo que, la carbonatación puede conducir a un aumento de la resistencia a la transferencia de carga. Otro factor que contribuye a incrementar el arco de Nyquist es que el carbonato cálcico que tiene una solubilidad muy baja y se precipita dentro de los poros del hormigón, reduciendo la porosidad y aumentando la densidad del mortero (Arandigoyen, M., *et al.*, 2006; Montemor, M. F., 2002), que en consecuencia tiende a elevar la resistencia del proceso de transferencia de iones.

El diagrama de Bode-fase (Figura 15b), en la viga carbonatada inicialmente muestra un ángulo de fase próximo a  $-30^\circ$  en la región de frecuencias bajas ( $<100$  mHz), conocida como la región de la interfase entre el metal y el concreto (Andrade, C., *et al.* 1995; Gu, P., *et al.* 1994; Wenger, F., *et al.* 1987), misma que al tener tendencia hacia el cero, indica un comportamiento resistivo.

Durante los primeros días de realcalinización, el ángulo de fase disminuye a valores próximos a  $-40^\circ$ , lo que indica que la varilla de acero se encuentra en estado pasivo, sin embargo, hacia el día 14 de realcalinización se observó un incremento en el ángulo de fase hacia valores menores de  $-20^\circ$ , lo que muestra un comportamiento resistivo en la interfase metal-concreto.

De igual forma, se puede observar el inicio de una curvatura descendente notable en las frecuencias bajas a partir del séptimo día de realcalinización, lo que supone un cambio en las condiciones de la interfase, en donde el comportamiento resistivo se minimiza dando lugar al comportamiento capacitivo debido a los cambios activo-pasivo de la varilla, formando una capa pasiva sobre su superficie, lo que reduce el intercambio de carga y, por lo tanto, la cinética del proceso de corrosión.

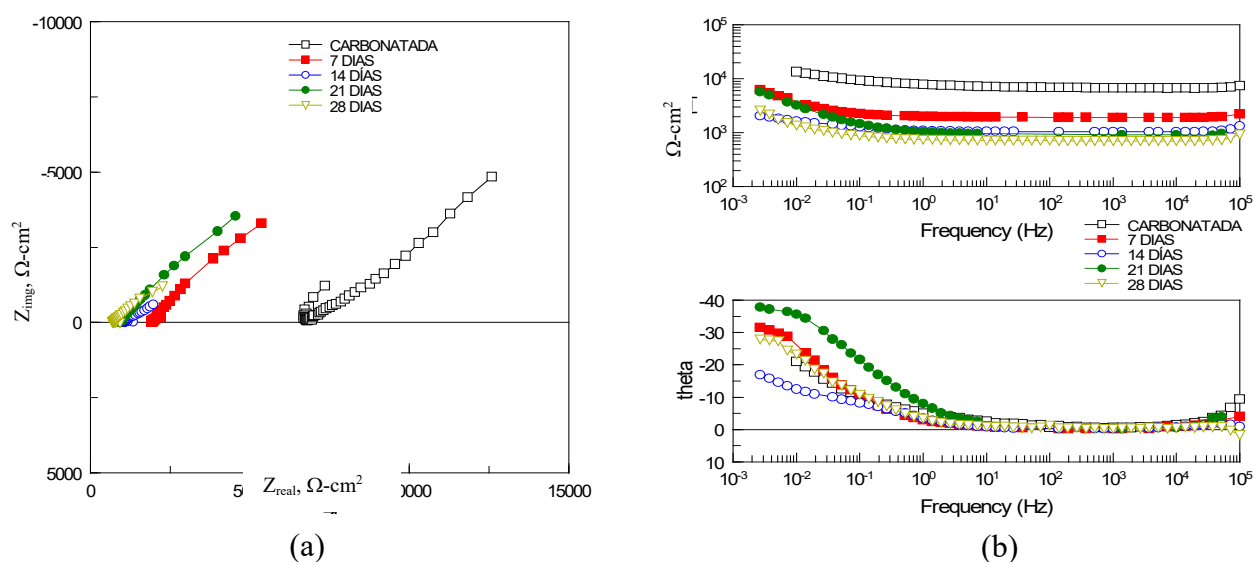


Figura 15. Gráfica de Nyquist (a) y de Bode (b) a 7, 14, 21 y 28 días de RAE

### 3.2.3.3 Diagramas de Nyquist y Bode durante el seguimiento electroquímico después de la RAE

En la Figura 16, se presentan los resultados del monitoreo electroquímico realizado durante un periodo de 24 meses de muestras realcalinizadas.

Durante los primeros meses después del tratamiento de RAE, se observa que el ángulo de fase se mantiene en valores próximos a  $-40^\circ$ , lo que indica que la varilla de acero se encuentra en estado pasivo, sin embargo, conforme avanzan los meses el ángulo de fase va disminuyendo hacia valores menores de  $-15^\circ$ , lo que muestra un comportamiento resistivo en la interfase metal-concreto y un



cambio pasivo-activo de la varilla conforme el tiempo avanza, lo que pudiera dar lugar al proceso de corrosión del acero de refuerzo.

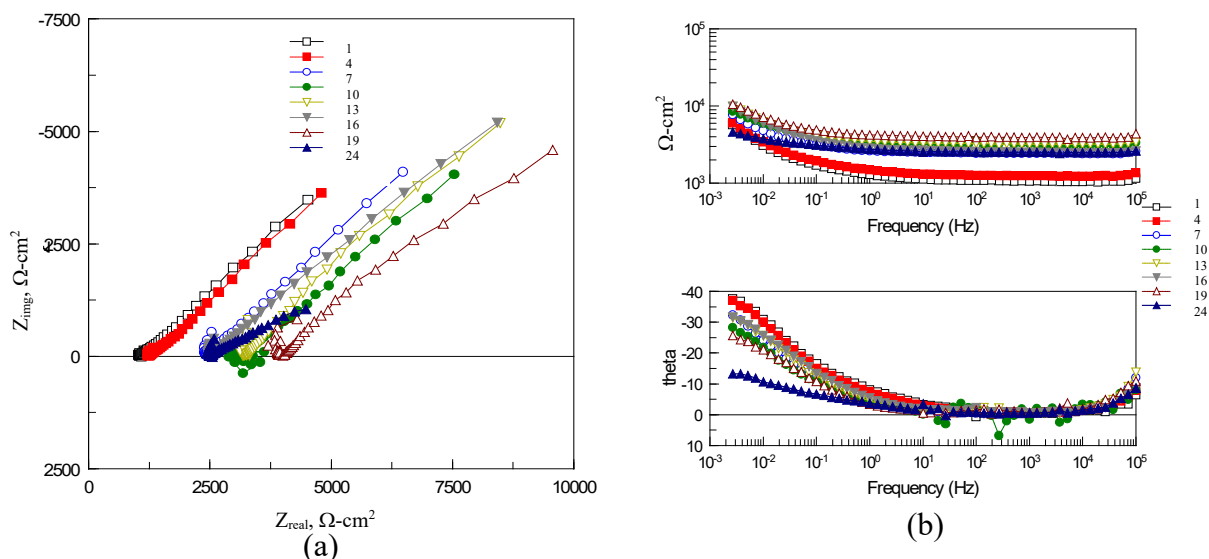


Figura 16. Gráfica de Nyquist (a) y de Bode (b) del seguimiento electroquímico durante los 24 meses posteriores a la RAE.

Después de dos años posteriores al tratamiento de RAE, se procedió a abrir las muestras de concreto, con la finalidad de realizar una inspección visual de la profundidad de recarbonatación y verificar la presencia de productos de corrosión. Para ello, fue necesario romper las muestras con ayuda de un martillo y un cincel.

En la Figura 17 se presenta la profundidad de recarbonatación de muestras después de 24 meses de realcalinizar electroquímicamente, estas muestras presentaron una profundidad de recarbonatación superior a los 2 cm, con una disminución de pH de 12 a 8, con un valor de  $E_{mc}$  en promedio de -110 mV, lo que se considera de acuerdo a la Tabla 1, que existe menos de un 10% de probabilidad de corrosión, lo que supone una varilla de refuerzo protegida por una capa pasiva, debido a que el proceso de carbonatación aún no llega al acero.

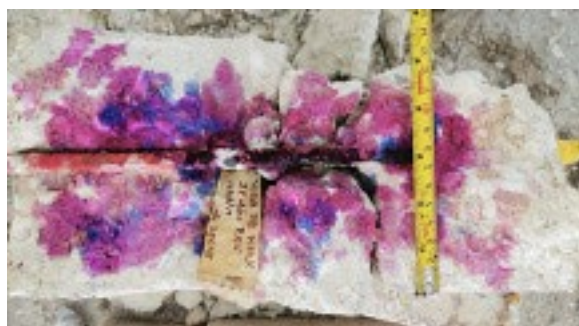


Figura 17. Profundidad de carbonatación después de 24 meses de realcalinización electroquímica.

#### 4 CONCLUSIONES

El pH del concreto disminuyó con el tiempo de exposición en condiciones agresivas de carbonatación, hasta obtener valores por debajo de 9 unidades de pH durante un periodo de 6 meses. Se logró una recuperación del pH del concreto bajo condiciones establecidas en la NMX-C-553-

ONNCCE-2018 presentando valores menos negativos de E<sub>mc</sub> sin llegar a la región de sobreprotección, lo que no representa riesgo de producir hidrógeno y fragilidad en el acero.

A pesar de una recuperación eficiente y rápida de pH mediante la técnica de realcalinización electroquímica, se demostró que el pH recuperado no alcanza los mismos valores que el pH inicial del concreto y que a lo largo de 24 meses de exposición en condiciones de laboratorio con una temperatura de 25°C ± 5°C y una humedad relativa por debajo de 60%, se alcanzó una profundidad de recarbonatación superior a los 2 cm, con valores promedio de pH de 8, lo que supone que la técnica de realcalinización electroquímica solo permite una recuperación temporal del pH.

El seguimiento electroquímico del E<sub>mc</sub> y de la EIE demuestra que las varillas embebidas en concreto sometidas a un proceso de carbonatación acelerada presentaron una secuencia que va desde el estado pasivo hasta la despasivación de la varilla y viceversa durante y después de la realcalinización electroquímica.

El proceso de carbonatación en muestras realcalinizadas se reactiva, con una velocidad relativamente alta, puesto que en dos años se alcanzan 2 cm de profundidad. Este resultado es relevante, porque evidencia la importancia de realizar seguimientos en obras que han sido sometidas a procesos de intervención con la finalidad de incrementar el tiempo de vida útil.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Veracruzana, campus Xalapa, la Universidad Autónoma de Campeche, al Programa para el Desarrollo del Personal Docente (PRODEP) y a la Fundación Pablo García por las facilidades brindadas para la realización de este proyecto.

Al Dr. Victor Manuel Jesús Moo Yam, por su valioso apoyo en el diseño y elaboración del dispositivo eléctrico utilizado durante la realcalinización electroquímica.

## 6 REFERENCIAS

Aguirre-Guerrero, A. M., & de Gutiérrez, R. M. (2018), *Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA*. *Construction and Building Materials*, 193, 518-528. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195)

Aguirre-Guerrero, A. M., Mejía-de-Gutiérrez, R., Montês-Correia, M. J. R. (2016), *Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments*. *Construction and Building Materials*, 121, 704-716. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038)

Aguirre, A. M. y Mejía de Gutiérrez, R. (2013). “*Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*”. *Materiales de Construcción* Vol. 63, 309, 7-38.

Andrade, C., Alonso, C., Rodríguez, J. (1989), *Remaining service life of corroding structures*. IABSE Symposium on Durability, Lisbon, Sep., pp. 359-363.

Andrade, C., Soler, L. and Nóvoa, X. R. (1995). *Advances in electrochemical impedance measurements in reinforced concrete*. Materials Science Forum, Trans. Tech. Publications, Switzerland, Vols. 192-194, pp 843-856.

Annual Book of ASTM Standards (2016), *Construction. Chemical-resistant materials; vitrified clay, concrete, fiber-cement products; mortars; masonry*. Section 4. Vol. 04.05.

Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J.I., Langeb, D.A. (2006). *Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes*. *Appl. Surf. Sci.* 252, 7562–7571.

ASTM C876-15. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

Bertolini, L. Yu, S. W. and Page, C. (1996). *L. Effects of electrochemical chloride extraction on*

*chemical and mechanical properties of hydrated cement paste*. Advances in Cement Research, 8, No. 31. pp. 93 -100.

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. y Polder, R. (2004). “*Corrosión de acero en el concreto*”. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim.

Bize, B. (2001), *Béton armé corrodé: Les traitement électrochimiques*. In: CSTB Magazine, No. 136. juillet - août 2001.

Castellote M., Llorente, I., Andrade C., Turrillas, X., Alonso, C., Campo, J. (2006), *Neutron diffraction as a tool to monitor the establishment of the electro-osmotic flux during realkalisation of carbonated concrete*. Physica B. 385– 386:26–528. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.263>

Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C. (2003), *Influence of the external solution in the electroosmotic flux induced by realkalisation*. in: Mater. Construcc., vol. 53, no 271– 272. pp. 101– 111. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2003.v53.i271-272.294>

Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C., Turrillas, X., Alonso, C., Campo, J. (2006), *In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: electro-osmotic flux and portlandite formation*. Cem Concr Res. 36:791–800. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.014>

Chatterji, S. (1994), *Simultaneous chloride removal and realcalisation of old concrete structures*. Cement and Concrete Research 24. No. 6. pp. 1051 -1054. DOI:[10.1016/0008-8846\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90028-0)

CYTED – DURAR. (1997). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Reporte Final, Red Durar, CYTED, Maracaibo.

Del Valle Moreno, A., Pérez-López T., Martínez Madrid, M. (2001), *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Publicación Técnica No. 182, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.

Fajardo, G., Escadeillas G., Arliguie, G. (2006), *Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel reinforced concrete specimens contaminated from artificial seawater*. Corrosion Science 48, pp: 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.015>

González Díaz, F. (2010), *Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*. Doctorado thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León.

González, F., Fajardo, G., Arliguie, G., Juárez, C. A., Escadeillas, G. (2011), *Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: An Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion*. International Journal of Electrochemical Science. 6. pp 6332 – 6349.

Gu, P., Fu, Y., Xie, P, and Beaudoin, J. (1994). *Characterization of surface corrosion of reinforcing steel in cement paste by low frequency impedance spectroscopy*. Cement and Concrete Research. Vol. 24. No 2. pp. 231-242.

Helene, P., Monteiro, J. (1994), *Can local repairs be durable solutions for steel corrosion in concrete structures*. Annals of international Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Vol. 2. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.014>

Hussain, R. R., Tetsuya, I. (2011), *Enhanced electro-chemical corrosion model for reinforced concrete under severe coupled actions of chloride and temperature*. Construction and Building Materials Journal. Vol. 25, Issue 3. pp. 1305-1315, Elsevier, ISI.

Ihekwa, N.M., Hope, B.B., Hansson C.M. (1996). *Carbonation and Electrochemical Chloride Extraction from Concrete*. Cement and Concrete Research. Vol. 26. No. 7. pp 1095 – 1107.

Linares, D., Sánchez, M. (2003), *Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation*. Rev. Tec Ing. Univ Zulia, 26, 34-44.

Mietz, J. (1995), *Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures*. Materials and corrosion. 46(9), 527-533. <https://doi.org/10.1002/maco.19950460904>

Mietz, J. (1998), *Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures a state of the art report*. EFC N°24, IOM Communications Ltd, London.

- Montani, R. (2000). La Carbonatación, Enemigo Olvidado del Concreto; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, diciembre. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm/>
- Montemor, M. F., Cunha, M. P., Ferreira, M. G., Simões, A. M. (2002). *Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides*. Cement & Concrete Composites 24. p.p.45–53.
- NACE (2007), *SP0107-2007 Electrochemical Realkalization and Chloride Extraction for Reinforced Concrete*
- Norma ACI 211.1. *Diseño de mezcla de concreto patrón*.
- Normas mexicanas del ONNCCE (2015), NMX-C-495-ONNCCE-2015 Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Potenciales de Corrosión del Acero de Refuerzo sin Revestir, Embebido en Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo.
- Norma mexicana ONNCCE (2017), NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.
- Norma mexicana ONNCCE (2018), *NMX-C-111-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo*.
- Norma mexicana ONNCCE (2018), NMX-C-553-ONNCCE-2018 Industria de la construcción - Concreto - Durabilidad - Métodos Electroquímicos de Rehabilitación (Intervención) Especializados (Recalcinización y Remoción de Cloruros) -Especificaciones y Métodos de Ensayo
- Pollet, V., Dieryck, V. (2000), *Re - alkalization: specification for the treatment application and acceptance criteria*. Annual Progress Report, 1999 - 2000, COST 521, Workshop, Belfast, p. 271.
- Pollet, V., Guerin, R., Tourneur, C., Mahouche H. and Raharinaivo, A. (1997). *Concrete realkalisation using sacrificial anodes*. Buracorr 97, Trondheim, Belgica.
- Raharinaivo and Carpio, J. (1992). *The stepping down the current method: a new corrosion control for cathodic protection of steel*. Paper No. 228, NACE Conference Corrosion 92, Nashville USA, p. 9.
- Redaelli, E., Bertolini, L. (2011), *Electrochemical repair techniques in carbonated concrete. Part I: electrochemical realkalisation*. J Appl Electrochem 41, 817–827. DOI:[10.1007/s10800-011-0301-4](https://doi.org/10.1007/s10800-011-0301-4)
- Ribeiro, P. H. L. C., Meira, G. R., Ferreira, P. R. R., Perazzo, N. (2013), *Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concretes – Influence of Material Characteristics and Thickness of Concrete Reinforcement Cover*. Elsevier. Construction and Building Materials 40. 280-290. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>
- Rincón, T., Rincón, O. (1994), *Electrochemical evolution of mortar based on acrylic and epoxy resins used to repair concrete structures*. 1st Mexican Symposium and 2nd International Workshop on Metallic Corrosion, Mérida, México.
- Rodríguez, G., Aperador Chaparro, W., Delgado Tobón, E. (2015). “*Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro*”. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4).
- Snydera, K. A., Fenga, X., Keenc, B. D., Masonb, T. O. (2003). *Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH, K and Na concentrations*. Cem. Concr. Res. 33,793–798
- Stolte, E., y Bohnenkamp, K. (1976). “*Protección contra la corrosión de materiales metálicos en la construcción y la ingeniería civil*”. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., pp. 113-127.
- Tong, Y., Bouteiller, V., Marie-Victoire, E. Joiret, S. (2012). *Efficiency Investigations of Electrochemical Realkalisation Treatment Applied to Carbonated Reinforced Concret. Part 1:*

*saacrificial anode process*. Cem. Concr. Res. 42 (1), 84-94. DOI:[10.1016/j.cemconres.2011.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008)  
Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Report 4.82, The Swedish Cement and Concrete Association, Stockholm.

UNE-EN 1504 Norma de productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón.

Wenger, F., Galland, J. and Lemoine, L. (1987). *Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment*. EUROCOR´87, Karlsruhe, Germany.

Yeih, W., Chang, J. J. (2005), *A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete*. Construction and Building Materials 19. 516-524 p.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.006>

## Efecto de la adición de fibras de bagazo de caña y nanopartículas de sílice mesoporosas tipo MCM-41 sobre propiedades de concreto reforzado

T. Pérez López<sup>1\*</sup>, A. Michel<sup>1</sup>, J. A. Paat Estrella<sup>2</sup>, W. A. Talavera Pech<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [tezperez@uacam.mx](mailto:tezperez@uacam.mx)

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche, México.

### RESUMEN

Se elaboraron probetas cilíndricas de concreto de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura, con adiciones de 0.5% y 0.8% de nanopartículas de sílice mesoporosas tipo MCM-41 sintetizadas a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado (NP-MCM-41); 1% de fibra de bagazo de caña de azúcar (FBC) y combinaciones de 1 % de FBC con 0.5% y 0.8% de NP-MCM-41. Los ensayos de resistencia de compresión y flexión mostraron una ligera mejoría con la adición de fibra y nanomaterial. Con el ensayo de carbonatación acelerada se aprecia que la presencia de FBC tiene mayor efecto en la disminución del avance de carbonatación que la adición del nanomaterial y que la combinación ofrece una mayor disminución en el avance de la neutralización de la pasta de concreto. La condición termodinámica de la interfase concreto-acero determinada con el potencial de media celda, es afectada, tendiendo a valores menos activos a medida que la concentración de los componentes ensayados incrementa. De igual manera, los diagramas de espectroscopía de impedancia electroquímica presentan diferencias notables en los valores de resistencia eléctrica del concreto y de la cinética del proceso de corrosión con la adición de la FBC y la NP-MCM-41.

**Palabras clave:** concreto; NP-MCM-41; FBC; Ecorr; espectroscopía de impedancia electroquímica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción, debido a sus propiedades químicas y mecánicas que le brindan resistencia a la acción del medio ambiente y le confieren gran durabilidad. Sin embargo, el concreto reforzado es un gran generador de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante el proceso de fabricación del cemento. Esto favorece al calentamiento global, ya que es un gas de efecto invernadero que contribuye al impacto climático actual (Andersson et al., 2019; Borges, 2010; Peñaloza et al., 2018; Talukdar & Banthia, 2013).

En consecuencia, con el desarrollo sostenible y la posibilidad de utilizar materiales alternativos de construcción, que permitan reducir la extracción y uso de materiales convencionales, se presenta la necesidad de continuar investigando en el campo de materiales que permitan, no solamente reducir costos, sino que brinden seguridad en cuanto a sus propiedades y necesidades de resistencia según sus usos. Por lo que se ha intensificado el estudio e interés sobre las especificaciones de los materiales utilizados en el diseño de las construcciones (Caram, 2012).

Se reporta que el uso de fibras vegetales como refuerzo de la matriz de cemento es un ejemplo de estrategia que se ha seguido para mejorar sus propiedades. Las principales ventajas de utilizar concreto reforzado con fibras vegetales provienen del bajo costo de su obtención y de sus características como refuerzo de materiales frágiles, como afirman Mostafa y Uddin (Mostafa & Uddin, 2016). Varios autores han intentado incorporar el bagazo de caña de azúcar en forma de fibras para mejorar las propiedades de las mezclas de hormigón armado (Asim et al., 2020; Hernández-Olivares et al., 2020; Loh et al., 2013). Han observado algunas ventajas para la incorporación de estas fibras, como un aumento de tenacidad y resistencia al impacto en estado endurecido, además de que permite controlar la contracción plástica en el período de fraguado en estado fresco. Por otra parte, la mayor parte de la investigación sobre nanotecnologías aplicadas a la construcción se ha centrado en dos temas principales: la elaboración de materiales nano estructurados con mayor resistencia que el acero y la elaboración de concretos de ultra alta resistencia a partir de la modificación de la estructura de la matriz cementante y del mecanismo de fractura que resulta de ello. En la actualidad, las nanopartículas de sílice son las más empleadas en el concreto, generando una gran área de investigación (Nazari & Riahi, 2010). Algunos ejemplos del empleo de estos nanomateriales en la ingeniería civil son: superficies autolimpiables, el desarrollo de recubrimientos fotocatalíticos que den lugar a superficies con propiedades bactericidas y autolimpiables; concretos más resistentes, mediante la aplicación de nanofibras o nanopartículas que posibilitan la modificación de sus propiedades para la adquisición de un mejor comportamiento físico-mecánico; y en la fabricación de recubrimientos con base en incrustaciones de nanopartículas para estructuras (Cruz-Moreno et al., 2020).

En el presente trabajo se propone, por una parte, el reciclado de vidrio de desecho a partir de la extracción de silicato de sodio de dicho residuo para la síntesis de nanopartículas de sílice mesoporosa tipo MCM-41 por el método sol-gel, y por otra parte el uso de desechos provenientes de agroindustrias económicamente importantes como las fibras de bagazo de caña de azúcar para reducir la contaminación de los ecosistemas y el ambiente en general. El estudio se centra en la evaluación del efecto de la adición de fibras de bagazo de caña de azúcar junto con nanopartículas de sílice mesoporosa tipo MCM-41 en las propiedades fisicomecánicas y electroquímicas de las estructuras de concreto reforzado.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Obtención de NP-MCM-41 a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado

#### 2.1.1 Obtención del precursor de sílice

Como primer paso, se procedió al lavado y la trituración del vidrio reciclado utilizando un molino de bolas. Luego se tamizó el producto obtenido, repitiendo el proceso hasta obtener el menor tamaño posible. Posteriormente se llevó a cabo un proceso conocido como fusión alcalina, utilizando una relación molar de vidrio-NaOH de 1:3 tomando el vidrio como SiO<sub>2</sub> puro con la finalidad de obtener el silicato de sodio. En concreto, se pesaron 18 g de vidrio molido en la balanza analítica con ayuda de una espátula y un vaso de precipitado, posteriormente se pesaron 36 g de NaOH dentro de una cápsula de porcelana donde se vertió el vidrio y se mezcló hasta homogenizar la muestra. Al término de este tiempo, se introdujo la mezcla a la mufla por 1 hora a una temperatura de 500 °C. Al finalizar este proceso, se dejó reposar la muestra dentro de la mufla hasta alcanzar la temperatura ambiente, posteriormente se extrajo el silicato de sodio adicionando 398 mL de H<sub>2</sub>O (8 veces agua respecto al peso de la muestra que se retiró de la mufla) en un vaso de precipitado con ayuda de un agitador magnético, a temperatura ambiente, durante 24 horas. Posterior a la extracción, la muestra se filtró, tomando la solución remanente como el precursor de sílice para la síntesis tipo sol-gel.

#### 2.1.2 Síntesis de NP-MCM-41

Para la producción de las nanopartículas de sílice mesoporosa tipo MCM-41 se utilizó la disolución de silicato de sodio previamente obtenida como se describió en la sección anterior para llevar a cabo una síntesis tipo sol-gel en condiciones básicas. Para esto, se pesaron 0.2 g de bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) en la balanza analítica con la ayuda de una espátula y un vaso de precipitado, posteriormente el CTAB fue vertido en un matraz de balón y se le agregaron 96 mL de agua destilada y 0.7 mL de NaOH 2M, agitando la mezcla a 80 °C en la placa de calentamiento hasta la formación de las micelas cristalinas. Alcanzada la disolución, se agregó gota a gota, para cada síntesis, 20 mL de la solución de silicato de sodio, se ajustó el pH a 11 añadiendo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1 a 2M), midiendo con ayuda de un potenciómetro, y se mantuvo en agitación magnética por 2 horas, a una temperatura de 80 °C. Por último, se filtró la solución con una bomba de vacío y la muestra sólida en el papel filtro fue introducida a una estufa a una temperatura de 50 °C hasta el secado.

Una vez terminada esta etapa, se procedió a la eliminación del surfactante catiónico. En primer lugar, para retirar el surfactante de los mesoporos, se agregaron las nanopartículas obtenidas en la síntesis sol-gel en un matraz balón, al cual se le añadieron como muestra de referencia 2 g de nanopartículas, 40 mL de etanol y 1.5 mL de HCl concentrado, esta mezcla fue puesta a reflujo durante 24 h a una temperatura de 78 °C. Una vez cumplido este tiempo, se procedió a enfriar y filtrarla con la ayuda de una bomba de vacío para, enseguida, introducirla a una estufa a 50 °C para su secado. Posterior a este paso, se procedió a lavar la mezcla con agua destilada durante 24 horas; luego se filtró con la ayuda de una bomba de vacío para, luego, ser colocada a una estufa a 50 °C para su secado. Al finalizar este proceso, se recuperaron las nanopartículas de sílice mesoporosa mediante la calcinación en una mufla a 550 °C durante 5 horas.

### 2.2 Caracterización de NP-MCM-41 a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado

#### 2.2.1 Difracción de rayos X (DRX)

Para identificar las fases cristalinas presentes en cada etapa de la obtención de silicato de sodio, se realizó un análisis DRX a las muestras de vidrio. El polvo se compactó y se colocó en un porta muestras de acero. Las muestras fueron analizadas con un Difractómetro PANalytical Empyrean que utiliza la emisión K $\alpha$  del cobre CuK $\alpha$  (1.5406 Å). Las condiciones de operación del equipo



fueron a 45 kV de voltaje de aceleración y 40 mA de  $5^\circ$  a  $60^\circ$  de  $2\theta$ , con un tamaño de paso de 0.02 y la muestra se giró  $\frac{1}{4}$  de vuelta por segundo.

### **2.2.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)**

La composición química elemental del vidrio reciclado y de las NP-MCM-41 se determinó mediante FRX. Los análisis se realizaron en polvo sin preparación adicional utilizando un espectrómetro FRX PANalytical EPISLON 3XL, en atmósfera inerte de nitrógeno.

### **2.2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Para identificar la morfología y el tamaño de las nanopartículas MCM-41 obtenidas por el método sol-gel, éstas se observaron empleando un Microscopio Electrónico de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersa de Rayos X, empleando un equipo Modelo JSM-6490LV de la marca JEOL con condiciones de trabajo de 10 kV como voltaje de aceleración. El tamaño medio de las partículas se obtuvo a partir de 100 mediciones imágenes de SEM con el software ImageJ.

### **2.2.4 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)**

La corroboración de grupos funcionales presentes en los compuestos obtenidos después de los procesos de fusión alcalina y de las síntesis sol-gel, se llevó a cabo mediante un análisis FTIR utilizando el método de reflectancia total atenuada (ATR por sus siglas en inglés) en un equipo FT-IR Agilent Cary 630. Las muestras se corrieron en polvo en el intervalo espectral de  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ .

### **2.2.5 Fisisorción de $N_2$ por el método de Brunauer-Emmentt-Teller (BET)**

Las pruebas para el análisis de área superficial mediante el ensayo de fisisorción de nitrógeno por el método BET (Brunauer et al., 1938), se realizaron en un equipo Micromeritics modelo TriStar II donde se colocó una muestra de 0.2 g en una celda de cuarzo, se desgasificó a  $300^\circ\text{C}$  por una hora y se sometió a vacío en un baño de nitrógeno. El análisis se llevó a cabo en un intervalo de presión relativa ( $x=P/P_0$ ) de 0.01 a 1.0. Las variaciones de la presión relativa contra el volumen del poro, para la realización de la isoterma se realizaron mediante software BEL Japan.

### **2.2.6 Difracción de rayos X de ángulo bajo (SAXRD)**

Para determinar si el ordenamiento de los mesoporos corresponde a una estructura hexagonal característica de las nanopartículas MCM-41, se analizaron las muestras obtenidas en la síntesis sol-gel posterior a la eliminación del surfactante, en un difractómetro de rayos X marca BRUKER modelo D8 advance con una  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418\text{ \AA}$ ) con un tamaño de paso de  $0.001^\circ$ , a un tiempo de paso de 0.5 s. Este análisis se realizó a ángulo bajo en el intervalo de  $2\theta$  de  $0.5^\circ$  a  $10^\circ$  con 40 kV y 30 mA.

## **2.3 Caracterización de las fibras de bagazo de caña: (FTIR)**

La obtención y preparación de las muestras de fibras de bagazo de caña de azúcar se llevaron a cabo mediante el procedimiento descrito en un trabajo previo que se llevó a cabo en laboratorios del Centro de Investigación en Corrosión (Talavera-Pech et al., 2021). Una vez concluido el proceso de limpieza de las fibras, fueron inmersas en disoluciones con pH desde 13 hasta 9, que son los valores posibles en un concreto expuesto a condiciones de carbonatación, y una muestra de referencia (pH=7) durante 60, 90 y 120 días de exposición.

Para conocer los componentes de las fibras antes y después de los periodos de exposición en el medio alcalino, se realizaron análisis FTIR en un equipo FT-IR Agilent Cary 630 mediante la técnica de reflectancia total atenuada (ATR) en un intervalo espectral de  $4000\text{ a }400\text{ cm}^{-1}$  con un promedio de 100 barridos y una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$ . Lo anterior con la intención de aproximar el

efecto de la variación del pH sobre la estabilidad química del bagazo, en conocimiento de que un concreto recién colado alcanza un pH de 12-12.5 y al carbonatarse el pH puede llegar a valores cercanos a 9.

## **2.4 Preparación y colado de especímenes de concreto**

Para la preparación de los concretos, se utilizó como aglutinante el cemento portland compuesto - CPC 30 R, marca comercial Maya (Mérida, México), buscando lograr una resistencia a compresión rápida. Este cemento cumple con lo especificado en las normas NMX-C-414-ONNCCE-2014 y ASTM-C-150-2007. Los agregados utilizados son característicos de la región, conocidos como grava producto de trituración de roca caliza propia de la Península de Yucatán y arena de mar previamente lavada, proveniente de un banco de materiales de Campeche. Se empleó agua potable para el mezclado, para evitar el ingreso de compuestos agresivos, que cumple con la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004. Adicionalmente, se utilizó un aditivo fluidificante de concretos o morteros, el SikaCem Fluidificante, el cual incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aproximadamente (PROCONSA ®, n.d.). Se produjeron en total 80 probetas de concreto con una relación a/c=0.56: 12 cilindros de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura con varilla de acero de refuerzo de 3/8” de diámetro para pruebas electroquímicas; 48 cilindros de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura para pruebas de resistencia a la compresión; 12 cilindros de 7.5 cm de diámetro y 10 cm de altura para ensayo de carbonatación y 8 vigas de sección cuadrada de 5 cm de longitud por 20 cm de lado para ensayo de resistencia a la flexión. Tras el colado los especímenes permanecieron en laboratorio, durante 24h para fraguar.

Cabe destacar que el número y tamaño de los especímenes de concreto se determinaron con base al tiempo de duración del proyecto, las variables de estudio y los diversos ensayos a los que están sometidos dichos especímenes. Asimismo, las variables de estudio son: probetas de control (T), probetas con adición fibras de bagazo de caña de azúcar en cantidad de 1 % peso en base al cemento (1F), probetas con adición de NP-MCM-41 en cantidad de 0.5 % y 0.8 % respecto al peso del cemento y de forma directa en las muestras de concreto (0.5N y 0.8N), probetas con adición de FBC y NP-MCM-41 (0.5N-1F, 0.8N-1F), esto con el fin de efectuar una comparación de sus características y propiedades.

## **2.5 Caracterización de las muestras de concreto**

### **2.5.1 Determinación de volumen de vacíos permeables**

La porosidad del concreto es un factor de control importante, que influye en la difusión de los agentes contaminantes como diversos iones y el CO<sub>2</sub>. Esto influye directamente en la durabilidad del concreto. Para determinar el porcentaje de volumen de vacíos permeables en las muestras de concreto, se utilizó el procedimiento establecido por la norma estándar ASTM C-642-2006. Para medir el peso de la muestra, se utilizó una balanza Precisa XB 2200C (Precisa, Dietikon, Suiza) modelo con un rango de 0 a 2200 g y 0.01 g como sensibilidad. Para el secado de las muestras, se utilizó una estufa de laboratorio (RIOSSA Monterrey, México) con un intervalo de trabajo de 10 a 250 °C. Para los pasos húmedos se utilizó, igual que para el proceso de mezclado de concreto, agua potable.

### **2.5.2 Pruebas de resistencia a la compresión**

La calidad del concreto depende de sus propiedades, tanto al estado fresco como al endurecido. La propiedad más importante y normalmente más usada para referirse al concreto es la resistencia al esfuerzo de compresión. Por lo que, generalmente la información necesaria para el cálculo de mezclas se da en función de la resistencia a la compresión y/o durabilidad del concreto endurecido. Asimismo, para este proyecto la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas fue determinada a las edades de 7, 14, 28 días. Se calculó a partir de la carga de ruptura dividida por el

área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de  $\text{kg/cm}^2$  o MPa conforme establece la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2014 y su estándar internacional ASTM C-39-2015.

### **2.5.3 Pruebas de resistencia a la flexión**

Para los fines de este proyecto se elaboraron 12 muestras de sección cuadrada, que fueron para la realización de la prueba.

## **2.6 Deterioro químico del concreto por carbonatación acelerada**

Con la finalidad de acelerar el proceso de carbonatación en el concreto, y luego de cumplidos los 28 días de curado, se colocaron en la cámara adaptada en el laboratorio de concreto del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, con la capacidad de mantener las condiciones experimentales en  $25 \pm 2$  °C de temperatura y  $65 \pm 5$  % de humedad relativa. A un costado se instaló un tanque comercial de  $\text{CO}_2$  de 25 kg con un medidor de flujo, que permitió mantener dentro de la cámara una concentración constante de 3 %, ambiente con mayor concentración de  $\text{CO}_2$  que en el ambiente normal (Talavera-Pech et al., 2021).

Dentro de la cámara se colocaron un medidor de humedad relativa y un medidor de  $\text{CO}_2$ . Asimismo, se conectaron dos ventiladores, uno en cada extremo, con la finalidad de lograr una mejor distribución del flujo de gas. Para estabilizar la humedad relativa, se utilizó como adsorbente zeolita natural tipo clinoptilolita secada previamente en una estufa de secado, logrando un proceso de carbonatación estable aproximado de 8 horas al día.

Durante este tiempo de exposición, se determinó el avance de la carbonatación mediante el método de vía húmeda con los indicadores ácido-base, timolftaleína y fenolftaleína, utilizando los especímenes que se elaboraron sin acero de refuerzo.

El procedimiento consistió en realizar cuidadosamente un corte transversal a las probetas, de aproximadamente 2.5 cm de espesor. Inmediato al corte y a la limpieza de la superficie, se les aplicó cada uno de los indicadores, fenolftaleína y timolftaleína de forma uniforme, utilizando un atomizador para una mejor distribución. Posterior a la aplicación de los indicadores, se midió con un flexómetro la superficie de la probeta que no presentó coloración.

## **2.7 Pruebas electroquímicas**

Las pruebas de velocidad de corrosión se realizaron mediante el potencióstato/galvanostato VersaSTAT 4, Potencióstato Galvanostat-Princeton Applied Research, conectado a una computadora con el software de registro de las variables del experimento.

### **2.7.1 Medición de potencial de corrosión (Ecorr)**

La medición del potencial es un indicador del estado de probabilidad de que ocurra el fenómeno de la corrosión más, sin embargo, muchas veces no es suficiente para dar un diagnóstico de la estructura, es decir no da información de la cinética de degradación del acero de refuerzo. El potencial de corrosión se midió de acuerdo con lo establecido por la ASTM C 876.

### **2.7.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE)**

Fue empleada una celda convencional de tres electrodos, siendo un electrodo de saturado de calomel la referencia, una placa de acero inoxidable el electrodo auxiliar o contraelectrodo, y el cilindro de concreto con la varilla de acero embebida el electrodo de trabajo, todos conectados al potencióstato, que está acoplado a un equipo de cómputo para el registro de los datos. Los ensayos se realizaron en un intervalo de 100 kHz a 0.003 Hz, con una amplitud de 10 mV.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización de NP-MCM-41 a partir de silicato de sodio extraído de vidrio reciclado

##### 3.1.1 Difracción de rayos X (DRX)

En la figura 1, se observan los difractogramas obtenidos de las muestras: vidrio antes de ser sometido a la fusión alcalina y vidrio después de la fusión alcalina; analizado en el intervalo de  $2\theta = 5$  a  $70^\circ$ . Mediante los análisis DRX se logró observar que, el vidrio previo a la fusión alcalina no presenta materiales cristalinos. Asimismo, al aplicar la técnica de fusión alcalina, el vidrio cambia su estructura reflejándose como fases cristalinas, donde se obtiene en gran medida el silicato de sodio.

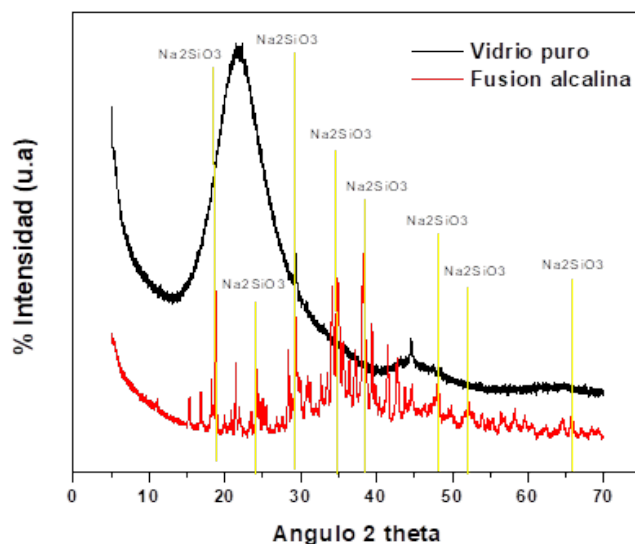


Figura 1. Difractogramas de rayos X de las muestras de vidrio reciclado antes y después de ser sometido a la fusión alcalina.

##### 3.1.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)

La Tabla 1 presenta la composición elemental del vidrio, antes de ser sometido a la fusión alcalina; la Tabla 2 presenta la composición de fases posterior a la fusión alcalina en atmósfera inerte de nitrógeno. El análisis FRX confirmó la presencia del  $\text{SiO}_2$  en el vidrio en una proporción mayor al 97 %.

Tabla 1. Composición química del vidrio antes de ser sometido a fusión alcalina.

Compuesto	Ag <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Contenido (%)	0.018	1.375	97.790	0.331	0.116	0.223	0.017	0.068	0.041	0.031

En la Tabla 2, se muestra la composición química del vidrio después de la fusión alcalina analizado en masa mediante FRX. Se observa que el material presenta un contenido alto de óxido de sodio (82.79 %) y muy bajo de óxido de silicio (16.29 %).

Tabla 2. Composición química del vidrio después de ser sometido a fusión alcalina.

Compuesto	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Contenido (%)	82.785	0.303	16.289	0.339	0.127	0.127	0.031

El análisis FRX (véase Tabla 3) confirmó la composición del material sintetizado con silicato de sodio que presentó 98.8 % de SiO<sub>2</sub>. También se aprecia la presencia de 0.75 oxido de aluminio proveniente de las fases de residuo del vidrio de la síntesis.

Tabla 3. Composición química de las NP-MCM-41.

Compuesto	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cl
Contenido (%)	0.751	98.803	0.263	0.072	0.018	0.093

### 3.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis de (SEM) de la figura 2.a permite examinar la morfología y tamaños de las partículas nanométricas obtenidas. Las fotografías microscópicas de las nanopartículas presentan aglomerados, lo que se está observando parece mucho a un gel, producto derivado de la fuente de silicato. Así, pueden observarse partículas globulares, con una distribución de tamaños que oscilan entre alrededor de 132.69 nm ± 1.68 de diámetro promedio (véase Figura 3). Además, se realizó mapeo elemental y análisis puntual mediante EDX, para analizar la distribución de los elementos que componen la muestra. En la Figura 2.b se observan formaciones ricas principalmente en oxígeno (56.3 wt %), silicio (43.1 wt %), y aluminio (0.6 wt %) corroborando los resultados obtenidos por FRX.

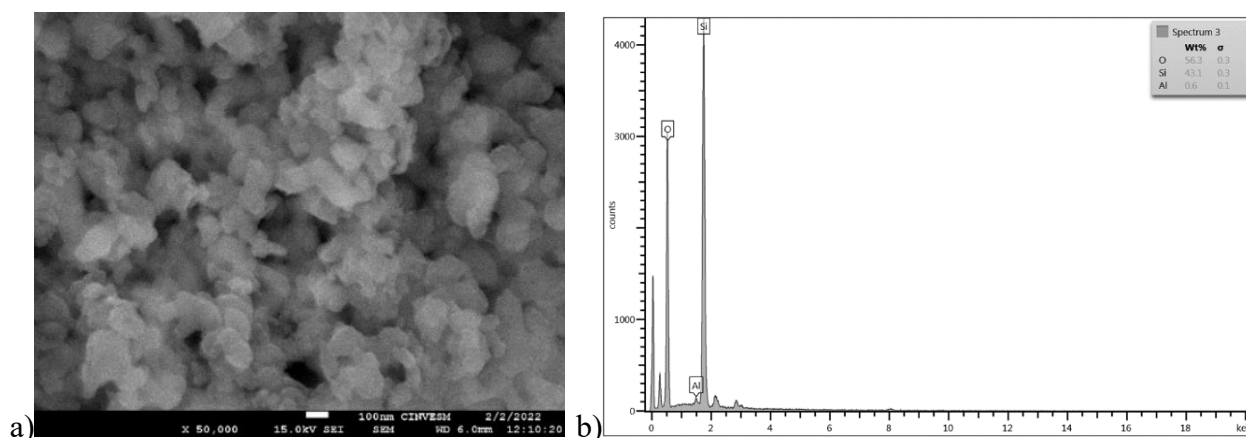


Figura 2. Microscopía electrónica con Espectroscopía de energía dispersa de rayos X de las nanopartículas sintetizadas por sol-gel a partir de silicato de sodio.

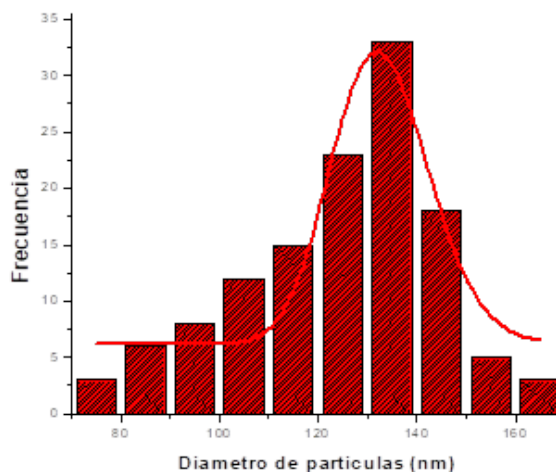


Figura 3. Distribución de tamaños de las nanopartículas sintetizadas en nm utilizando el software ImageJ.

### 3.1.4 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Mediante el análisis FTIR, se analizaron las muestras obtenidas después de la síntesis para determinar los grupos funcionales presentes. El pico localizado a  $1690\text{ cm}^{-1}$  es característico de los enlaces O-H y C-H. Además, se constata la presencia de una banda muy ancha en la zona de  $1250$  a  $1050\text{ cm}^{-1}$  que se atribuye a los enlaces Si-O; así mismo la vibración de estiramiento asimétrica del enlace Si-O-Si a  $1081\text{ cm}^{-1}$ ; vibración de estiramiento simétrico Si-O-Si a  $855\text{ cm}^{-1}$ . La muestra mostró un hombro de Si-OH en aproximadamente  $3400\text{ cm}^{-1}$  que se atribuye a los silanoles de la superficie dentro de los grupos hidroxilo internos y externos de la estructura mesoporosa y también señala moléculas de agua adsorbidas. Este resultado concuerda con los espectros encontrados por otros autores (Kamarudin et al., 2013; Majchrzak-Kucęba & Nowak, 2011), que produjeron nanopartículas de sílice mesoporosa sintetizada mediante la ruta sol-gel y obtuvieron un material con características similares. La banda situada a  $910\text{ cm}^{-1}$  se ha atribuido a radicales  $\text{CH}_2$  del TEOS (Limpo et al., 1993).

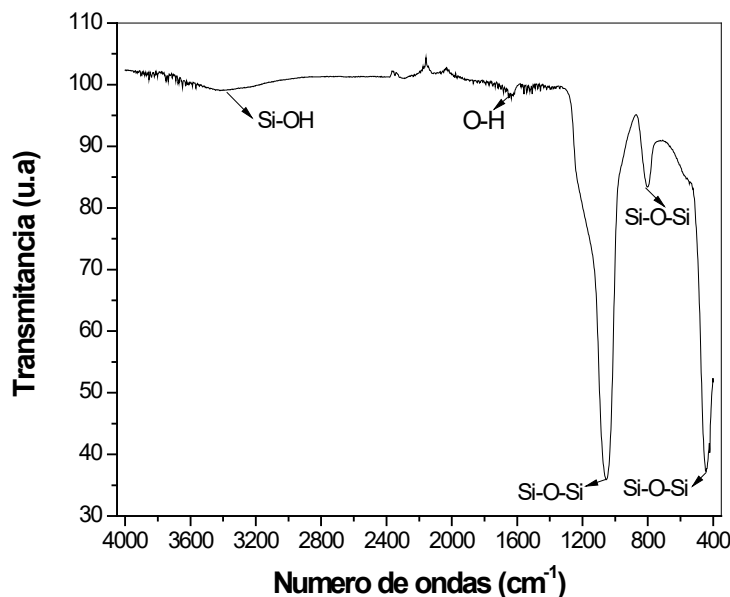


Figura 4. Espectro FTIR de los grupos funcionales en las muestras sintetizadas por el método sol-gel a partir de silicato de sodio.

### 3.1.5 Fisisorción de $\text{N}_2$ por el método de Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Del análisis de área superficial mediante el ensayo de fisisorción nitrógeno por el método BET (Brunauer-Emmet-Teller), se obtuvo un área superficial específica de  $840.142\text{ m}^2/\text{g}$ , diámetro medio de poro de  $1.628\text{ nm}$  y volumen de poro de  $0.629\text{ cm}^3/\text{g}$ . Según la clasificación presentada en estudios anteriores, se puede concluir que los valores de los parámetros de estructura (áreas superficiales y diámetros de poro) confirman la naturaleza mesoporosa de las muestras sintetizadas (Rosenholm et al., 2010). La Figura 5 muestra las isotermas de adsorción/desorción de  $\text{N}_2$  de las muestras sintetizadas las cuales son isotermas del tipo IV, típico de los materiales mesoporosos según la clasificación de la IUPAC (Kinashi et al., 2012), con el punto de inflexión aproximadamente en  $p/p_0 = 0.22$ . Esta isoterma tiene 3 rangos bien definidos. A bajas presiones relativas, se observa un aumento gradual, que es causado por la adsorción mono y multicapa en las paredes de los poros; luego se observa un aumento brusco en los valores medios de  $p/p_0$ , que resulta de la condensación capilar; y finalmente, se observa un aumento lineal gradual en valores altos de  $p/p_0$ , que está asociado con la adsorción en la superficie externa de las muestras (Majchrzak-Kucęba & Nowak, 2011; Serrano et al., 2018).

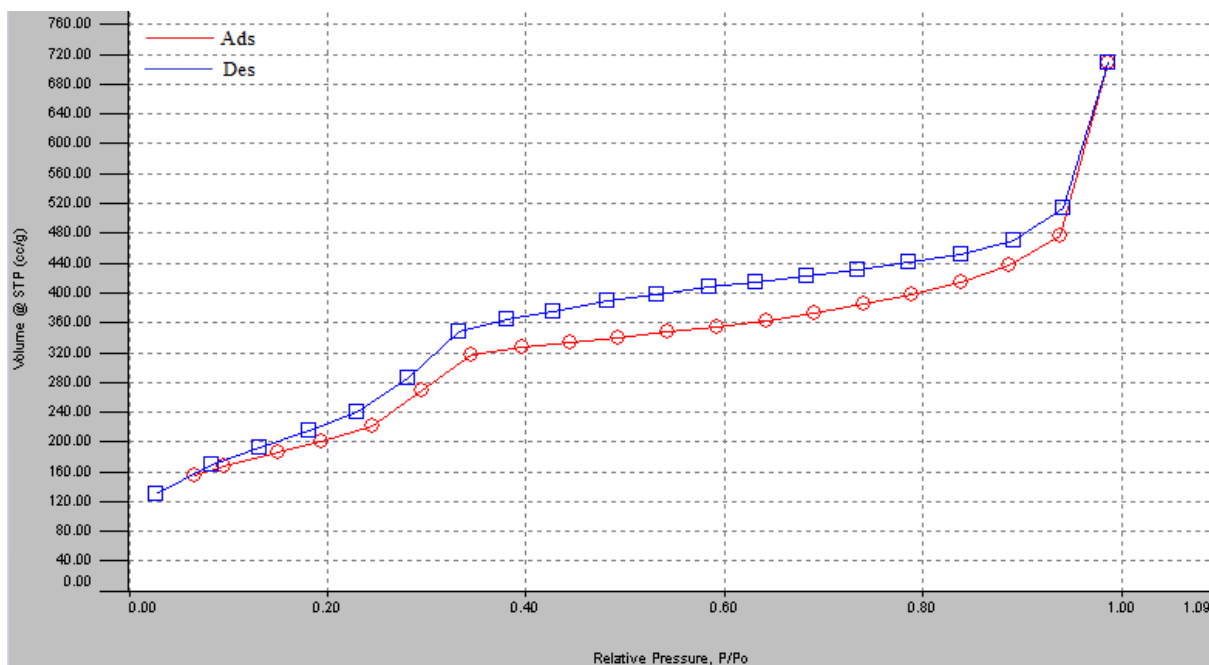


Figura 5. Isotermas de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> de las muestras sintetizadas.

### 3.1.6 Difracción de rayos X de ángulo bajo (SAXRD)

A través del análisis de los resultados de SAXRD se puede determinar el tipo de estructura de poros de materiales mesoporosos. La Figura 5 muestra las diferentes señales de difracción las cuales permitieron determinar la correcta estructura mesoporosa del material sintetizado. Como se puede observar, el difractograma en el intervalo de  $2\theta = 0^\circ$  a  $10^\circ$  demuestra una reflexión muy ancha (pico [1,0,0]) ubicada en  $2\theta = 2.25^\circ$  aproximadamente. Observándolo con más precisión, el difractograma muestra otros picos más ensanchados lo cual se pueden indexar como [1,1,0] y [2,0,0], picos de Bragg característicos también de una estructura mesoporosa hexagonal, según ha sido reportado por diversos autores, la presencia de este pico representa cierto orden en los poros, por lo cual se confirma la estructura deseada en las nanopartículas (Kamarudin et al., 2013; Kresge & Roth, 2013; Mas Font, 2014; P. da Silva et al., 2019).

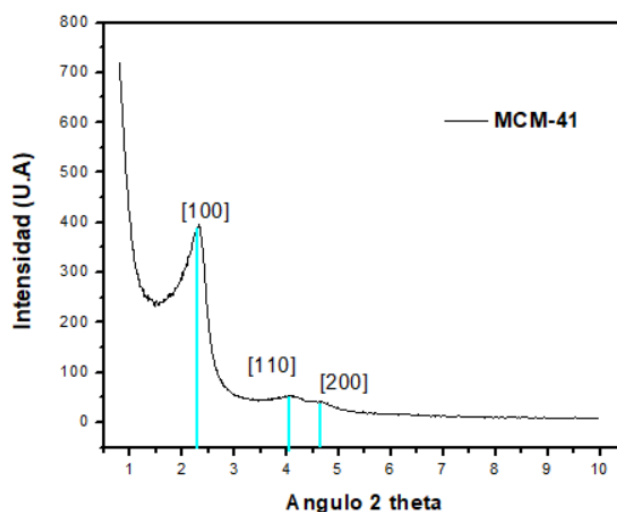


Figura 6. Difractograma del resultado de análisis SAXRD de las NP-MCM-41 sintetizadas con silicato de sodio.

### 3.2 Caracterización de las fibras de bagazo de caña: (FTIR)

En la figura 16a, b, c, se observa el espectro de cada muestra después de 60, 90 y 120 días de degradación, respectivamente. En los espectros de fibras degradadas a los 60 días (véase Figura 7.a) puede observarse que el espectro de la muestra sometida a un valor de pH de 7 muestra picos característicos de la celulosa, la lignina y la hemicelulosa, que son los principales componentes de la fibra de bagazo (Bam et al., 2019; Devadiga et al., 2020).

En los espectros de las muestras sometidas a valores de pH 9 y 10 se presentan picos similares al anterior, sin embargo, presentan un aumento en la absorción de la banda a  $3440\text{ cm}^{-1}$ , lo cual indica que a esos valores de pH se presenta inserción de grupos O-H en las estructuras moleculares, específicamente de hemicelulosa y lignina (Sedan et al., 2008).

En los espectros de las muestras sometidas a valores de pH de 11 y 12 se presentan cambios claramente observables con respecto a todas las muestras anteriores ya que se pierden los picos a  $1730\text{ cm}^{-1}$ ,  $1602\text{ cm}^{-1}$ ,  $1505\text{ cm}^{-1}$ ,  $1245\text{ cm}^{-1}$ , el primero es característico de los enlaces tipo éster que une la hemicelulosa y lignina con las fibras de celulosa mientras que todos los demás como se mencionó anteriormente son característicos de las estructuras moleculares presentes en hemicelulosa y lignina (Devadiga et al., 2020). Adicionalmente estos espectros mantienen los picos característicos exclusivamente de la celulosa como los son el pico a  $902\text{ cm}^{-1}$  y presentan una mayor absorción en el pico a  $1430\text{ cm}^{-1}$  el cual también es específico de la celulosa.

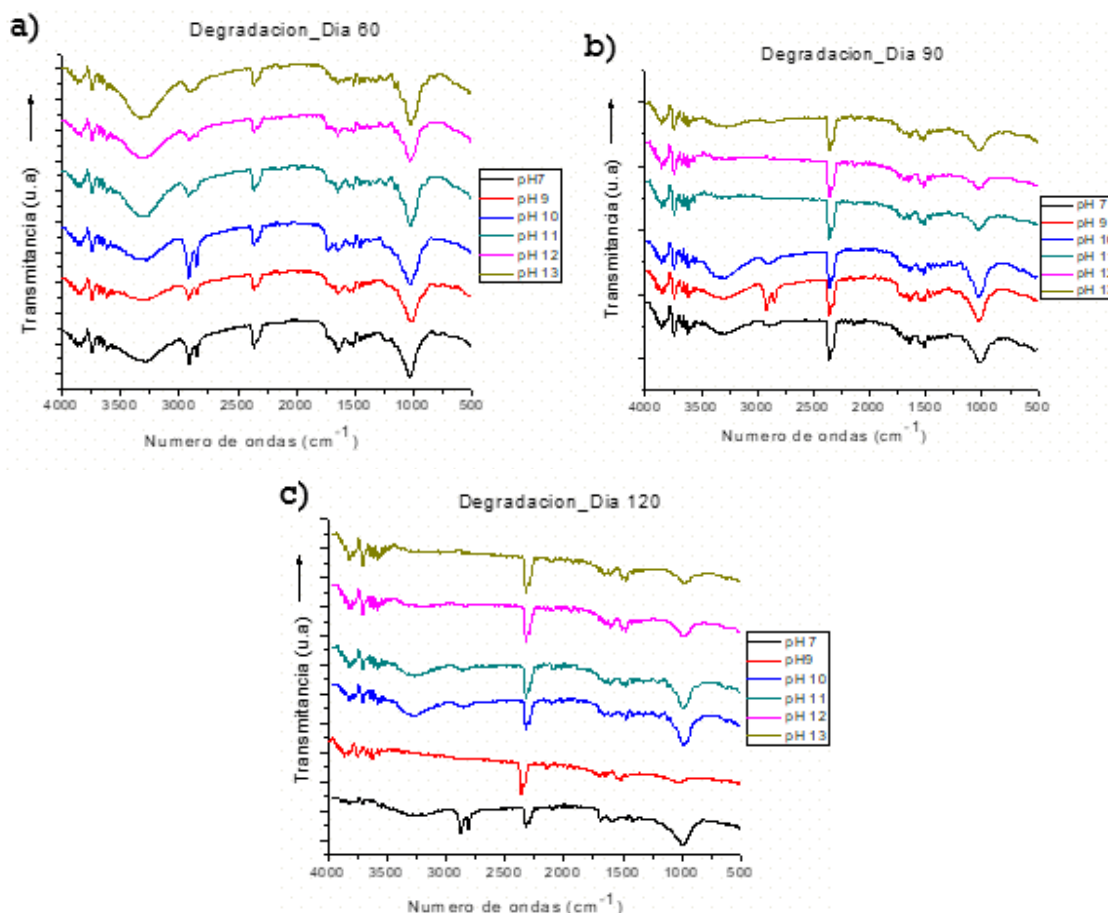


Figura 7. Espectros FTIR de las muestras del bagazo sometidas a diferentes valores de pH: (a) 60 días de degradación, (b) 90 días de degradación y (c) 120 días de degradación.

La degradación a 90 y 120 días proporciona resultados muy similares a los de 60 días, los espectros de las muestras sometidas a pH 7, 9 y 10 permanecen prácticamente sin cambios, mientras que los



espectros de las muestras sometidas a pH 11 y 12 pierden incluso el pico a  $1430\text{ cm}^{-1}$  característico de la celulosa sin embargo mantienen sin cambios el pico a  $902\text{ cm}^{-1}$  (Bilba & Ouensanga, 1996; Cao et al., 2006). Estos resultados comprueban que a valores elevados de pH 11 y 12, las muestras pierden los picos característicos de lignina, lo que corresponde a una delignificación, mientras que a valores de pH de 9 y 10 se añaden iones hidroxilo a la estructura de los componentes de la fibra de bagazo, lo que es sabido que causa hinchamiento de las moléculas, hidrólisis de los enlaces éster y ruptura de los enlaces de hidrógeno inter moleculares entre la hemicelulosa y la celulosa generando que las hemicelulosas se solubilizan en agua separándose de las fibras de celulosa.

### 3.3 Caracterización de las muestras de concreto

#### 3.3.1 Determinación de volumen de vacíos permeables

La figura 18 muestra los porcentajes de volumen de vacíos permeables de las muestras. Esta reducción de los vacíos se debe al espacio ocupado por las fibras, lo cual es una desventaja para el avance del frente de carbonatación. Estos resultados confirmaron el mecanismo de sellado de poros propuesto por Talavera-Pech et al. (2021).

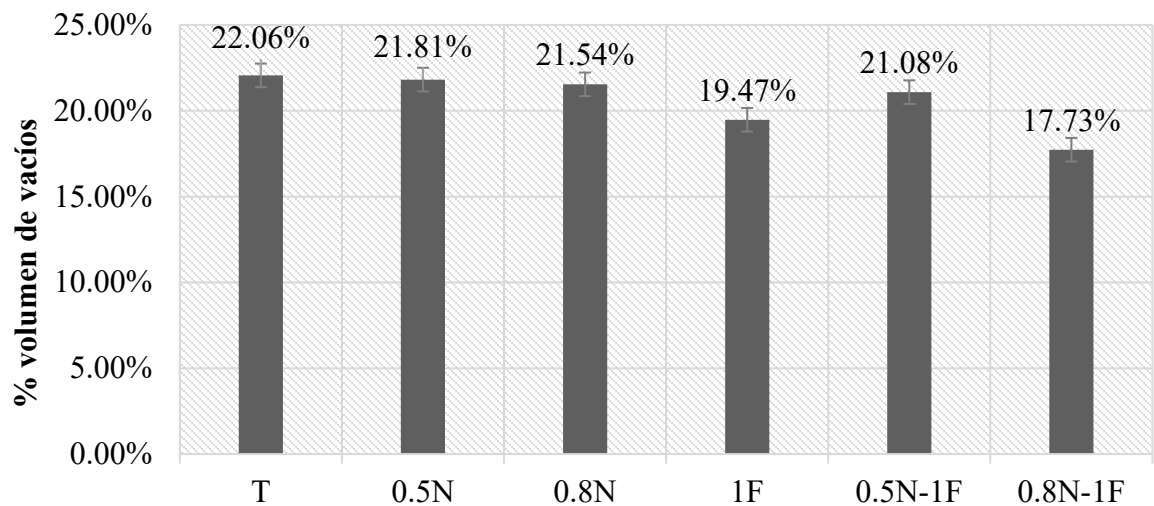


Figura 8. Diagrama del porcentaje de volumen de vacíos permeables de las muestras de concreto.

#### 3.3.2 Pruebas de resistencia a la compresión

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión obtenidos en unidades de MPa a los 7, 14 y 28 días para este trabajo. En general se observa que, al aumentar la edad de los especímenes de concreto, la resistencia a la compresión se incrementa, en la muestra control y en las muestras con adiciones de fibras de bagazo de caña (FBC 1%) y nanopartículas MCM-41 (0.5 y 0.8%). Para las muestras que contienen MCM-41, la máxima resistencia a la compresión se obtuvo para la muestra 0.8N envejecida 28 días y alcanza 22.343 MPa con un incremento del 1.24 % en comparación con la muestra control y 0.94 % en comparación con la muestra 0.5N. Por otra parte, para las muestras que contienen FBC, la máxima resistencia a la compresión se obtuvo también para la muestra envejecida 28 días y alcanza 23.519 MPa con un incremento del 6.18 % en comparación con la muestra T y 5 % en comparación con la muestra 0.8N. Adicionalmente, para las muestras que contienen fibras y nanopartículas, la máxima resistencia a la compresión se obtuvo para la muestra 0.8N-1F envejecida 28 días y alcanza 26.993 MPa con un incremento del 18.26 % en comparación con la muestra control y 14.89 % en comparación con la muestra 0.5N-1F.

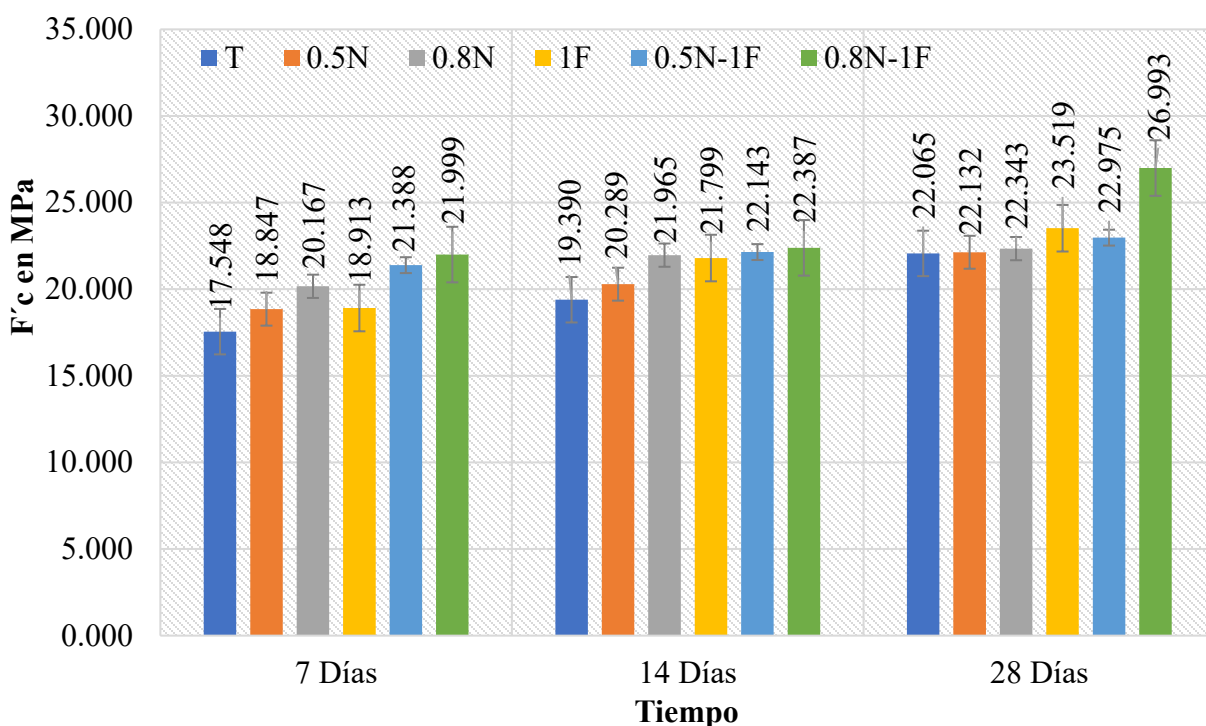


Figura 9. Diagrama de los resultados de resistencia a la compresión de las muestras de concreto. Basándose en el análisis de los datos obtenidos, se aprecia que el valor óptimo de adición de nanopartículas es el 0.8 por ciento, aunque no mejoró significativamente a la resistencia a la compresión del concreto, pero combinado con la fibra de bagazo de caña (0.8N-1F) proporciona mayor resistencia a la compresión con respecto al valor de la muestra control. Esta ligera mejoría puede explicarse con los resultados del comportamiento de las fibras en los análisis FTIR y SEM de las fibras sometidas a valores de pH alcalino de los concretos, ya que se observa que las fibras sufren una rotura y un aumento de su volumen, provocando un efecto de sellado de poros en las pastas de concreto (Talavera-Pech et al., 2021).

### 2.5.3 Pruebas de resistencia a la flexión

El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura (MR) y se determinó mediante el ensayo de resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro cómo se estipula en la Norma Mexicana NMX-C-303– ONNCCE-2010. La resistencia a flexión normalmente representa entre el 12 a 15% de la resistencia a compresión; para una resistencia  $f'c = 27.459$  MPa diseñada en este trabajo, se espera un módulo de ruptura de 3.236 a 4.112 MPa.

En la figura 20, se aprecia que el valor del MR para la muestra T está dentro de este rango de valores esperados. Para la muestra 0.8N-1F, el valor del MR es igual a 6.549 MPa, valor muy superior al esperado en concreto convencional. Cabe mencionar que esta característica puede ser aprovechada para analizar la factibilidad de utilización de este tipo de concretos (1F, 0.5N-1F, 0.8N-1F) para pavimentos que se especifican por su resistencia a la flexión.

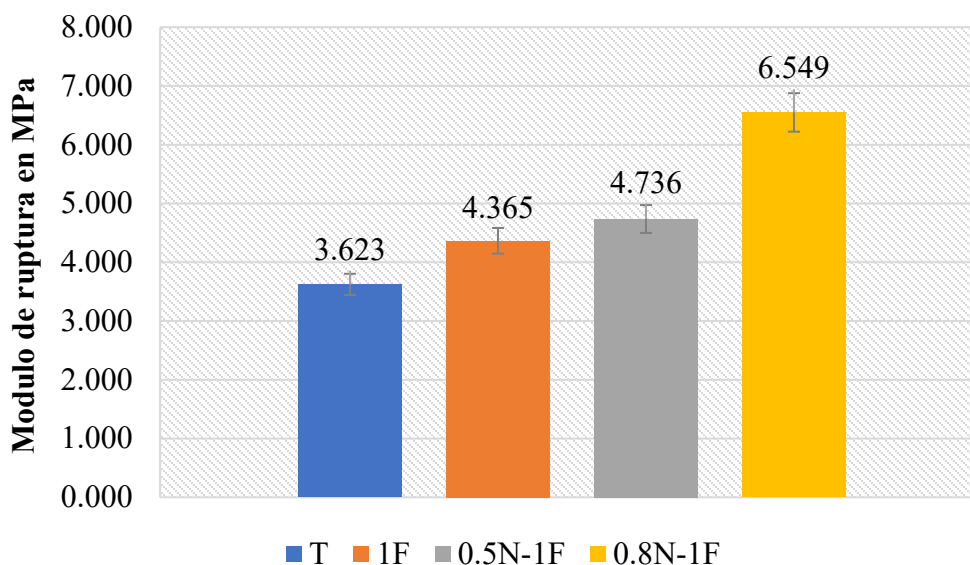


Figura 10. Diagrama de los resultados de resistencia a flexión a 28 días.

A partir de estos resultados, puede decirse que el valor óptimo de resistencia a la flexión adquirida es similar al de la resistencia a la compresión adquirida con la con la adición de la fibra y el nanomaterial. Estos datos de resistencias a la flexión se deben a las redes de fibras, que actúan como puente de transferencia de esfuerzos. La red de fibras refuerza los concretos contra la propagación de grietas, controlando sus aberturas y posiblemente retrasando el agrietamiento/fractura de los concreto (Ribeiro et al., 2020).

### 3.4 Deterioro químico del concreto por carbonatación acelerada

Con la finalidad de acelerar el proceso de carbonatación en el concreto, y luego de cumplidos los 28 días de curado, se colocaron en la cámara adaptada en el laboratorio de concreto del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, con la capacidad de mantener las condiciones experimentales en  $25 \pm 2$  °C de temperatura y  $65 \pm 5$  % de humedad relativa. A un costado se instaló un tanque comercial de CO<sub>2</sub> de 25 kg con un medidor de flujo, que permitió mantener dentro de la cámara una concentración constante de 3 %, ambiente con mayor concentración de CO<sub>2</sub> que en el ambiente normal (Talavera Pech et al., 2021).

Dentro de la cámara se colocaron un medidor de humedad relativa y un medidor de CO<sub>2</sub>. Asimismo, se conectaron dos ventiladores, uno en cada extremo, con la finalidad de lograr una mejor

La Figura 11 muestra los resultados de las mediciones de carbonatación. Los valores son el promedio de ocho mediciones, convertidos de mediciones en una superficie cilíndrica en mediciones en una superficie plana, debido al uso de especímenes cilíndricos (Moreno et al., 2005). De acuerdo con el avance de carbonatación obtenido, en este tiempo de exposición, la neutralización aún no ha alcanzado la varilla de acero de refuerzo, estando aproximadamente a 20 mm en los especímenes de control.

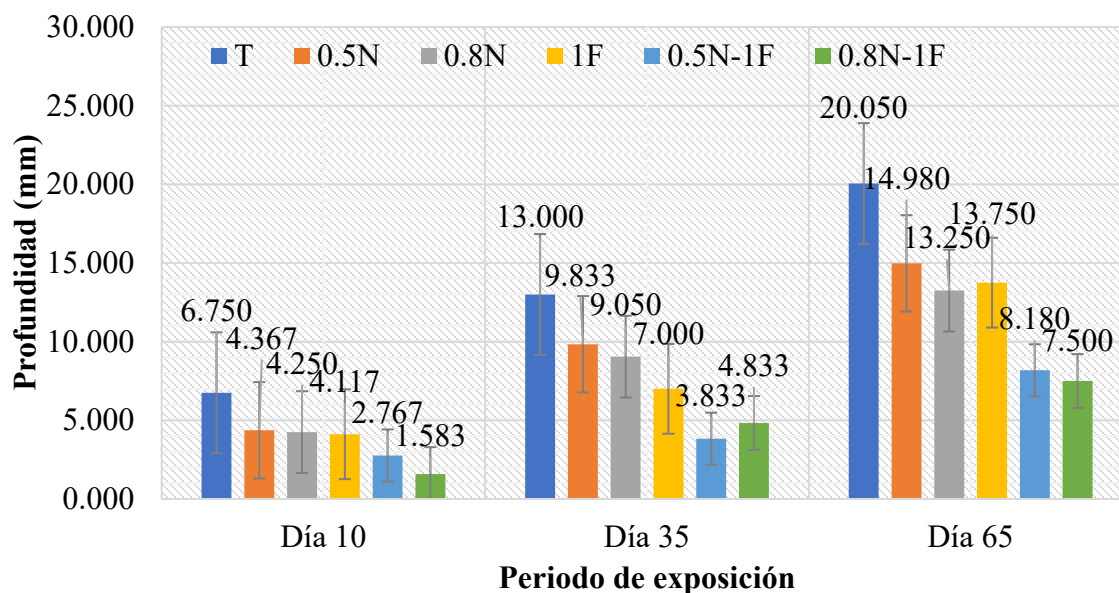


Figura 11. Diagrama del grado de carbonatación de las muestras de concreto.

### 3.5 Pruebas electroquímicas

#### 3.5.1 Medición de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ )

En la figura 12, se presentan los resultados de medición del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) promedio durante la carbonatación acelerada. Los valores obtenidos indican que el acero se mantuvo activo durante el periodo de exposición (valores menores a  $-350$  mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>). E. I. Moreno et al. (2005) observaron cambios en el  $E_{corr}$  hacia valores más negativos como resultado de la carbonatación al nivel de la varilla.

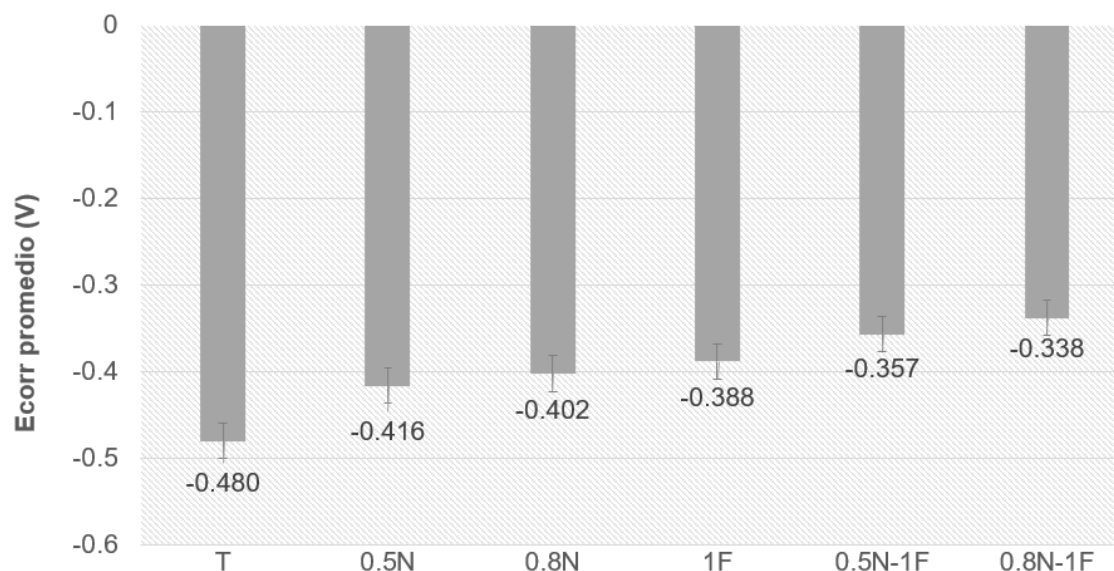


Figura 12. Gráfica de medición de potencial de corrosión de las muestras de concreto.

#### 3.5.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE)

Se aplicó la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica a todos los concretos elaborados en el presente trabajo considerando su evaluación a los 10, 35 y 65 días de exposición en la cámara de carbonatación acelerada. El modelamiento del sistema corresponde al mostrado en

la figura. Este modelo explica electroquímicamente el efecto del CO<sub>2</sub> sobre la ruptura de la pasividad del acero, y es el que mejor se ajusta en este estudio (Hernández et al., n.d.).

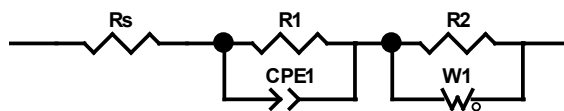
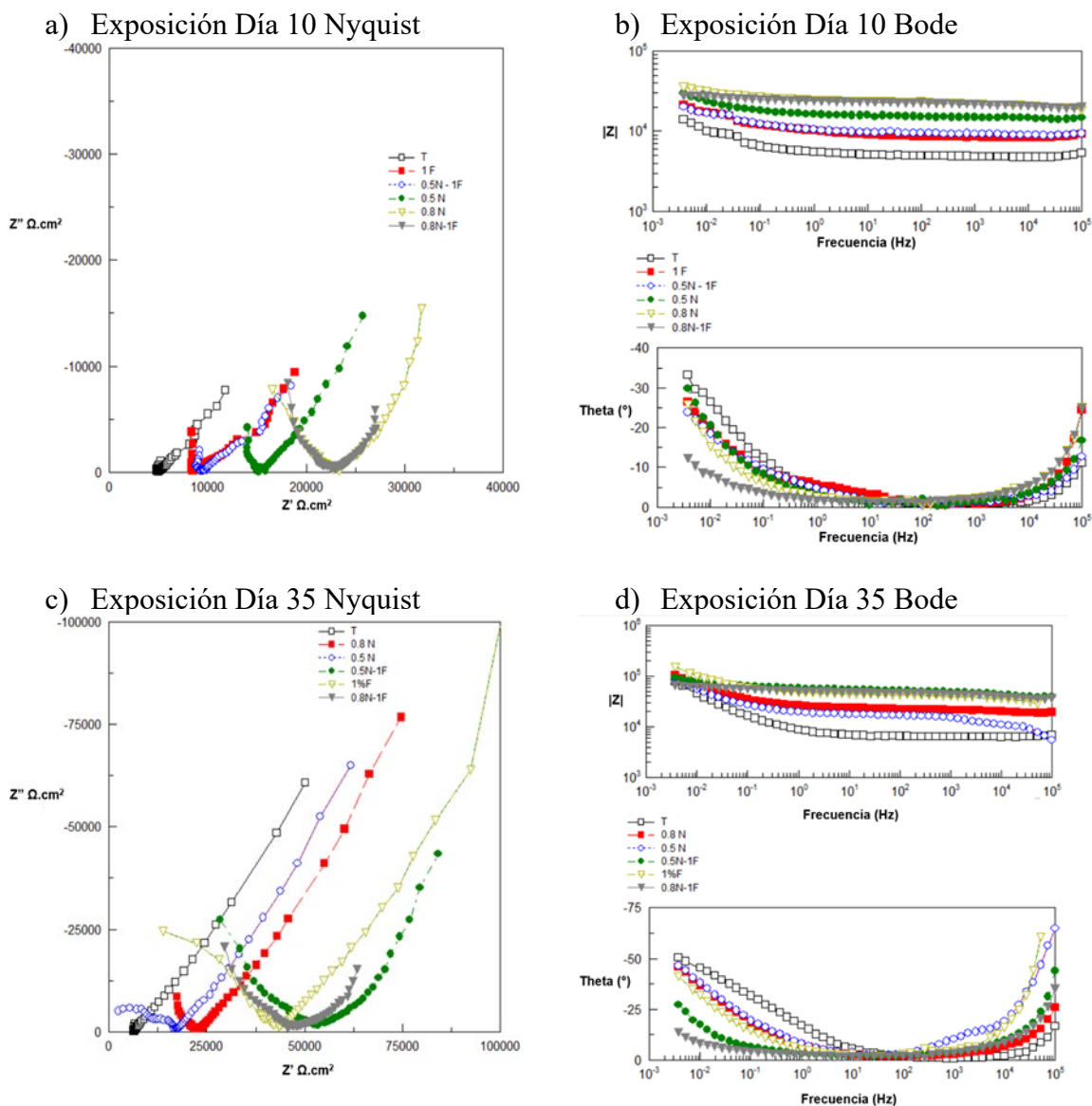


Figura 13. Circuito equivalente propuesto.



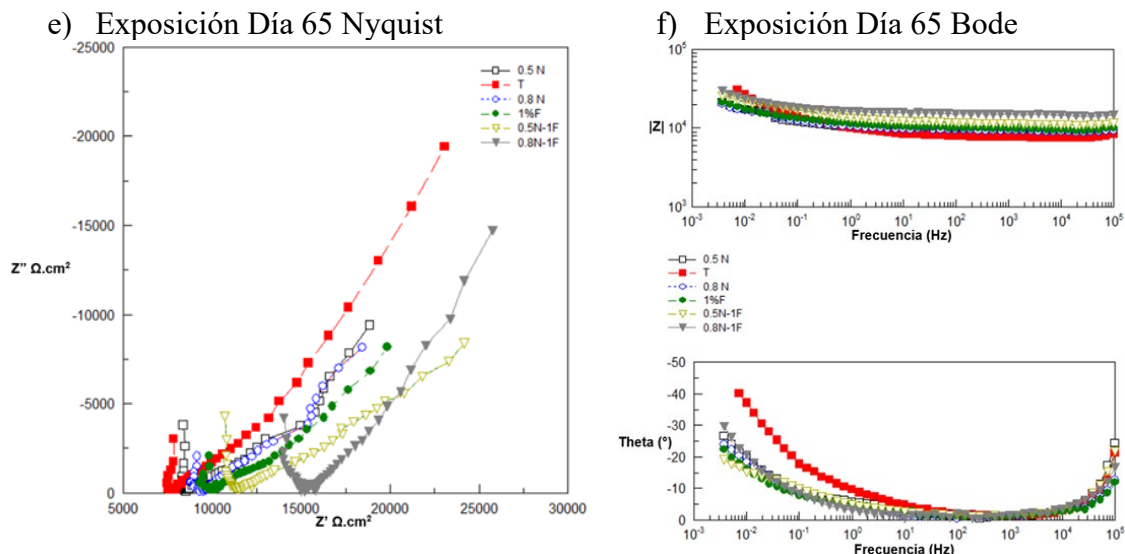


Figura 14. Diagramas de Nyquist y de Bode para las muestras de concreto a 10, 35, 65 días de exposición.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se realizó un procedimiento de fusión alcalina, el cual demostró ser una técnica adecuada para cambiar las características fisicoquímicas del vidrio y para obtener como producto final soluciones translúcidas de silicato de sodio. También se demostró que las soluciones de silicato de sodio obtenidas a partir de vidrio reciclado pueden ser utilizadas como precursores para la síntesis de las nanopartículas de sílice mesoporosas tipo MCM-41 mediante la ruta sol-gel con las características deseadas. De acuerdo con el análisis de resultados obtenido de la caracterización fisicoquímica y electroquímica del concreto reforzado se puede concluir lo siguiente: los ensayos de resistencia de compresión y flexión mostraron una ligera mejoría con la adición de la fibra y el nanomaterial. Con el ensayo de carbonatación acelerada se aprecia que la presencia de FBC tiene mayor efecto en la disminución del avance de la carbonatación que la adición del nanomaterial y que la combinación ofrece aún mayor disminución en el avance de la neutralización de la pasta de concreto. Las pruebas de rendimiento indicaron que la adición de fibra de bagazo de caña de azúcar, particularmente para las muestras 0.8N-1F, mejoró las propiedades de los concretos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

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

I.C. Albertho Michel agradece no solo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca (1032132) otorgada para la realización de sus estudios de maestría, sino también al Centro de Investigación en Corrosión (CICORR).

## 6. REFERENCIAS

- Andersson, R., Stripple, H., Gustafsson, T., & Ljungkrantz, C. (2019). *Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material*. Cement and Concrete Research, 124, 105819. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.105819>
- Asim, M., Uddin, G. M., Jamshaid, H., Raza, A., Rehman, Z. ul, Hussain, U., Satti, A. N., Hayat, N., & Arafat, S. M. (2020). *Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials*. Journal of Building Engineering, 31, 101411. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101411>
- Borges, P. C. (2010). *Impacto del cambio climático global en la durabilidad y el desarrollo sustentable de las construcciones de concreto. ¿Qué es el Calentamiento Global? Causantes del Calentamiento Global* (p. 69).
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers*. Journal of the American Chemical Society, 60(2), 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Cruz-Moreno, D., Fajardo, G., Flores-Vivian, I., Orozco-Cruz, R., & Ramos-Rivera, C. (2020). *Multifunctional surfaces of portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles*. Applied Surface Science, 531, 147355. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2020.147355>
- Devadiga, D. G., Bhat, K. S., & Mahesha, G. T. (2020). *Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications*. Cogent Engineering, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1823159>
- Hernández-Olivares, F., Elizabeth Medina-Alvarado, R., Burneo-Valdivieso, X. E., & Rodrigo Zúñiga-Suárez, A. (2020). *Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction*. Construction and Building Materials, 247, 118451. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118451>
- Hernández, H. H., Reynoso, A. M. R., González, J. C. T., Morán, C. O. G., Hernández, J. G. M., Ruiz, A. M., Hernández, J. M., & Cruz, R. O. (n.d.). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels*. In IntechOpen (p. 35). [https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94470](https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94470)
- Kamarudin, N. H. N., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Salleh, N. F. M., Karim, A. H., Mukti, R. R., Hameed, B. H., & Ahmad, A. (2013). *Role of 3-aminopropyltriethoxysilane in the preparation of mesoporous silica nanoparticles for ibuprofen delivery: Effect on physicochemical properties*. MICROPOROUS AND MESOPOROUS MATERIALS, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.06.041>
- Kinashi, K., Kambe, Y., Misaki, M., Koshihara, Y., Ishida, K., & Ueda, Y. (2012). *Synthesis, characterization, photo-induced alignment, and surface orientation of poly(9,9-dioctylfluorene-alt-azobenzene)s*. Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry, 50(24), 5107–5114. <https://doi.org/10.1002/pola.26338>
- Kresge, C. T., & Roth, W. J. (2013). *The discovery of mesoporous molecular sieves from the twenty year perspective*. Chem Soc Rev, 3–5. <https://doi.org/10.1039/c3cs60016e>
- Limpo, J., Rubio, J., & Oteo, J. L. (1993). *Estudio por FT-IR de la hidrólisis del tetraetilortosilicato*. Bol Soc. Esp. Ceram. Vidr, 32, 31–35.
- Loh, Y. R., Sujun, D., Rahman, M. E., & Das, C. A. (2013). *Review Sugarcane bagasse - The future composite material: A literature review*. Resources, Conservation and Recycling, 75, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>
- Majchrzak-Kuceba, I., & Nowak, W. (2011). *Characterization of MCM-41 mesoporous materials derived from polish fly ashes*. International Journal of Mineral Processing, 101(1–4), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.09.002>

- Mas Font, N. (2014). *Design of new hybrid nanomaterials with molecular gates as nanodevices for therapeutic applications*. In Universidad Politécnica de Valencia.
- Moreno, E. I., Ixtepan, D. S., Sarabia, E. C. (2005). *Barras de acero galvanizado: Una opción contra la corrosión inducida por la carbonatación*. Ingeniería, 9(2), 17–24.
- Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). *Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces*. Case Studies in Construction Materials, 5, 53–63. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2016.07.001>
- Nazari, A., & Riahi, S. (2010). *Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles*. Materials Science and Engineering: A, 527(29–30), 7663–7672. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2010.08.095>
- P. da Silva, A. C., Cordeiro, P. H. Y., Estevão, B. M., Caetano, W., Eckert, H., Santin, S. M. O., Moisés, M. P., Hioka, N., & Tessaro, A. L. (2019). *Synthesis of highly ordered mesoporous MCM-41: Selective external functionalization by time control*. Journal of the Brazilian Chemical Society, 30(8), 1599–1607. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190058>
- Peñaloza, D., Erlandsson, M., Berlin, J., Wålinder, M., & Falk, A. (2018). *Future scenarios for climate mitigation of new construction in Sweden: Effects of different technological pathways*. Journal of Cleaner Production, 187, 1025–1035. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.285>
- Talavera-Pech, W.A.; Montiel-Rodríguez, D.; Paat-Estrella, J.d.l.A.; López-Alcántara, R.; Pérez-Quiroz, J.T.; Pérez-López, T. (2021). *Improvement in the Carbonation Resistance of Construction Mortar with Cane Bagasse Fiber Added*. Materials, 14, 2066. <https://doi.org/10.3390/ma14082066>
- PROCONSA ®, G. D. C. & B. / P. (n.d.). *Hoja técnica\_ Producto: Dispercon “AL-100”* (p. 1). [www.grupodiamond.com](http://www.grupodiamond.com)
- Ribeiro, B., Uchiyama, T., Tomiyama, J., Yamamoto, T., & Yamashiki, Y. (2020). *Development of interlocking concrete blocks with added sugarcane residues*. Fibers, 8(61), 1–12. <https://doi.org/10.3390/FIB8100061>
- Rosenholm, J. M., Sahlgren, C., & Lindén, M. (2010). *Towards multifunctional, targeted drug delivery systems using mesoporous silica nanoparticles - Opportunities & challenges*. Nanoscale, 2(10), 1870–1883. <https://doi.org/10.1039/c0nr00156b>
- Serrano, M. R., Saracho, A. M. P. G., Acosta, D. E., Bonini, N. A., Gonzo, E. E., & Parentis, M. L. (2018). *Síntesis de sílice mesoestructurada: determinación de las condiciones óptimas de extracción del templat*. Matéria (Rio de Janeiro), 23(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0465>
- Talukdar, S., & Banthia, N. (2013). *Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model*. Construction and Building Materials, 40, 775–782. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.026>





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-878-MX  
pp. PC – 150 – 164



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. II, Patología de las Construcciones

## Evaluación de una nueva tipología de estribos embebidos en concreto frente a la corrosión inducida por cloruros

A. Capistrano-García<sup>1</sup>, J. Álvarez-Pérez<sup>1</sup>, R. Orozco-Cruz<sup>2</sup>, G. Fajardo-San-Miguel<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx](mailto:gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx)

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C. P. 66455, México.

<sup>2</sup> Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería Civil, S. S. Juan Pablo II s/n Zona Universitaria, C.P. 94294 Boca del Río, Veracruz, México

### RESUMEN

De acuerdo con el INEGI 2020, las edificaciones de mampostería confinada representan el 60% de la infraestructura urbana en México. Para su construcción se requiere de un adecuado diseño estructural, siendo fundamentales el concreto y el acero, acorde a las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería con Comentarios (NTCC, 2018). En esta investigación en curso se evaluará el comportamiento frente a la corrosión inducida por cloruros de una nueva tipología de estribos flejados en espiral (EFE) con uso potencial en castillos, característicos de este sistema constructivo. Para ello, especímenes de concreto con EFE fueron elaborados con y sin cloruros en la mezcla, y posteriormente fueron sometidos a ciclos repetidos de inmersión de 3 días en una solución de NaCl con una concentración de 35 g/L, seguido de un secado en horno a 40°C. El EFE fue caracterizado mediante ensayos químicos, metalográficos y mecánicos. El seguimiento del Ecorr, icorr y resistividad fue realizado periódicamente en los especímenes de concreto. Los resultados permitirán comprender el comportamiento del EFE frente al deterioro por corrosión desde la etapa de iniciación hasta la propagación. Finalmente, los resultados obtenidos permitirán sustentar la pertinencia del empleo de la nueva tipología de estribos sin comprometer la durabilidad de la vivienda de mampostería confinada.

**Palabras clave:** mampostería; acero; concreto; refuerzo transversal; corrosión

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2020) el 87% de la vivienda tradicional de mampostería está construida a base de muros de mampostería que, en su mayoría, emplea el sistema constructivo de mampostería confinada, siendo evidente tanto en zonas urbanas y rurales (Álvarez *et.al.*, 2021). Estos tipos de muros se construyen utilizando castillos y dalas de concreto reforzado. Por norma, la separación de los castillos debe ser inferior a 4 m o 1.5 veces la altura de la pared y su espesor superior a 100 mm, de acuerdo con el ancho de la unidad de mampostería (Cruz *et.al.*, 2019).

Es sabido que el concreto es uno de los materiales de construcción mayormente empleados y la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado depende de la doble protección, física y química, que ofrece el concreto al acero embebido. Dicha protección depende directamente del recubrimiento de concreto especificado en el diseño de mezcla y de la calidad de los materiales que la constituyen, así como del proceso de vaciado y curado.

Al existir deficiencias en la doble protección del concreto, el acero de refuerzo queda vulnerable, con alto riesgo de sufrir deterioro por corrosión ante el ingreso de agentes agresivos como los cloruros, sulfatos, sustancias químicas, etc., que se encuentran en el medio ambiente y que de manera constante pueden penetrar en la matriz cementante por difusión y/o absorción. Es por ello que las barras de refuerzo, comúnmente, son afectadas debido al flujo de cloruros libres que son adsorbidos por los poros de gel del concreto durante la hidratación del cemento o bien permanecen de forma iónica (Castro *et.al.*, 2020).

Por otra parte, se reconoce que donde existen problemas de corrosión el impacto económico afecta hasta en un 3.5 % en el PIB de cualquier país, con pérdidas de 65 billones de dólares por año, desglosándose en varios rubros como son la industria del transporte, los servicios y la construcción (Garcés *et.al.*, 2008). Aunque es importante señalar que estas pérdidas económicas solo consideran los costes de mantenimiento y/o sustitución de partes corroídas, por lo que ha hecho falta atender el problema desde la etapa de diseño.

Es importante señalar que, en la mampostería confinada, el estudio de la corrosión del acero de refuerzo debería ser un aspecto muy importante y obligatorio por incorporar en el diseño estructural. Por tal motivo, en este estudio se tiene por objetivo la evaluación del deterioro por corrosión en el acero de refuerzo transversal, o comúnmente conocido como estribos, debido a que intervienen significativamente en la resistencia al cortante de la mampostería. Para ello, se propuso una nueva tipología de estribos denominado flejeados en espiral (EFE) y su comparativa con los estribos tradicionales. Este material producido por una empresa acerera de la zona metropolitana de Monterrey ha evidenciado una mejoría en la resistencia mecánica de castillos sometidos a la compresión comparado con elementos fabricados con estribos tradicionales, alcanzando un aumento de más del 78% en el confinamiento del concreto en la rama de descarga de la curva esfuerzo-deformación (Álvarez *et.al.*, 2020). Este comportamiento se atribuye al hecho de que existe un área de contacto expuesta mayor entre el acero y el concreto comparado con los estribos de sección cilíndrica. Adicionalmente, una vez que se ha alcanzado la resistencia a la compresión máxima de los castillos, la pérdida de rigidez es menor, siendo muy notoria la reducción en el volumen de acero empleado con una cuantía menor del 14%, ambos comparados con los estribos tradicionales.

De igual manera, en otro estudio (Shatarat *et.al.*, 2016), se evidenció que el comportamiento mecánico en los estribos en forma de espiral se mostró más favorecido que en estribos tradicionales, debido a que se incrementó la resistencia al cortante y la ductilidad gracias al ángulo de inclinación de 80° entre las espirales y la separación, acorde a ACI 318M-14. De igual modo, (Saha *et.al.*, 2019) determinaron que los estribos en espiral continuos superaron a los estribos convencionales

en términos de máxima resistencia, rigidez de degradación, factor de ductilidad y disipación de energía acumulada (registrando un incremento del 31% al 40 %). Se encontró que el uso del refuerzo en espiral continuo, mejora la ductilidad y la capacidad de corte del espécimen.

Después de haber analizado los antecedentes de estudios mecánicos en estribos, destaca la importancia de realizar un estudio de corrosión en las dos tipologías de estribos, determinando de esta manera, los parámetros electroquímicos del deterioro del acero y los aspectos de durabilidad del concreto reforzado.

En este sentido, al hablar del estado del arte sobre estudios de estribos sometidos a la corrosión y su relación con el comportamiento estructural, en la literatura se puede citar el trabajo de Juárez y colaboradores (Juárez *et.al.*, 2011) quienes determinaron que el diámetro crítico de los estribos refuerzo transversal de vigas de concreto reforzado fue el factor clave para predecir la resistencia máxima en el cortante que llegó al 30% acompañada de la pérdida de sección. En otro estudio (Wang *et.al.*, 2015), se experimentó con dos tipos de refuerzo transversal en el deterioro de la capacidad cortante de vigas de concreto reforzado y mediante la prueba de corrosión acelerada se obtuvieron diferentes niveles de deterioro en estribos y barras inclinadas. Se encontró una mejoría sobre la degradación al corte en un 10%, con menor efecto sobre la rigidez inicial a cortante antes de la fisuración. En la sección corroída disminuyó la rigidez, lo cual, según el ACI, se puede estimar la resistencia residual de vigas. En un trabajo relacionado (Chang *et.al.*, 2014), se destacó que los estribos influyen en la eficiencia de remoción electroquímica de cloruros (ECR), estudiando las condiciones de corrosión de las barras de acero y encontraron que la jaula o envoltura que ofrecen los estribos lo convierte en un blindaje equipotencial e impide la migración de los iones cloruro, retrasando el proceso de corrosión y el potencial de circuito se hizo más noble, lo que llevó a la lixiviación de los iones de calcio dentro del concreto.

En este sentido algunos investigadores (Andrade *et.al.*, 1999), (Fajardo *et.al.*, 2009) y (Rivera *et.al.*, 2017) han destacado la utilidad de realizar pruebas electroquímicas LPR y EIS, así como la determinación de la concentración de cloruros, velocidad de pulso ultrasónico, porosidad o permeabilidad del ion cloruro y resistividad eléctrica en el concreto para conocer los parámetros de durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

Por tal motivo, en este estudio se evaluaron las dos tipologías de estribos de acero al carbono en el concreto reforzado, tanto EFE y tradicional, obteniéndose los parámetros de durabilidad del concreto reforzado (concentración de cloruros, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad, resistividad eléctrica). Adicionalmente, se determinó la resistencia mecánica a la compresión del concreto, la caracterización del acero antes y durante las etapas de corrosión, así como la evaluación electroquímica correspondiente para obtener valores de potencial de corrosión, tasa de corrosión, resistividad eléctrica y con ello determinar la pérdida de sección de acero y valorar la pertinencia del uso de la nueva tipología de estribos de acero al carbono acorde a ASTM C876 y RILEM TC – 154 (Martínez, 2018) y NTCC 2018. Se destaca como aportación científica la evaluación de la pertinencia del empleo de una nueva tipología de estribos en la mampostería confinada como una alternativa de materiales de construcción de edificaciones.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

Se empleó un cemento portland ordinario (CPO 40) que cumple con la especificación NMX-C-414-ONNCCE, TMN ¾” agregado grueso; acero al carbono colado en frío grado industrial A60 acorde a la ASTM A370 y G-42 acorde a la NMX-C-407-ONNCCE correspondiente al estribo tradicional con sección circular Ø No 2 y también para el EFE de sección laminar rectangular con espesor de 1 mm. Véase figura 1.

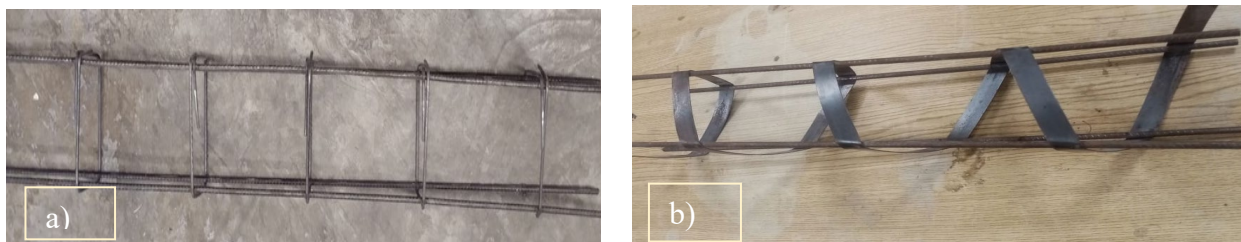


Figura 1. Estribos prefabricados: a) tradicional de alambroón (EA) y b) flejado en espiral (EFE).

Por otra parte, se realizó un diseño de mezcla para una resistencia a la compresión de 20 MPa, representativo del concreto usado en castillos de mampostería confinada. De acuerdo a lo especificado en NTCC 2017, el concreto para esta aplicación debe tener una resistencia a la compresión mínima de 150 kgf/cm<sup>2</sup> (o 15 MPa). En la Tabla 1 se presenta el proporcionamiento.

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla empleada en la elaboración del concreto

Ingredientes	Cantidades
Agua, kg/m <sup>3</sup>	150
Cemento, kg/m <sup>3</sup>	190
Grava ¾", kg/m <sup>3</sup>	865
Arena, kg/m <sup>3</sup>	1185
Aditivo superplastificante (7cc), ml	1295
Rel a/c	0.75
f'c diseño, MPa	20

## 2.2 Elaboración de especímenes

Se elaboraron 30 especímenes de concreto con acero embebido, con las dos tipologías de estribos, (Véase detalle en figura 2). Para esto se cortaron 30 piezas de estribos de 9 cm de longitud (15 muestras de EFE y 15 muestras de estribo tradicional), que luego siguieron un procedimiento de limpieza química acorde a la ASTM G-1 (ASTM G-1, 1999). Después se realizó un corte en uno de los extremos para colocar el conductor eléctrico. Posteriormente, las piezas de acero fueron pesadas, identificando el área expuesta y protegiendo del resto de la superficie con pintura epóxica. De acuerdo con el diseño de experimentos, se duplicó la cantidad de especímenes debido a que se usaron dos condiciones en el diseño mezclas. La primera fue un concreto simple como referencia y la segunda un concreto con incorporación de cloruros en el agua de la mezcla, con una concentración de 35 g/l.

Después de la elaboración de especímenes, acorde a ASTM C 192/C 192 fueron colocados en el cuarto de curado a  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  con un RH de 95% durante 24 h y luego fueron desmoldados y curados a  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  con un RH de 100% durante 28 días. Estos especímenes fueron destinados para las pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

Adicionalmente, se elaboraron 15 cilindros de concreto de 10x20 cm para pruebas mecánicas con edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días para cada condición de diseño de mezcla. Así mismo, se elaboraron 5 cilindros de concreto para determinar algunos indicadores de durabilidad del concreto.

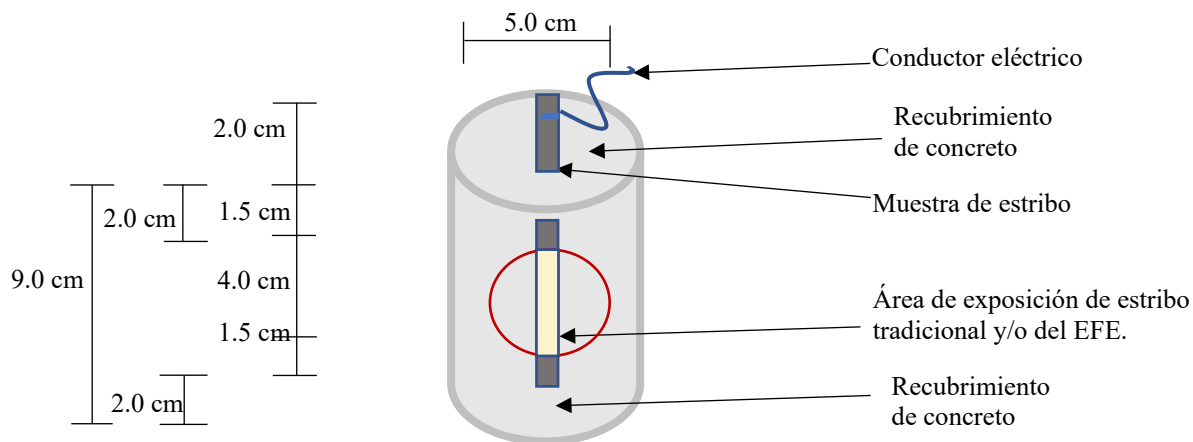


Figura 2. Detalle de especímenes de concreto con acero embebido.

Para la identificación de los especímenes durante la evaluación electroquímica se usó la nomenclatura que se señala en la Tabla 2.

Tabla 2. Nomenclatura de especímenes

Especímenes sin cloruros o de Referencia	Especímenes con cloruros
Estribo tradicional de alambIÓN, REF-EA	Estribo tradicional de alambIÓN, EA-CL
Estribo flejeado en espiral, REF-FL	Estribo flejeado en espiral, EFL-CL

### 2.3 Determinación de la resistencia mecánica del concreto

Para esta prueba se elaboraron 12 cilindros de concreto de 10x20 cm (diámetro x espesor), para dar seguimiento y verificar la resistencia mínima de diseño a los 28 días y 3 cilindros restantes a los 56 días, acorde a la ASTM-C1152, ASTM 39 (Véase figura 4). La resistencia a la compresión considerada fue de  $f'c = 20$  MPa, acorde a la ASTM C-39 y ASTM C-1231 y NTCC 2017, cumpliendo con el requerimiento mínimo de  $f'c = 15$  MPa para castillos de mampostería confinada. Para esto se ha usado una máquina universal Instron 600 DX con una carga constante aplicada de 210 kgf/s.

### 2.4 Determinación de índices de durabilidad del concreto

En relación con la determinación de los índices de durabilidad del concreto elaborado, se ha considerado realizar pruebas físicas no destructivas y/o semidestructiva.

#### 2.4.1 Resistividad eléctrica del concreto

De la prueba electroquímica de EIS se obtiene la resistencia eléctrica del concreto y se incorpora en la expresión:

$$\rho = \frac{R_{conc}(2\pi)(L)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

Donde:

$\rho$ = Resistividad eléctrica del concreto,  $k\Omega \cdot cm$ .

$R_{conc}$ = Resistencia eléctrica del concreto,  $\Omega$ .

$L$ = longitud la zona de estudio,  $cm$ .

$r_1$  = radio del acero, cm.

$r_2$  = radio del espécimen de concreto, cm.

Nota: Para el caso del EFL,  $r_1$  = espesor de la muestra del EFE, cm.

En esta prueba se ha identificado el comportamiento del concreto ante el flujo de corriente eléctrica, mostrando aspectos del concreto como su microestructura, porosidad y grado de saturación, así como, un indicador del fraguado, resistencia mecánica, grado de saturación e impermeabilidad del concreto, que además se puede utilizar como indicador de corrosión para calcular los periodos de iniciación y propagación.

Además, usando el equipo Pundit se ha obtenido un valor comparativo del grado de resistividad de la matriz cementante al ingreso del ion cloruro y con ello se ha determinado el pronóstico del fallo por corrosión de la estructura, identificando la velocidad de la señal eléctrica a través del medio conductor y su llegada al acero de refuerzo. Para el desarrollo de la prueba se usaron 2 especímenes de 10x20 cm, con la condición de incorporación de cloruros en la mezcla y el equipo empleado fue un Resipod Proceq acorde a ASTM-C-1152 y RILEM TC-154-EMC. Las mediciones se tienen programadas a los 28, 56 y 90 días.

#### **2.4.2 Contenido de cloruros**

Esta prueba se realizó para determinar cuantitativamente el contenido de cloruros que ingresan en el concreto y con ello predecir el nivel de impacto en la durabilidad. Se aplicó la norma ASTM C 114 con el método estándar para análisis de cloruros totales. Al final del ensayo de determinación de la resistencia a la compresión a 28 días, se tomaron muestras de especímenes expuestos a cloruros en el diseño de mezcla y se realizó la molienda para extraer polvos, para luego pesarlos en cantidades de 10 g. Posteriormente, se colocó el material en un vaso de precipitado con una solución de ácido nítrico con agua, 2.0 g/l. Enseguida, las muestras se agitaron con temperatura, para posteriormente enfriarlos a temperatura ambiente y se procedió a la medición en el equipo Titulador Metrohm. Estas pruebas estuvieron programadas a los 28, 56 y 90 días.

#### **2.4.3 Permeabilidad rápida a los cloruros**

En esta prueba semidestructiva rápida se buscó identificar la permeabilidad o resistencia física del concreto ante el ingreso de iones cloruros. Para ello se prepararon 3 muestras extraídas de los especímenes de concreto de 10x20cm, acorde a la ASTM C 1202, haciendo cortes de 5 cm de altura, para posteriormente proteger con pintura epóxica la superficie lateral curva. Después, las muestras fueron colocadas en una cámara de extracción de vacíos o desecador durante 3 horas, al término de la extracción de vacíos los especímenes fueron saturados por 20 horas y luego se aplicó nuevamente la extracción de vacíos por una hora más. Al finalizar esta etapa se extrajeron las muestras y se colocaron los especímenes en las celdas Proove it. Para dar continuidad a la prueba se prepararon dos soluciones, la primera con NaOH con una concentración de 12g/L y la segunda con NaCl con una concentración de 30g/L, que más tarde fueron vertidas en las celdas.

Una vez preparadas las celdas fueron conectadas a los canales del equipo Proove it y se corrió la prueba, aplicando una carga constante de 60 V durante 6 horas. Finalmente, se determinaron los valores de temperatura, carga eléctrica respecto al tiempo y nivel de permeabilidad del concreto ante el ingreso de iones cloruros.



Figura 3. Medición de concentración de permeabilidad en el concreto.

#### 2.4.4 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Esta prueba no destructiva se realizó de acuerdo con la ASTM C1240, para identificación, de manera predictiva, de la resistencia del concreto incluyendo algunas características físicas de los agregados, y/o algún parámetro de los proporcionamientos de los componentes, para ello se identificó la velocidad de propagación de corriente en el concreto.

Para el desarrollo de esta prueba se usó el equipo Pundit Lab, con dos transductores, uno que emite la señal eléctrica dentro de la matriz cementante y el otro la recibe. Los parámetros obtenidos fueron el tiempo y la velocidad de propagación en la masa del concreto, lo cual permitió identificar los probables cambios del concreto a través del tiempo, la elasticidad del material y su resistencia (Véase figura 4).

Las edades programadas para la medición fueron 28, 56 y 90 días para conocer el nivel de avance de la resistencia del concreto a través del tiempo.



Figura 4. Medición de velocidad de pulso ultrasónico en el concreto

#### 2.5 Condiciones de exposición a cloruros

Como es sabido, en condiciones ambientales normales, la velocidad de ingreso de los iones cloruros en el concreto es lenta, lo cual puede llevar años la medición de la evolución del deterioro. Por ello, se usó un proceso de aceleramiento de la corrosión mediante la colocación de los especímenes en

ciclos de inmersión parcial en solución con cloruros con una concentración de 35 g/l seguido de un secado de 4 días en horno a 40 °C. De esta manera se acelera el ingreso de los iones en la matriz de concreto y se descarta la presencia de la carbonatación.

## 2.6 Mediciones electroquímicas

Después de haber curado los especímenes por 24 horas se les realizó la medición electroquímica LPR usando el potenciostato AMETC PARSTAT a 3 especímenes de concreto de cada serie, con cada tipología de acero.

Hasta el momento los especímenes se han medido a los 3, 7, 14 y 28 días y se dará seguimiento con una programación a los 28, 56, 90 y 120 días. Con esta técnica se da seguimiento al desarrollo de las etapas de la corrosión en el acero (inicial, despasivación y propagación). Con la técnica LPR se ha obtenido el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y la resistencia a la polarización ( $R_p$ ), que se ha incorporado a la ecuación de Stern- Geary y para obtener la densidad de corriente de corrosión del acero, o  $i_{corr}$  (eq. 2) (ASTM C-876, 2000 y Andrade *et.al.*, 1999).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

Donde

$i_{corr}$ : Densidad de corriente,  $\mu A/cm^2$ .

B: Pendiente anódica-catódica, mV.

$R_p$ : Resistencia a la polarización,  $\Omega \cdot cm^2$ .

Los valores de B se asignan de acuerdo con el valor  $E_{corr}$  obtenido en la prueba de RPL, para estado pasivo,  $> -270$  mV vs SCE será de  $B = 52$  mV, en tanto que para el estado activo de  $B = 26$  mV con valores de  $E_{corr} < -270$  mV vs SCE.

Por otra parte, la medición de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), de acuerdo con la ASTM G-106, ha permitido identificar la señal de corriente que fluye en la interfaz del concreto a diferentes frecuencias, es decir se determinó la resistencia a la corrosión o resistividad que ofrece la matriz cementante. Los parámetros de programación en el potenciostato AMETC PARSTAT que se han considerado son: rango de corriente 20mA, frecuencia inicial 100000Hz, frecuencia final 0.1, amplitud 20 mVRMS, 30 y 10 puntos por década. Posteriormente, una vez realizada la programación e instrumentación de la prueba se procedió con la medición correspondiente (Véase figura 5).

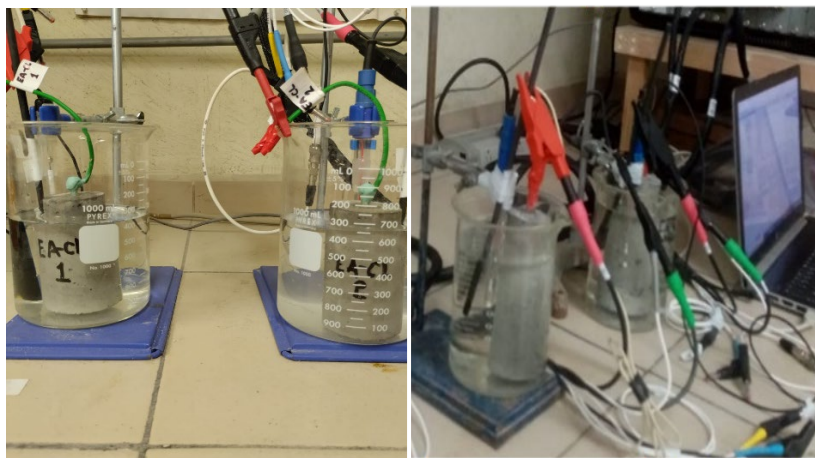


Figura 5. Detalle de la aplicación de pruebas electroquímicas a los especímenes.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resistencia a la compresión

Los valores de resistencia a la compresión alcanzados en las dos condiciones de concreto, a los 28 días de exposición en el cuarto de curado con humedad relativa del 95%, fueron de 20.5 MPa para los especímenes con concreto de referencia, en tanto que en los especímenes de concreto con incorporación de cloruros en la mezcla fue de 20 MPa. Cumpliendo con lo establecido en las NTCC 2017, para castillos de mampostería confinada se requiere como valor mínimo un  $f'c = 15$  MPa.

#### 3.2 Resistividad eléctrica del concreto

La resistividad eléctrica del concreto fue de 2.6  $k\Omega \cdot cm$ , a los 21 días en especímenes con la condición de cloruros aplicados en el diseño de mezcla. Siendo esta  $\rho < 5 k\Omega \cdot cm$ , quedando ubicado como un concreto con muy alta tasa de corrosión, acorde a la ACI 318, que lo clasifica como poroso y permeable. Con estas características desfavorables en la durabilidad del concreto, se espera que el acero de refuerzo presente una velocidad acelerada de la corrosión en su superficie, con una despasivación rápida, siendo muy corta la etapa inicial para luego ubicarse en la etapa de propagación de la corrosión.

#### 3.3 Contenido de cloruros

La concentración de cloruros totales en el concreto con acero embebido, en la condición de concreto con incorporación de cloruros en la mezcla a los 28 días fue de 2.0% por masa del cemento. Como previsto, el concreto contiene un exceso de cloruros en la matriz cementante, con un valor superior al valor permitido de 0.15 % acorde a la ACI 318, siendo favorable para una provocar un deterioro acelerado por corrosión de los estribos. Se garantiza que el proceso de deterioro del acero pasará rápidamente la transición de la etapa de iniciación a propagación.

#### 3.4 Permeabilidad rápida a los cloruros

De los resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad para especímenes de concreto reforzado, con la condición de cloruros incorporados en el diseño de mezclas medidos a los 28 días se obtuvo una carga eléctrica de 5,302 C, con lo cual el concreto quedó clasificado como un concreto de alta permeabilidad, debido al grado elevado de porosidad en la matriz cementante. Estas condiciones físicas del concreto son propicias para la existencia de un proceso acelerado del deterioro en el concreto reforzado provocado por el ingreso de iones cloruros.

#### 3.5 Velocidad de pulso ultrasónico, VPU

Los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días en los especímenes indicaron que la velocidad de recorrido de la señal eléctrica en la matriz cementante fue de 4662 m/s en un tiempo de 42.4 s, lo cual permitió confirmar que la matriz cementante es porosa, con alto grado de permeabilidad que permite el fácil ingreso de iones cloruros y por consiguiente la corrosión acelerada del acero de refuerzo embebido; así mismo, se verificó que la resistencia mecánica a la compresión del concreto ha cumplido con un valor de 20 MPa cumpliendo con el mínimo reglamentario acorde a las NTCC 2018 aplicada a castillos de mampostería.

#### 3.6 Potencial de corrosión, Ecorr

Como se muestra en la figura 6, a una edad de 28 días los especímenes cilíndricos de concreto con acero embebido en la condición de referencia sin incorporación de cloruros, REF-EA y REF-FL presentaron potenciales de corrosión, Ecorr vs. SCE, de -698 y 681 mV, respectivamente ubicándose en la frontera de -700 mV que corresponde a alta probabilidad de corrosión en el acero

(Andrade *et al*, 1990). En contraste, los especímenes de concreto con acero embebido con la condición de incorporación de cloruros en la mezcla, EA-CL y EFL-CL presentaron valores superiores a este umbral de -798 mV a -754 mV, respectivamente, con una tendencia superior a la alta probabilidad de corrosión.

El concreto con la condición de cloruros incorporados en la mezcla, presentó una tendencia de alta probabilidad de corrosión relativamente mayor, comparada con la condición de referencia. Esto es debido a la intervención química de los cloruros en la matriz cementante que han acelerado el proceso de deterioro del acero, lo cual corresponde a un estado activo de corrosión de acuerdo a la ASTM C876.

En etapa inicial del curado de 3 días, los valores de  $E_{corr}$  vs. SCE en el concreto de referencia fueron más positivos que -270 mV, comparado con la condición de concreto con incorporación de cloruros en la mezcla. Esto debido a que el sistema de la matriz cementante se encontraba en etapa de pasivación, por ello resultó baja la probabilidad de corrosión. En cambio, en la condición de concreto con cloruros incorporados a la mezcla, presentó valores activos más negativos que -270 mV con una tendencia de alta probabilidad de corrosión. Posteriormente, a los 28 días, el sistema de las cuatro series evolucionó rápidamente alcanzando valores  $>-270$  mV en condición activa, siendo evidente acelerada la etapa de iniciación de corrosión acercándose más a la etapa de propagación.

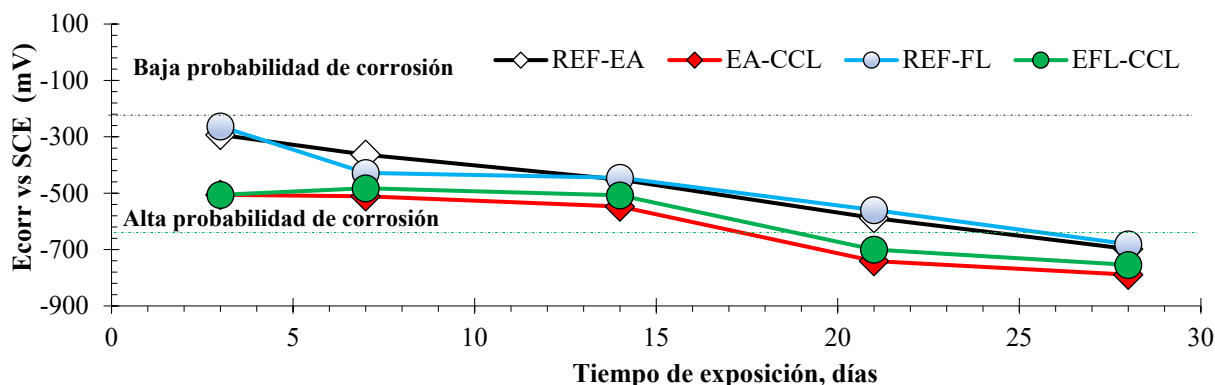


Figura 6. Seguimiento de  $E_{corr}$  vs SCE, en especímenes de concreto con estribos de acero embebido.

### 3.7 Densidad de corriente de corrosión, $i_{corr}$

En la figura 7, se observa la evolución de la tasa de corrosión,  $i_{corr}$  vs SCE, en los especímenes de concreto con las dos tipologías de estribos de acero embebido. A los 3 días de curado los estribos REF-EA y REF-FL se ubicaron en una despreciable tasa de deterioro con valores  $<0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; no obstante, debido a que la matriz cementante se encontraba en etapa de estabilización por el proceso inicial de curado. En esta etapa la actividad química y física del concreto promovió la pasivación del concreto y por consiguiente la pasividad del acero como medida de protección.

Posteriormente, de los 7 hasta los 28 días de curado, los especímenes de referencia REF-EA y REF-FL presentaron valores de  $0.50$  y  $0.38 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $<1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectivamente, quedando ubicados en la zona de moderada corrosión, siendo mayor la tendencia del deterioro en los estribos tradicionales.

Por otra parte, en los especímenes de concreto EA-CL y REF-CL, con la condición de incorporación de cloruros en la mezcla, los valores de  $i_{corr}$  fueron de  $4.69$  y  $3.36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectivamente, lo cual corresponde a una tendencia de alta corrosión. En esta condición de concreto también se logró determinar que la densidad de corriente es mayor en el estribo tradicional y por consiguiente el deterioro por corrosión es más evidente en el acero del refuerzo transversal tradicional usado en castillos prefabricados.

Cabe resaltar que el estribo flejeado en espiral REF-FL presentó menor valor de icorr, al inicio de la prueba LPR, comparado con el estribo tradicional REF-EA.

Caso contrario, en las cuatro series de especímenes con la condición de incorporación de cloruros, durante los 28 días de curado, los valores de la tasa de corrosión del acero han sido elevada, con valores  $> 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; es decir, se activó rápidamente la etapa de iniciación de la corrosión del acero al carbono acercándose más a la etapa de propagación.

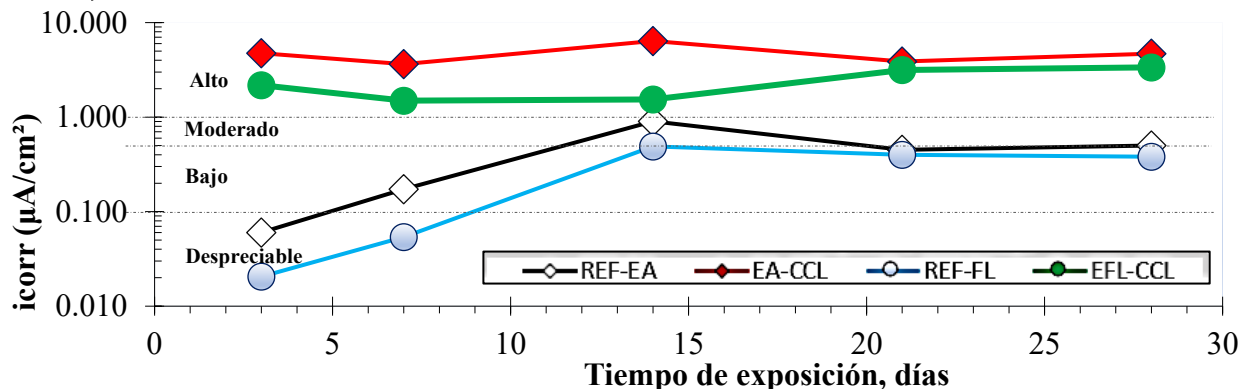


Figura 7. Medición de densidad de corriente de corrosión, icorr vs SCE, en especímenes de concreto con estribos de acero embebido.

#### 4. DISCUSIÓN

Por las condiciones de exposición de los especímenes de concreto con acero de refuerzo transversal embebido durante los 28 días de la etapa de curado, se han determinado parámetros de durabilidad del concreto y el comportamiento electroquímico del acero frente al deterioro por corrosión.

Los estribos flejeados y tradicionales con la condición de concreto de referencia sin cloruros en la mezcla REF-EA y REF-FL, así como los especímenes EA-CCL y EFL-CCLy con cloruros incorporados en la mezcla han presentado un comportamiento muy cercano en aspectos de durabilidad del concreto; no obstante, en el comportamiento electroquímico se han encontrado variantes en los valores del potencial de corrosión  $E_{\text{corr}}$ , y la densidad de corriente icorr.

Primeramente, en la evaluación de la durabilidad del concreto reforzado se ha determinado que el concreto es altamente poroso o altamente permeable debido a la relación a/c de 0.75 usada en el proporcionamiento mostrado en la Tabla 1, a pesar de tener una resistencia a la compresión de 20 MPa, cumpliendo con la resistencia a la compresión mínima de 15 MPa para elementos confinantes, acorde a NTCC 2017.

Adicionalmente, el concreto ha presentado una tendencia de alto nivel de corrosión, con una resistividad eléctrica baja de  $2.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  inferior a  $5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ , de acuerdo a la ASTM-C-1152 y RILEM TC-154-EMC. También se corrobora la condición desfavorable de durabilidad con el valor de la velocidad de pulso ultrasónico de 4662 m/s y una concentración de cloruros 1.9% (Zhou *et.al.*, 2017) y (Whong *et.al.*, 2022).

El uso de especímenes de acero embebidos en un concreto con baja resistividad eléctrica ponen en evidencia que la cinética de la corrosión no puede ser controlada debido al incremento de la probabilidad de deterioro por corrosión obtenido con la prueba LPR, con valores  $E_{\text{corr}} > -700 \text{ mV}$  (Figura 6) y valores de  $\text{icorr} \geq 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (Figura 7) que corresponden a un alto nivel de corrosión en el acero, con un deterioro correspondiente a la rápida transición de la etapa de despasivación a la de propagación (Andrade *et.al.*, 1999) y (Fajardo *et.al.*, 2013). Se distingue el proceso acelerado de corrosión del acero en la condición de concreto con incorporación de cloruros

en la mezcla.

El nivel de avance de la tasa de corrosión se podrá verificar, de mejor manera, cuando se realice la colocación de los especímenes de concreto con acero embebido en ciclos de inmersión en solución de NaCl y secado en horno  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , realizando en esa etapa la medición electroquímica, la caracterización química y el metalográfico del acero (Castro *et.al.*, 2020).

Lo que se espera de este comportamiento es que los especímenes embebidos en concreto con cloruros ya presenten desgaste inicial del área expuesta, debido al proceso acelerado de difusión de cloruros en el concreto; no obstante, los especímenes de acero embebido en concreto sin cloruros en la mezcla, seguirán presentando un proceso más lento del deterioro por corrosión.

## 5. CONCLUSIONES

Hasta este momento se tiene una evaluación de la corrosión de los estribos flejeados en espiral (EFE) y tradicionales, durante la etapa de curado de 28 días, se ha determinado lo siguiente:

- En la prueba de resistencia a la compresión del concreto, con las dos condiciones de diseño, se alcanzado el  $f'c = 20$  MPa, cumpliendo con las recomendaciones de la NTCC 2017 para elementos confinantes de la mampostería.
- En relación con las propiedades de durabilidad del concreto, el concreto con cloruros incorporados en el diseño de mezclas, es altamente poroso, permeable con una tendencia de alto nivel de corrosión, debido a la relación a/c 0.75, con una resistividad baja de  $2.5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ , con una velocidad de pulso ultrasónico de  $4662 \text{ m/s}$  y una concentración de cloruros 1.9% por masa de concreto superior a la permisible para el diseño de mezcla de 0.15% de acuerdo con la ACI 318.
- Hasta este momento, el estribo flejeado en espiral, EFE, en las dos condiciones de concreto y con la evaluación electroquímica de RPL y EIS, ha presentado una ligera mejoría en el comportamiento frente a la corrosión comparado con el estribo tradicional.
- Con los resultados obtenidos hasta ahora se infiere que el proceso de corrosión en las dos tipologías de acero será más acelerado al usar los ciclos de inmersión en NaCl y secado al horno a  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ . Seguirá siendo más notoria el avance del deterioro por corrosión en la condición del concreto que desde un inicio se le aplicaron cloruros en la mezcla, el tiempo estimado del desgaste mayor puede ser un periodo corto de 1-2 meses. Caso contrario, en la condición de concreto sin cloruros se incrementará la tasa de corrosión pero de manera moderada en un periodo de tiempo más prolongado, probablemente 4-6 meses.
- El proceso de aceleración de la corrosión de las dos tipologías de estribos está en función del concreto altamente permeable y de baja resistividad eléctrica que se está empleando, representando experimentalmente la exposición del concreto reforzado ante condiciones adversas de ambientes agresivos con cloruros.

## 6. ARADECIMIENTOS

La investigación descrita en este trabajo fue financiada por los Proyectos CB-2016/285453 y IT1765-21. A. Capistrano-García agradece a CONACYT por la beca N° 1015246 otorgada para su formación de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción de la FIC UANL. De igual manera agradece a la UAGro por las facilidades brindadas para realizar los estudios del doctorado. Así mismo, el agradecimiento a ALCONPAT para la difusión de este artículo científico

## 7. REFERENCIAS

- Abd-Elhamed, M., & Owida, M. (June de 2020). *Effect of stirrups densification on ultimate capacity of rectangular reinforced concrete columns*. Structures, 728-764. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.016>
- American Concrete Institute (1992), *ACI-308-92: Estándar Practice for Curing Concrete*.
- Andrade, C. et al. (1999). *An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability*. Symposium on corrosion rates of Steel in concrete, ASTM. Philadelphia P.A. pp 29-37
- Álvarez, J., Mesa, M., Chávez, J., Terán, B., Hermosillo, R. (2020). *Estudio en estribos flejeados en castillos cortos para mampostería confinada*. (X. C. Estructural, Ed.) *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/349718834\\_Estudio\\_de\\_estribos\\_flejeados\\_en\\_castillos\\_cortos\\_para\\_mamposteria\\_confinada](https://www.researchgate.net/publication/349718834_Estudio_de_estribos_flejeados_en_castillos_cortos_para_mamposteria_confinada)
- Álvarez, J., Mesa, L., Chávez, J., Fajardo, G. (2021). *Experimental investigation on tensile strength of hollow concrete blocks*. Materials and Structures, 54(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-0176-3>
- Arroyo, R., & Sánchez, S. (2010). *Modelo de un grado de libertad para evaluar la curva de carga lateral-distorsión en muros de mampostería confinada*. Ingeniería Sísmica (83 25-42 2010).
- Bertolini, L., Elsener, B., & Pedferri, P. (2004). *Corrosion in Steel in Concrete* (Vols. ISBN 3-527-30800-8). Wiley-V\_C-H.
- Castro-Borges, P., Juárez-Alvarado, C. A., Soto-Ibarra, R. I., Briceño-Mena, J. A., Miguel, G. F.-S., & Valdez-Tamez, P. (2020). *Effect of Corrosion in the Transverse Reinforcements in Concrete Beams: Sustainable Method to Generate and Measure Deterioration*. Sustainability, 12(19), 8105. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su12198105>
- Chang, C. C., Yeih, W., Chang, J. J., Huang, R. (2014). *Effects of stirrups on electrochemical chloride removal efficiency*. Construction and Building Materials, 692–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.091>
- Cruz, A., Pérez, J., Flores, L. (March de 2019). *Experimental study of in-plane shear strength concrete masonry walls with joint reinforcement*. Engineering Structures, 182, 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.040>
- De Corte, W., Boel, V. (2013). *Effectiveness of spirally shaped stirrups in reinforced concrete beams*. Engineering Structures, 52 (2013), 667-675. <https://dx.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.032>
- Fajardo, G., Valdez, P., Pacheco, J. (2009). *Corrosion of steel rebar embedded in natural puzolann based mortars exposed to chlorides*. Construction and Buildenig Materials, 23 (2), 768-774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023>
- Fang, Li, Lin, Wang, Fang, & Li. (s.f.). *FRP interlocking multi-spiral reinforced square concrete columns: A*. Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112733>
- Garcés, F., Climent, M., Zornoza, E. (2008). *Corrosión de armaduras*. Edit. ECU. Printed in Alicante Spain.
- Godinez, V., Sánchez, T. (2019). *Curva de Capacidad Carga- distorsión en dirección horizontal para muros de mampostería confinada*. (M. d. Intrnacional, Ed.) Academia Journals 2019.
- Hornbostel, K., Larsen, C., Geiker, M. (2013). *Relatioship between concrete reistvity and corrosion rate- A literature review*. Cement and Concrete Composites, 39, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Juárez, C., Guevara, G., Fajardo, G., & Castro, P. (2011). *Ultimate and nominal shear strenght in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion*. Engineering Structures, 31893196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.014>

- Leal, G., Pérez, J., Castorena, G., Velazquez, J. (2017). *Infill walls with confining elements and horizontal reinforcement: An experimental study*. Engineering Structures, 150, 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.042>
- Mebarki, H., Sánchez, S. (2006). *Método semiempírico para estimar la resistencia lateral en muros de mampostería confinada*
- Mc.Cafferty, E. (2020). *Introduction to corrosión Science*, Edit Springer. USA. ISBN 978-14419-0454-6
- Normas Técnicas Complementarias para diseño construcción de estructuras de mampostería con comentarios. (19 de octubre del 2020). *En Gaceta Oficial de la Ciudad de México* (Vol. No. 454). Ciudad de México.
- Pérez Gavilán, J. J. (2014). *Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería*, Edition: 1, Chapter: 7 Interacción suelo-estructura, Publisher: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, (pp.77-95) URL: [https://www.researchgate.net/publication/262836016\\_Guia\\_para\\_el\\_Analisis\\_de\\_Estructuras\\_d\\_e\\_Mamposteria](https://www.researchgate.net/publication/262836016_Guia_para_el_Analisis_de_Estructuras_d_e_Mamposteria)
- Rivera (2016). *Evaluación del estado de degradación de diversos tipos de varilla utilizadas como refuerzo en concretos carbonatados y contaminados con cloruros*. Nuevo León, México: UANL.
- Rojas, G. (2008 octubre). *Evaluación de estructuras de concreto por corrosión*. Tecnología en Marcha, 21(4), 69-78.
- Saha, & VaraPrasad. (s.f.). *Experimental investigation of reinforced SCC beam-column joint with*. Construction and Building Materials, 171–185, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.192>
- Shatarat, N., Kathuda, H., Abdel, M., Alqam, M. (2016). *Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforced in shear*. Construction and Building Materials, 125, 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.070>
- Shehab, R., Mahmoud, A., Masoor, Y. (2020). *The effect and corroded stirrups on shear behavior of reinforced concrete beams*. Materials Science and Engineering, 745 (1). <https://doi.org/10.1088/1757899X/745/012127>
- Tena, A., Miranda, E. (2001). *Comportamiento mecánico de la mampostería*. (6. edic, Ed.) México, Department of Civil Environment Engineering Stanford University: UAM.
- Tizapa, S., López, C. (2021). *Propiedades Mecánicas de la Mampostería Elaborada con Piezas Ligeras de Concreto en Chilpancingo, Gro (México)*. Academia Journals 2021, 13 (4), 314-318. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/351854280\\_Propiedades\\_Mecanicas\\_delaMamposteria\\_Elaborada\\_con\\_Piezas\\_Ligeras\\_de\\_Concreto\\_en\\_Chilpancingo\\_GroMéxico](https://www.researchgate.net/publication/351854280_Propiedades_Mecanicas_delaMamposteria_Elaborada_con_Piezas_Ligeras_de_Concreto_en_Chilpancingo_GroMéxico)
- Torres, E. (2004). *Apuntes acerca del tratamiento térmico y composición de los aceros*. web: <http://monografias.umcc.cu/monos/2004/quimec/um04qm02.pdf>.
- Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Liu, Y. (2015). *Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior*. Construction and Building Materials, 537–546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.077>
- Wong, H. S., Angst, U. M., Geiker, M. R., et al. (2022). *Methods for characterising the steel–concrete interface to enhance understanding of reinforcement corrosion: a critical review by RILEM TC 262-SCI*. Materials and Structures, 55, 124. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01961-5>
- Xia, J., Cheng, X., Liu, Q., Xie, H., Zhong, X., Jin, S., Mao, J. (2020). *Effect of stirrup on the transportation chloride removal in concrete structures*. Construction and Building Materials, 250 (2020)11 8898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118898>
- Xinzhong, W., Chuanxi, L., Heliang, X. (2017). *Experimental Study on the Axial Compression of Short Basalt Fiber Reinforced Concrete Columns with Spiral stirrups*. Journal of Engineering

- Science and Technology Review, 10(Issue 1). Obtenido de [www.jestr.org](http://www.jestr.org)
- Xue, J, Zhang, X., Ke, X., Mao, L. (2019). *Seismic resistance capacity of steel reinforced high-strength concrete columns with rectangular spiral stirrups*. Construction and Building Materials, 229(116880). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116880>
- Xue, J., Zhao, X., Ke, X., Zhang, F., Zhang, P. (December 2019 de 2020). *Experimental and numerical investigation of high-strength concrete encased steel columns with rectangular-spiral stirrups*. Journal of Building Engineering, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobe2020.101518>
- Youssef, M., Meshaly, M., Elansary, A. (2019). *Ductile corrosion-free-centering concrete elements*. Engineering Structures, 184 (2019), 52-56. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.086>
- Zhang, W., François, R., Wang, R., Cai, Y., Yu, L. (2021). *Corrosion behavior of stirrups in corroded concrete beams exposed to chloride environment under sustained loading*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121987>
- Zhao, P. Xu, G. Wang, Q., Zhao, J., Liu, X. (2018). *Influence of stirrup arrangements on the corrosion characteristics of reinforced concrete members*. Construction and Building Materials, 683–695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.144>
- Zhou, H. J., Liang, X. B., Zhang, X. L., Lu, J. L., Xing, F., Mei, L. (2017). *Variation and degradation of steel and concrete bond performance with corroded stirrups*. Construction and Building Materials, 138 (2017), 56-68. <http://ds.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.007>

# RECUPERACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES

DOI: <https://doi.org/10.21041/memoriasdecongresoXCNAM2022-RC>

**S3**

*Sección 3*



## **RECUPERACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES (RC)**

Caracterización de cal de construcción en pasta macerada por 900 días y su compatibilidad en el uso de trabajos de restauración y consolidación de edificios

*E. G. Navarro-Mendoza, H. Becerra-Santacruz, C. J. Esparza-López, J. A. Bedolla-Arroyo, E. M. Alonso-Guzmán, L.A. Ayala Ortega, W. Martínez-Molina (RC-728-MX)*

1

Conservación del patrimonio histórico e infraestructura actual mediante la aplicación de tratamientos superficiales base nanopartículas

*D. Cruz-Moreno, G. Fajardo, M. Neri-Álvarez (RC-735-MX)*

9

Recubrimientos fotocatalíticos a base de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) para la mineralización de contaminantes en morteros.

*J. A. Borrego Pérez, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, H. L. Chávez García, I. A. Tapia Mejía, S. C. Arguello Hernández (RC-788-MX)*

22

Eficiencia energética en una rehabilitación patrimonial en el Centro Histórico de Oaxaca. Caso de estudio Casa Habitación Independencia N°204.

*K. Y. Hernández Matus, H. Gómez Barranco (RC-739-MX)*

30

Estudio de la resistencia a sulfatos (formación de etringita) en concretos con fly-ash.

*A. González De la Cerda, C. K. Rojas Mayorga, L. G. Ramírez Martínez (RC-856-MX)*

41





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-728-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. RC – 1 – 7



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## Caracterización de cal de construcción en pasta macerada por 900 días y su compatibilidad en el uso de trabajos de restauración y consolidación de edificios

E. G. Navarro-Mendoza<sup>1\*</sup>, H. Becerra-Santacruz<sup>2</sup>, C. J. Esparza-López<sup>3</sup>, J. A. Bedolla-Arroyo<sup>2</sup>,  
E. M. Alonso-Guzmán<sup>4</sup>, L.A. Ayala Ortega<sup>1</sup>, W. Martínez-Molina<sup>4</sup>.

\*Autor de Contacto: [0319470d@umich.mx](mailto:0319470d@umich.mx)

<sup>1</sup> Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.

<sup>2</sup> División de Estudios de Posgrado, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.

<sup>3</sup> Arquitectura y medio ambiente, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Colima, Col, México

<sup>4</sup> Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México. C.P582605.

### RESUMEN

En México la conservación de edificios históricos que cuentan una historia a través de su arquitectura es muy importante, ya que representan parte de la identidad y cultura de las personas. Los trabajos de conservación y restauración deben hacerse conociendo al edificio desde su forma hasta sus materiales para tomar la mejor decisión en su intervención. La cal es compatible con los materiales con los que están contruidos, para ello hace unos años se apagaba la cal viva de manera artesanal. Para que pudiera ser utilizada era necesario convertirla en pasta, la cuál debía reposar seis meses en agua para que defloculara. Este trabajo muestra los resultados realizados en cal grado construcción que se mantuvo macerada por más de 900 días y comparar con la cal viva apagada artesanalmente. Las pruebas realizadas fueron área superficial, en especímenes de mortero y como pasta se cuantificaron la velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y resistencia a la compresión simple. Los resultados preliminares muestran que apagar la cal, independientemente de su origen, si incrementa el área superficial; aparentemente la cal grado construcción, al ser producida de forma controlada y con composición constante, mostró incipientes resultados muy prometedores que permitirían uniformizar los trabajos de conservación y restauración en patrimonio histórico colonial.

**Palabras clave:** cal de construcción; restauración; cal viva.

## 1. INTRODUCCIÓN

La restauración en México sigue siendo parte de la recuperación del acervo cultural que se tiene, los edificios son un patrimonio cultural e histórico ya que son símbolos de identidad y nacionalidad (Del Moral, 1980). Por eso es necesario conservarlos y la cal es un material que ayuda con sus características ya que es un material usado desde la antigüedad actualmente sigue estando vigente aunque de menor manera en la construcción y tiene aplicaciones que gracias al desarrollo tecnológico podemos mejorar su durabilidad o sus utilizadas conocidas. (Sánchez et.al., 2014)

La cal aporta con sus características como la “ausencia de retracción, buena plasticidad y trabajabilidad, gran elasticidad, permeabilidad apreciable al vapor de agua, buena resistencia a la penetración del agua de lluvia, buen aislamiento térmico y acústico, ausencia de eflorescencias, y producto desinfectante y fungicida natural”. (Aller, 2014), todas ellas pueden aportar a los trabajos de restauración y con ello mejorando o reconstruyendo edificios que son parte de la identidad de un lugar o sociedad.

Varios autores mocionan la importancia de la cal ya que se considera que los morteros de cal son los más adecuado la tradición constructiva (Ñúnez, 2014) y para los edificios que están contruidos con piedra (Espinosa, 2014) y al no usar cal puede ocasionar daños estéricos o técnicos por la incompatibilidad mercancías, químicas y físicas. (Robador, 2014)

Actualmente existen distintos materiales en la construcción moderna que son parte del desarrollo que se ha tenido y se ha considerado que los materiales utilizados durante milenios como la piedra, ladrillo, madera y la cal, ya no son necesarios con ello generando una ruptura en la arquitectura. (Del Moral, 1980).

Entre el ámbito de los restauradores, la cal de construcción en polvo no era considerada óptima para los trabajos, por lo que el uso de la cal apagada artesanalmente era la única opción por sus características, y las instituciones encargadas de la vigilancia del patrimonio no autorizaban el uso de cal en polvo pero no se daba una razón sustentada de cuál era la razón, por lo que de ahí surge esta investigación, que fue indagar las características que tenía la cal apagada artesanalmente y la cal de construcción en polvo, ambas maceradas por la misma cantidad de tiempo, la cual fue 900 días.

## 2. PROCEDIMIENTO

En el año 2016 se apagó de forma artesanal cal viva, lo cual consta de colocar oxido de calcio en una artesa con agua y mezclar hasta convertirla en pasta, de igual manera cal de construcción en polvo se mezcló con agua para convertirla en pasta, ambas se dejaron con un espejo de agua de mínimo 1 cm y durante el periodo de 900 días se mantuvo con esa cantidad de agua mezclando frecuentemente.

### 2.1 Caracterización de especímenes

Se realizaron especímenes en forma de cubos de 5x5x5 cm en base a la norma (NMX-C-061-ONNCCE-2010) (figura 1 y 2) de pasta y morteros con arena de la región de Morelia, la dosificación de los morteros fue 4 de cal 5 de arena.



Figura 1. Apisonamiento en pastas

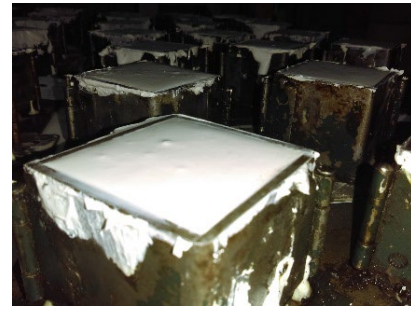


Figura 2. Cubos de pasta

Se debe considerar que la cantidad de agua que contenían las pastas eran diferentes entre cada una, y para conocerla se realizó la tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de agua en las pastas

Clave	Kilos de pasta de cal	Contenido de agua
<b>Cal Apagada Artesanalmente</b>	10.89 *	31%
<b>Cal de Construcción Apagada</b>	11.35	26%
*la pasta de cal ya había sido colada para eliminar los corazones		

## 2.2 Velocidad de pulso ultrasónico PVU

Esta prueba es no destructiva, es una detección de la propagación de ondas ultrasónicas en un medio elástico, esta prueba se realiza para conocer qué tan densa y homogénea es la pasta o el mortero en estado seco. Se mide en metros por segundo (m/s). El equipo que se utilizó para la prueba fue V-Meter MKIV de la marca JAMES INSTRUMENTS.

## 2.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de una pasta o mortero se corresponde con la microestructura de la matriz de la cal, la porosidad, la propia estructura, disposición y tamaño de los poros. Si el resultado es bajo mayor será la porosidad y existe mayor riesgo de deterioro.

## 2.4 Resistencia a la compresión ( $F_c$ )

La resistencia a compresión es la medida máxima de resistencia a una carga axial en especímenes endurecidos de matrices de cal, cemento, yeso, polímeros, que contengan áridos o sin ellos, se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

## 3. UNIDADES

Se utiliza el sistema métrico decimal para todos los resultados.

## 4. ABREVIACIONES

Para facilitar el proceso de experimentación de las cuales se les identificó con una clave para marcar y vaciar datos más ágilmente, en la tabla 2 se encuentra el clave, la descripción de la cal, su presentación y su procedencia de fabricación

Tabla 2. Claves de tipos de cales

Clave	Tipo de cal	Presentación	Procedencia
CAA	Cal Apagada Artesanalmente con un añejado de 2.5 años	Pasta	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México
CCA	Cal de construcción hidratada por 2.5 años	Pasta	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México

## 5. RESULTADOS

Las pruebas en estado seco se realizaron a los 100 días de su elaboración, ya que la cal tiene una carbonatación lenta. Los especímenes de cal tuvieron una contracción de casi un centímetro (figura 3 y 4), mientras que los morteros su contracción fue menor (figura 5 y 6).

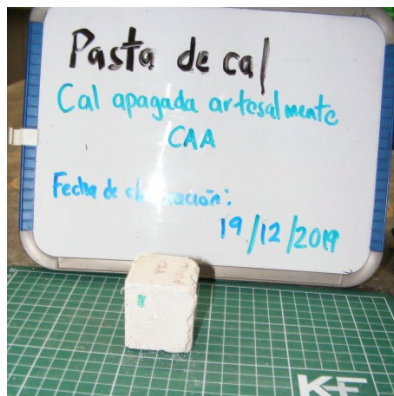


Figura 3. Pasta CAA

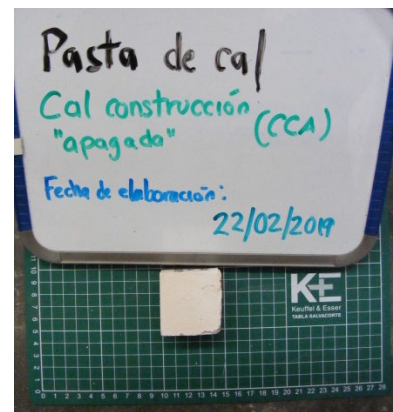


Figura 4. Pasta CCA

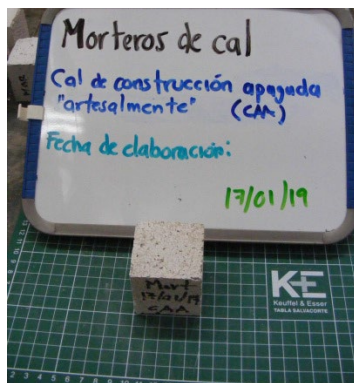


Figura 5. Mortero CAA

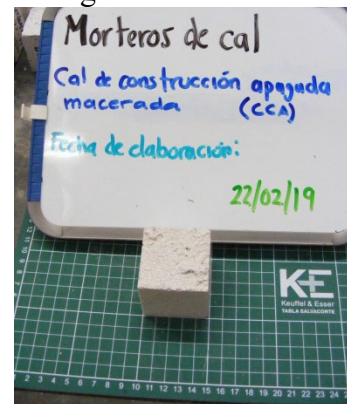


Figura 6. Mortero CCA

### 5.1 Velocidad de pulso Ultrasónico

Esta prueba es no destructiva y nos da idea de la homogeneidad de la pasta en estado endurecido, esto se refiere que se conoce si existen grietas o fisuras, vacíos y poros que pueden llegar afectar la resistencia y que puede ser un factor de deterioro rápido, que en la restauración y la construcción actual son importantes ya que se quiere cubrir la estructura del medio ambiente. Los resultados se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidad de pulso (metro sobre segundo)

Tipo de cal	pastas	Morteros
CAA	1573.7	1371.7
CCA	1570.0	1431.0

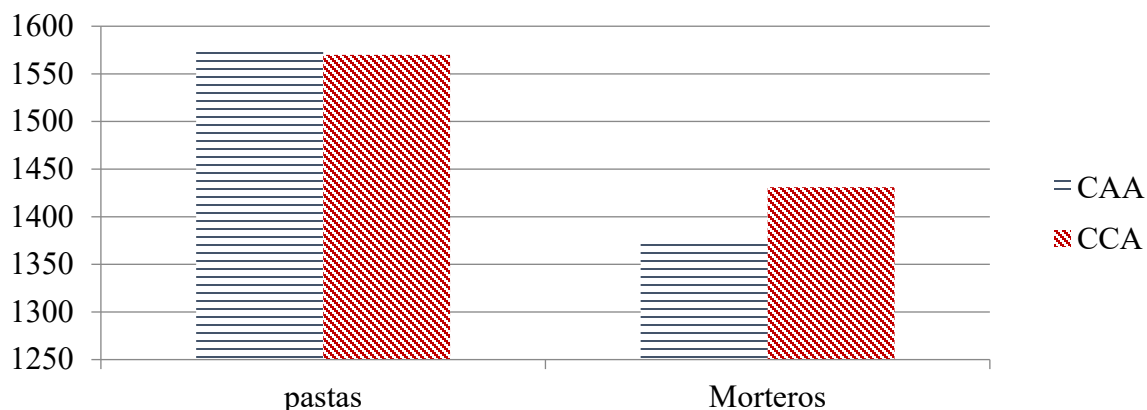


Gráfico. 1. Velocidad d pulso de pastas y morteros

## 5.2 Resistividad eléctrica

Está relacionada con la microestructura de la matriz de cal, con estos resultados podemos conocer la cantidad de poros en estado endurecido. Esta prueba es en base de la ley de Ohm que es la propiedad volumétrica del material e indica la resistencia al paso de las cargas eléctricas (Andrade-Andrea, 2011).

Tabla 4. Resistividad eléctrica (Ohm por centímetro)

Tipo de cal	pastas	morteros
CAA	105	215
CCA	116.6	416.6

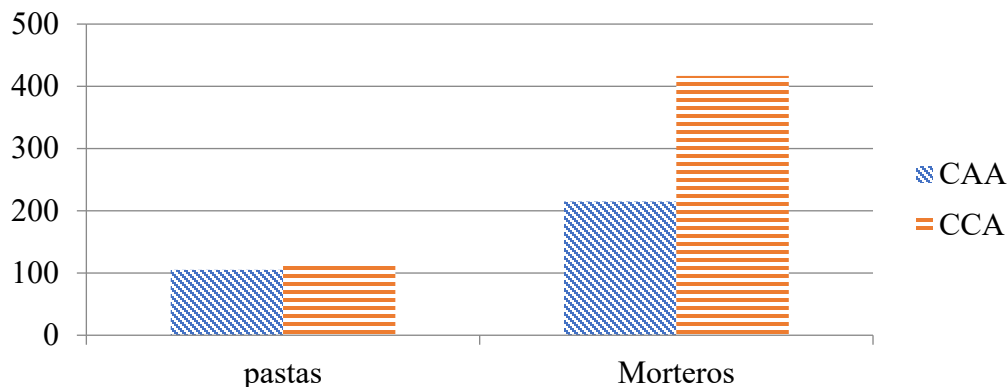


Gráfico. 2. Resistividad eléctrica

### 5.3 Resistencia a la compresión

La cal tiene su particularidad de tener resistencias muy bajas a edades muy tempranas ya que su proceso de endurecimiento es lento, las pruebas realizadas fueron a los 100 días y obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 5. Resistencia a la compresión kg/cm<sup>2</sup>

Tipo de cal	pastas	Morteros
CAA	19.39	11.42
CCA	16.05	9.34

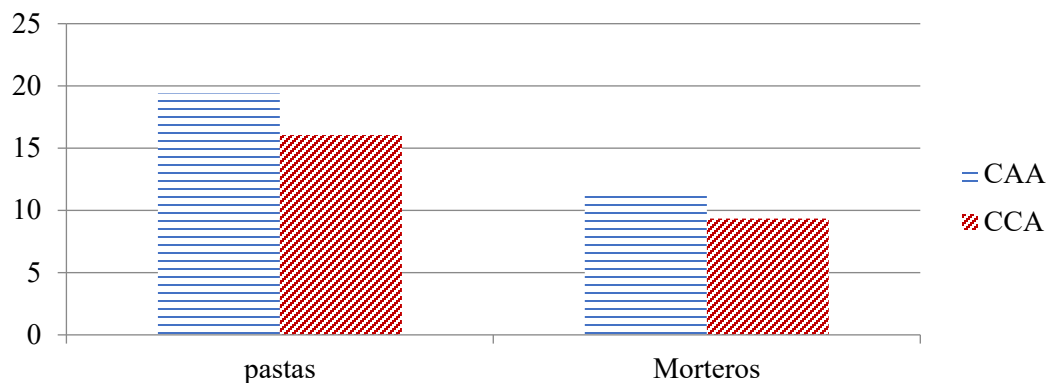


Gráfico. 3. Resistencia a la compresión

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados no pueden ser comparados directamente con los criterios de evaluación de las normas de la velocidad de pulso NMX-C-275-ONNCCE-2004 y resistividad eléctrica NMX-C-514-ONNCCE-2018 del concreto ya que son mucho más bajos.

Se considera que la relación de la densidad de los morteros y la resistencia a la compresión está relacionada (Pigueiras Aleaga, Cárdenas Sierralta, & Díaz Meriño, 2013), en las pastas en si se cumple esto, pero en los morteros no, esto puede ser debido al uso de la cal en pasta como cementante. Además que las pastas tienen mayor resistencia a la compresión pero esto se considera que las pastas tuvieron una contracción mayor que los morteros por lo que son más pequeños.

En la restauración el uso de la cal es de vital importancia ya que sus características son perfectas para los edificios antiguos, por lo que por mucho tiempo se consideró que la cal apagada artesanalmente tiene mejores propiedades que la cal en polvo, en esta investigación se pudo observar que la cal en polvo macerada puede tener características similares y considerando que son calces producidas en caleras con normas de calidad puede ser usada en la restauración.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes me apoyaron durante la investigación en todo momento

## 8. REFERENCIAS

- Alejandro Sánchez, F. J., Flores Alés, V., Blasco López, F. J., Martín del Río, J. J. (2014). *La cal. Investigación, Patrimonio y Restauración*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla.
- Andrade, C., Andrea, R. (2011). *La resistividad eléctrica como pa'rametro de control del hoirmigón y de su durabilidad*. ALCONPAT, 90-98.
- Del Moral, E. (1980). *Defensa y conservación de las ciudades y conjuntos urbanos monumentales*. México: Academia de Artes.
- Espinosa Gaitán, J. (2014). *Estudios de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH(Sevilla)*. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, La Cal. Investigación, Patrimonio y Restauración. (págs. 39-52). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universiad de Sevilla.
- Fernández Aller, R. (2014). *Estructura de la producción de cal en España*. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, La Cal. Investigación, Patrimonio y Restauración (págs. 13-24). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla.
- NMX-C-061-ONNCCE-2010. *Industria de la construcción cementos hidraulicos de determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidraulicos*.
- NMX-C-275-ONNCCE-2020. *Industria de la construcción-concreto hidráulico determianación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto-método de ensayo*.
- NMX-C-514-ONNCCE-2016. *Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo*.
- Ñúñez Guerrero, C. (2014). *Las técnicas de la cal, apuntes para su conservación y restauración*. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, La Cal. Investigación, Patrimonio y Restauración (págs. 201-216). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla.
- Pigueiras Aleaga, E., Cárdenas Sierralta, H., Díaz Meriño, E. (2013). *Evaluación de Morteros Estructurales* Elaborados con. Revista estudiantel nacional de ingeniería y arquitectura, 6-9.
- Robador González, M. D. (2014). *Ennoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de Nueva Planta*. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, J. J. Martín del Río, La Cal. Investigación, Patrimonio y Restauración (págs. 189-198). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla.





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-735-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. RC – 8 – 20



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## Conservación del patrimonio histórico e infraestructura actual mediante la aplicación de tratamientos superficiales base nanopartículas

D. Cruz-Moreno<sup>1\*</sup>, G. Fajardo<sup>2\*</sup>, M. Neri-Álvarez<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [gerardo.farjdosn@uanl.edu.mx](mailto:gerardo.farjdosn@uanl.edu.mx)

<sup>1</sup> Unidad de Ingeniería, Secodisa, Joseph Robertson 320, Chepevera, Monterrey, Nuevo León C.P. 64030, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León C.P. 66455, México.

### RESUMEN

La evaluación de los parámetros de aplicación de un tratamiento superficial (TS), como una alternativa factible para la conservación del patrimonio histórico y/o infraestructura a partir del uso de la nanotecnología; así como los métodos alternativos de aplicación fueron estudiados. Los especímenes seleccionados fueron de dos tipos: a) base cemento; fabricados con una relación agua/cemento de 0.65 y b) arcilla; preparados a partir de tejas comerciales. Posteriormente, dos diferentes variantes del TS se aplicaron con brocha (usando una dispersión de 0.1% de nanopartículas en agua). Los resultados han demostrado que según la naturaleza y condición del sustrato es la eficiencia del TS.

**Palabras clave:** nanopartículas; tratamiento superficial; durabilidad; conservación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio arquitectónico ya sea moderno o histórico, en todo el mundo, es una parte esencial de las raíces sociales y de identidad de cada país. Por ello, la preservación y protección ante el deterioro es un deber de cada país (Saba et al., 2019). El término patrimonio, comprende tanto al actual, como al histórico de cada país, ya que cada elemento se constituye en un recurso tangible muy importante para las naciones (Tan & Ti, 2020; Tweed & Sutherland, 2007). Por lo anterior, la conservación y la durabilidad de este es fundamental y de gran interés para los organismos encargados de su gestión y preservación (Sesana et al., 2020). En la actualidad, se conoce que los principales mecanismos de deterioro se inicia con la interacción del medio con la superficie (Cruz-moreno et al., 2020; S. Liu et al., 2020). Por lo anterior, el patrimonio arquitectónico se ve amenazado constantemente por la acción conjunta entre los contaminantes presentes en la atmosfera y el cambio climático global generando así un daño constante e irreversible en algunos casos sin importar el tipo de material de construcción empleado para su edificación. Provocando así el deterioro del patrimonio sin importar sea histórico o actual, generando altos costos de reparación y/o rehabilitación o en ocasiones hasta la pérdida del mismo. Por otra parte, existen diversas investigaciones enfocadas a la conservación en base al cuidado y protección del patrimonio histórico y/o infraestructura actual. Sin embargo, estas protecciones no son muy apropiadas en términos de durabilidad y eficiencia (Elert & Rodriguez-Navarro, 2022; Joseph & Junier, 2020; Ogawa et al., 2020). Todo patrimonio edificado enfrenta problemas del deterioro progresivo en sus materiales constituyentes (rocas, morteros, arcillas, entre otros) que son causados por factores ambientales como la concentración de sales, metales, vapor de agua, efectos cíclicos de temperatura elevada y humedad, entre otros (Nik et al., 2015; Saba et al., 2019; Wu et al., 2020). Por ello, en las últimas décadas, el desarrollo de métodos alternos para la conservación de materiales arcillosos y cementantes se ha convertido en uno de los temas de investigación más importantes en la mayoría de los países (S. Liu et al., 2020). Así mismo, la mayoría de estas tecnologías son complejas o están basadas en tratamientos biológicos, químicos y físicos que puedan proporcionar una solución sostenible para la conservación y restauración del patrimonio (Joseph & Junier, 2020). En consecuencia, su rendimiento se ve limitado, debido a las desventajas asociadas al sustrato sobre el cual se colocan, donde influyen factores tales como: la porosidad y la rugosidad superficial, pH, entre otros. Por lo tanto, las soluciones más utilizadas consisten en generar barreras físicas y químicas a partir de tratamientos específicos a base de ligantes o cristalizantes. La perspectiva actual en el desarrollo de estos tratamientos, además de mitigar estos problemas de deterioro, es convertirlos en materiales que asuman un rol innovador independientemente del tipo de sustrato, o bien si se trata de un material antiguo o moderno. En este sentido, los tratamientos deben cumplir con las exigencias mencionadas, tanto por los organismos encargados de la gestión y preservación; y a su vez, con las exigencias actuales del mercado, que demanda productos diferenciados a partir del desarrollo de propiedades multifuncionales. Se ha visto, que los tratamientos superficiales que incorporan nanomateriales contribuyen con la formación de propiedades que favorecen a la reducción de la degradación por medios físicos, químicos y biológicos, ya que aportan más de una propiedad, tal como autolimpieza (Cully et al., 2018; Ding et al., 2011), bactericidas (Drugă et al., 2018; Šuligoj et al., 2014), superhidrofóbicas (Efome et al., 2015; Varshney & Mohapatra, 2018), anti empañamiento (Tricoli et al., 2009; Varshney & Mohapatra, 2018), omnifóbicas (Kim et al., 2018; M. Liu et al., 2018), entre otras. Una exigencia de los organismos encargados de la conservación del patrimonio histórico o actual deriva en que, cualquier intervención sobre los materiales debe provocar el mínimo de cambio en la apariencia estética del sustrato. Por ello, se considera que un tratamiento con estas características podrá ser aceptado siempre y cuando el diferencial de color total ( $\Delta E^*$ ) del sustrato permanezca sin cambios significativos, de acuerdo con estos criterios:  $\Delta E^* > 5$ , o en su

caso  $\Delta E^* > 10$ ; EN 15886:2010 y ISO 12647-4 (García & Malaga, 2012).

Los tratamientos superficiales comerciales son obtenidos a partir de siloxanos, silanos, acrílicos y resinas, o la combinación de los mismos. Sin embargo, su estabilidad en los sustratos se ve afectada debido a la elevada alcalinidad de las matrices base cemento en conjunto con el intemperismo, lo que provoca el rompimiento de los grupos funcionales precursores de dichas propiedades hidrofóbicas. Por lo tanto, una opción para mejorar o restablecer dichas propiedades es la hibridación o funcionalización de los materiales existentes (Cruz-moreno et al., 2020; Lakshmi et al., 2012; Oliveira et al., 2021). Por ello, hasta el momento, los productos existentes se ven limitados por la interacción conjunta entre los efectos físicos, químicos y ambientales entre el sustrato y el tratamiento superficial, lo que conlleva a la búsqueda de una alternativa que permita su uso sostenible y adecuado para brindar una protección más efectiva (Elert & Rodríguez-Navarro, 2022; S. Liu et al., 2020). Así mismo, se deben tomar en cuenta tanto las propiedades físicas como las químicas en las nanopartículas funcionalizadas y el sustrato; y así lograr identificar su interacción conjunta y por ende la relación estabilidad-durabilidad. Lo anterior, con el fin de ofrecer un tratamiento completo capaz de resistir a las acciones provocadas por el intemperismo, favoreciendo el incremento del tiempo de vida útil o conservación del sustrato, sin necesidad de realizar una intervención temprana, generando una conciencia sobre un consumo sustentable y menos dañino para el medio ambiente. Es por ello, que en el presente trabajo se evaluaron los parámetros de aplicación de un tratamiento superficial (TS) en materiales arcillosos y cementantes, como una alternativa factible para la conservación del patrimonio histórico y/o infraestructura a partir del uso de la nanotecnología.

## 2. PROCEDIMIENTO

A continuación, se describe el procedimiento experimental desarrollado para llevar a cabo esta investigación.

### 2.1 Preparación y obtención de especímenes

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron dos tipos de especímenes: a) base cemento; a edades tempranas (24 h de fabricación) y superficies envejecidas en ambiente natural ( más de 10 años) y b) arcilla; preparados a partir de tejas comerciales.

#### 2.1.1 *Especímenes base cemento*

La obtención de los especímenes base cemento se realizó siguiendo los pasos establecidos en una publicación previa (Fajardo et al., 2015). Donde transcurridas 24 horas posterior al colado, los especímenes cilíndricos de mortero fueron desmoldados y sometidos a cortes transversales en los extremos (a 25 cm) con el objetivo de evitar los efectos de frontera producidos por el proceso de preparación. Posteriormente, las dos secciones resultantes (50 mm de diámetro por 50 mm de longitud) se consideraron los especímenes a evaluación, seguido, se procedió a delimitar la zona de estudio recubriendo la periferia del cilindro con impermeabilizante (marca IMPAC 5000) y sellador (sellador acrílico IMPAC) el resto de la superficie (Cruz Moreno et al., 2017).

#### 2.1.2 *Especímenes de teja de arcilla*

Los especímenes de teja se obtuvieron a partir de tejas comerciales modelo portuguesas Labasa de 40.5 x 25 cm fabricada con 100% barro natural (véase figura 1). Así mismo, debido al tamaño y forma de las tejas se optó por seccionar la parte plana de las tejas en especímenes de 40 x 40 mm a los cuales se delimitó un área de estudio de 27 x 27 mm recubriendo con impermeabilizante (marca IMPAC 5000) y sellador (sellador acrílico IMPAC).



Figura 1. Obtención de especímenes de arcilla, a partir de tejas comerciales.

Posterior a la preparación de los especímenes, se procedió a realizar una limpieza previa en la zona a evaluar siguiendo el procedimiento descrito en la ficha técnica correspondiente a productos comerciales superficiales similares.

## 2.2 Obtención de las nanopartículas

La obtención de nanopartículas de silicio “NS” y funcionadas “NF” se realizó a partir de la ruta de sol-gel a 70°C empleando el procedimiento descrito en un trabajo previo (Cruz-moreno et al., 2020; Fajardo et al., 2015).

## 2.3 Caracterización físico-química de las NS y NF

La caracterización físico-química de las nanopartículas base silicio se evaluó a partir de las siguientes técnicas:

- Microscopía electrónica de transmisión (MET) se realizó en un equipo de alta resolución modelo JEM-2200FS con una radiación de 300 KeV y una longitud de onda de  $0.0197 \text{ \AA}$  con el objetivo de identificar la morfología y los tamaños de las nanopartículas base. La muestra fue preparada en 2 mL de alcohol isopropílico y ultrasonido por 15 s para lograr una dispersión uniforme. Posteriormente se colocó una gota en una rejilla de cobre y se dejó secar a temperatura ambiente para su recubrimiento.
- Difracción de rayos X (DRX), esta técnica se utilizó para la caracterización de los polvos de nanopartículas base en un Difractómetro de Rayos X Empyrean de Panalytical con radiación  $\text{CuK}\alpha$  en el intervalo de  $2\theta = 10 - 60^\circ$ , con el propósito de identificar la fase y composición del material.

## 2.4 Aplicación de los tratamientos superficiales en los especímenes

En la tabla 1 se describen los diferentes tratamientos superficiales, así como la nomenclatura empleada para su identificación (ID). Cabe destacar que estos TS se llevaron a cabo a partir de las 24 horas posteriores al colado (en el caso de los especímenes de mortero), usando en todos los casos una concentración del 0.1% de nanopartículas de NS o NF con respecto al volumen del agua empleada para el TS.

Tabla 1. Características de los tratamientos superficiales aplicados.

ID	Descripción
R0	Curado convencional con agua potable.
SX	Producto modificador de superficie al 90%
T1	Tratamiento superficial con NF dispersa en agua destilada, aplicado con brocha en dos capas; 30 min entre cada capa.
T2	Tratamiento superficial con NF deshidratadas dispersa en agua destilada, aplicado con brocha en dos capas; 30 min entre cada capa.

La aplicación de los diferentes tratamientos superficiales R0, T1 o T2 en los especímenes fueron realizados como se indica en la Tabla 1. Así mismo, cabe destacar que la aplicación de los tratamientos se realizó de acuerdo con las fichas técnicas de productos similares existentes. Para comprobar y comparar los efectos logrados con los diferentes tratamientos, se optó por utilizar 2 recubrimientos hidrofóbicos comerciales denominado tratamiento “C1” y “C2”. Al igual que los tratamientos hidrofóbicos obtenidos en esta investigación, los tratamientos C1 y C2 fueron aplicados de acuerdo con lo establecido en la ficha técnica de cada uno.

## 2.5 Exposición en ambiente natural

La exposición natural se realizó en un ambiente urbano/industrial, para ello, una serie de especímenes fueron colocados en la azotea del Instituto de Ingeniería Civil (IIC-UANL) de la UANL, ubicado en San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Mientras que otra serie permaneció sin exposición en ambiente laboratorio para evaluar el efecto del medio Vs TS.

## 2.6 Evaluación de las superficies mediante técnicas de caracterización

La evaluación de las superficies se realizó a partir de las siguientes técnicas:

### 2.6.1 Determinación de la hidrofobicidad

La evaluación de la propiedad hidrofóbica generada en la superficie de las muestras se determinó en un goniómetro modelo DSA25 (Drop Shape Analyzer) KRÜSS, siguiendo la norma ASTM D7334. Para ello, las muestras se midieron a  $23 \pm 2$  °C y con una HR  $\geq 50\%$  empleando un volumen de gota de 6  $\mu$ L. Así mismo, con ayuda del programa de cómputo ADVANCE versión 1.9.2.3 se determinó el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie de los especímenes.

### 2.6.2 Apariencia óptica según estándares colorimétricos

La evaluación de la apariencia óptica se realizó mediante la técnica del diferencial de color total ( $\Delta E^*$ ). Para ello, se empleó el equipo Datalcolor CHECK (previa calibración) siguiendo el procedimiento descrito en ASTM D2244, e interpretación de resultados según lo especificado en los estándares EN 15886:2010 e ISO 12647-4.

### 2.6.3 Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La identificación de los grupos funcionales responsables de generar la propiedad hidrofóbica en la superficie de las tejas expuestas en ambiente urbano/industrial, se determinó en un equipo Thermo Electron Nicolet 380, con un rango de frecuencia de 500 – 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Para esto se procedió a desbastar mecánicamente la parte tratada de la teja y los polvos recolectados fueron secados a 60°C por 24 horas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización físico-química de la NF

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la obtención de las nanopartículas base silicio obtenidas por la ruta suave del método de síntesis sol-gel. En la figura 2 se presenta los resultados obtenidos representativos de las nanopartículas base silicio preparadas por el proceso sol-gel.

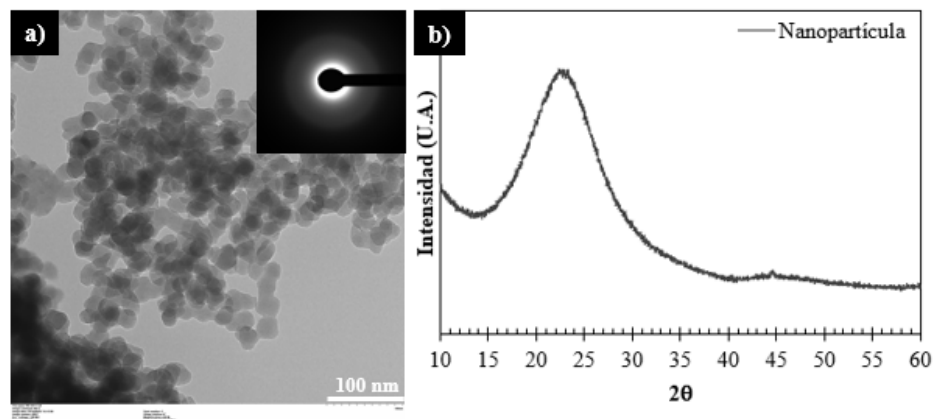


Figura 2. a) Micrografía de MET a 100 nm y b) Difractograma de rayos X obtenido de las nanopartículas base silicio.

En general, a través de la técnica de MET podemos comprobar la obtención de partículas a escala nanométrica, inferiores en su mayoría a 100 nm, con trazas de material mayor a 100 nm, mismas que podrían ser aglomeraciones de partículas menores. Por otra parte, podemos decir que nuestro material presenta una morfología irregular y características amorfas (véase figura 2a), las cuales mantienen un patrón de tamaños regulares que van de los 10 -50 nm donde predominan los tamaños entre 20- 30 nm. Por otra parte, en la figura 2b, se observa un patrón de difracción que presenta una reflexión concentrada en  $2\theta$ :  $22.6^\circ$  característica de un material base silicio. Así mismo, se puede comprobar en la base del difractograma que el material obtenido presenta características que confirman la naturaleza amorfa. Por lo tanto el resultado obtenido comprueba que el material empleado para esta investigación coincide con los reportados de los geles frescos de NS publicado por otros autores (De Ferri et al., 2011; Quercia et al., 2013; Wang et al., 2021), lo anterior debido a que de esta nanopartícula sería nuestra base del producto.

#### 3.2 Evaluación de las superficies mediante técnicas de caracterización

En la figura 3, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones del ángulo de contacto en las muestras expuestas en un ambiente urbano/industrial. Para ello, se determinaron los ángulos de contacto iniciales en las muestras y considerados como valores iniciales (0M). Posteriormente, se recolectaron simultáneamente muestras durante el periodo de exposición (ambiente natural: 6 meses y 24 meses). Así mismo, la línea punteada representa el límite entre un ángulo de contacto hidrofílico ( $< 90^\circ$ ), hidrofóbico ( $> 90^\circ$ ) y superhidrofóbico ( $> 150^\circ$ ).

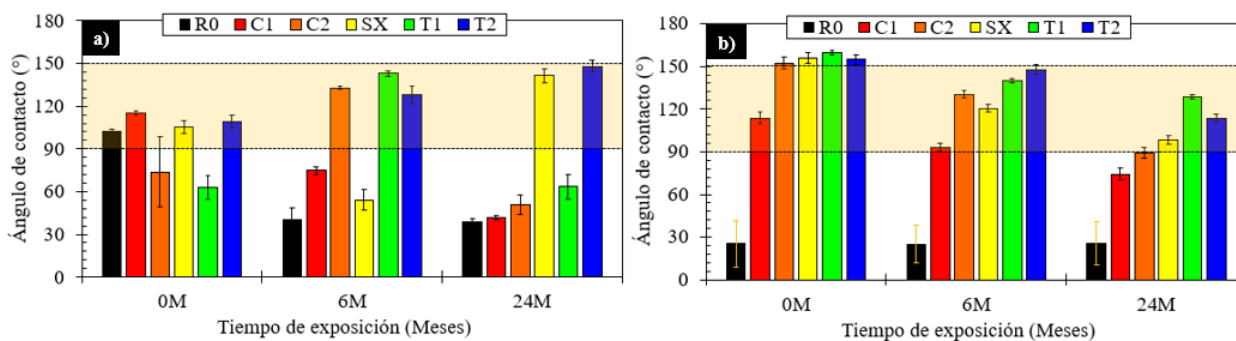


Figura 3. Determinación del ángulo de contacto en muestras con TS expuestas en un ambiente urbano/industrial: a) Tejas de arcilla y b) morteros

Los resultados iniciales (véase grupo 0M en figura 3a y 3b) demuestran la obtención de una superficie hidrofóbica con variaciones de  $\pm 4^\circ$  para R0, C1, SX y T2 para sustratos de arcilla, y C1, C2, SX, T1 y T2 para sustratos de mortero. Lo anterior, demuestra que la interacción con el sustrato es importante para brindar el efecto deseado. Así mismo, el ángulo de contacto generado por los tratamientos C2 y T1 muestra oscilaciones de  $\pm 8$  para T1 y  $\pm 24^\circ$  para C2 en las primeras 48 horas en las muestras de tejas de arcilla. Esto puede atribuirse a la interacción inicial del activo con la superficie, misma que se estabiliza posteriormente. Por otra parte, se observó que los tratamientos C2, T1 y T2 mostraron un ángulo mayor con el incremento en el tiempo de exposición. De lo contrario, en los sustratos de mortero, estos presentan un comportamiento superhidrofóbico a excepción de la muestra C1 que a medida que pasa el tiempo este pierde su propiedad.

En lo que respecta al efecto del ambiente de exposición, se observa que el ángulo de contacto de los tratamientos superficiales mostró una reducción mayor en las muestras de tejas de arcilla expuestas en un medio urbano/industrial con respecto a las del sustrato de mortero. Sin embargo, en ambas se presentan reducciones en los ángulos de contacto. Lo anterior, es atribuido al efecto conjunto de la deposición de los agentes presentes en la atmósfera, que interfieren con la hidrofobicidad de la superficie. Asimismo, la fotooxidación, inducida por la radiación ultravioleta y la degradación de los enlaces O-CH<sub>3</sub>, provoca la pérdida de adhesión, craqueo, el amarilleo y una reducción del brillo de la superficie. Por lo tanto, la degradación de esta propiedad expone de forma directa al sustrato a los diversos tipos de deterioro promovidos por el agua y los agentes exógenos. Comúnmente, los tratamientos superficiales que presentan ángulos de contacto superiores a  $90^\circ$  han demostrado proteger a los materiales del ingreso de agentes dañinos (como: las sales disueltas, compuestos orgánicos volátiles, algas, etc.) mediante la reducción del ingreso de humedad (Beirami et al., 2020; Cruz-moreno et al., 2020; Kua et al., 2019; Pan et al., 2017). Así mismo, el tipo y cantidad del activo pueden resultar limitantes en estos tratamientos, ya que su efectividad y estabilidad depende del tipo de cadena.

Por lo anterior, la pérdida de la hidrofobicidad y el cambio de color de la superficie del sustrato son considerados como dos de los criterios más importantes de aceptación y/o rechazo de los tratamientos superficiales. Es por ello, que estos dos parámetros fueron relacionados en la figura 4, donde se representó el comportamiento de los diversos tratamientos, antes y posterior al tiempo máximo de exposición. Las barras representadas en la figura corresponden a los datos del ángulo de contacto obtenido y los marcadores de círculos indican el diferencial o cambio de color.

En las muestras sin exposición (véase figura 4a), los valores de  $\Delta E^*$  se observaron inferiores a 3, siendo el máximo el C2 con un  $\Delta E^*$  que oscila entre 2.5-3, pero por debajo de lo establecido como cambio de color no perceptible al ojo humano ( $\Delta E^* < 3.5$ ). Dichos cambios, se pueden asociar de forma directa a la película polimérica formada por los activos de cada tratamiento, que modifican la luminosidad ( $L^*$ ) del sustrato, lo que genera un cambio de color que se considera imperceptible al ojo humano. Por otra parte, en la Figura 4b, se aprecia el efecto contrastante que origina la

exposición atmosférica de las muestras en la coloración ( $\Delta E^*$ ) y en el ángulo de contacto. Por un lado, independientemente del tipo de tratamiento, la exposición natural originó un cambio de color superior a 3.5, y disminuciones en el ángulo de contacto en los tratamientos, lo que puede atribuirse a la precipitaciones de las partículas suspendidas en el medio (Oliveira et al., 2020; Yu et al., 2020). Cabe destacar que el tratamiento SX continua con la propiedad hidrofóbica, sin embargo, este no es un tratamiento apto de acuerdo con los estándares de aceptación. Por otra parte, en la figura 5 se muestran de forma visual los cambios en la colorimetría obtenida en ambos sustratos, donde se observó un cambio notorio en los TS con SX.



Figura 5. Colorimetrías obtenidas a 24 meses de exposición en ambiente industrial/urbano: a) morteros y b) tejas de arcilla.

Por lo anterior, podemos confirmar que el cambio de color generado en las muestras expuestas se atribuye principalmente, a las precipitaciones directas de contaminantes tales como: el polvo, microorganismos, hollín, y otros agentes contaminantes. Esto confirma que la interacción conjunta entre partículas (presentes en la atmósfera y depositadas) y el intemperismo, son las dos causas principales que originan el envejecimiento y posterior degradación de los tratamientos superficiales hidrofóbicos base poliméricos, por lo que la mayoría de estos no son aptos para utilizarse en el exterior (Orlowsky et al., 2020). Con el objetivo de aportar información que nos permita distinguir si, se trata de una degradación, o bien solamente de un envejecimiento, se procedió a evaluar la hidrofobicidad del sustrato que mejor comportamiento presentó fue el T2 mediante FTIR, donde podemos observar que efectivamente a pesar de que estos dos tratamientos continúan presentando la propiedad hidrofóbica, estos muestran degradaciones en sus grupos funcionales principales (véase figura 6).

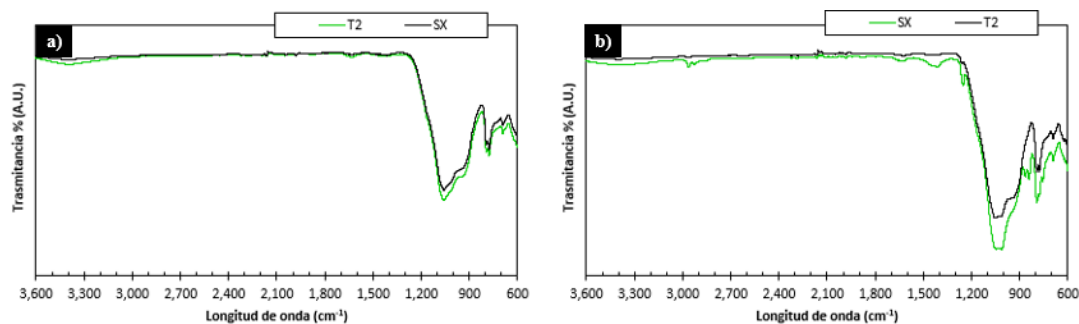


Figura 6. Espectros de infrarrojo de muestras de teja tratadas con SX y T2: a) Sin exposición y b) 24 meses de exposición en ambiente industrial/urbano

En general, los grupos funcionales principales de las tejas se encuentran presentes en rango 600 – 1500  $\text{cm}^{-1}$ . Dicho rango representa la composición nativa o huella digital propia del material base.



En efecto, se hacen presentes los materiales policristalinos y cristalinos, donde la mayor parte corresponden a los grupos derivados de Si-O y Al-O. Los picos anchos, localizados en las señales emitidas entre 1100 y 810  $\text{cm}^{-1}$  son atribuidos a la absorción de vibraciones a tensión simétricas de enlaces Si-O-Si, y las que se encuentran a 780  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyen a la absorción de vibraciones de flexión de enlaces Si-O. Este comportamiento podría evidenciar la composición propia de la teja de arcilla o bien derivado del posible tratamiento superficial inicial (Lavati et al., 2009). Así mismo, se puede localizar el pico de absorción característico del enlace Al-O alrededor de 625 y 850  $\text{cm}^{-1}$  (Lavati et al., 2009; Piskin et al., 2013). Este análisis infiere que las señales secundarias o derivadas de los tratamientos superficiales podrían resultar reducidas. Por otra parte, debido a la deshidratación de las NF, las vibraciones a tensión de los picos característicos de los grupos funcionales  $-\text{CH}_3$  son observados en vibraciones a 1210 – 1255  $\text{cm}^{-1}$ , 2950-2970  $\text{cm}^{-1}$ ; y para los grupos funcionales C-H se presentan en 810  $\text{cm}^{-1}$ . Cabe mencionar que estos grupos funcionales son los principales responsables de la hidrofobicidad que genera la aplicación del TS. Posterior a la exposición, en los tratamientos SX y T2, se aprecia un ligero incremento en el pico situado en el rango 1250-1260  $\text{cm}^{-1}$  (la señal emitida en la vibración de 1255  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a la posición más estable del  $-\text{CH}_3$ ). La estabilidad de estos radicales sustenta la permanencia de la hidrofobicidad evidenciada por el ángulo de contacto obtenido en estos tratamientos (véase Fig. 5b).

Finalmente, considerando que la mayoría de la infraestructura y/o patrimonio histórico presenta los principales problemas a causa de la humedad y el crecimiento de microorganismos, se procedió a aplicar este tratamiento en un sustrato cementante que está sometido a constante humedad además de estar expuesto en el ambiente urbano/industrial (véase figura 7). Cabe destacar que posterior a los 10 meses de aplicación se extrajeron 2 núcleos (R0 y T2) donde se observó que la muestra de R0 presentó 4 veces más biomasa que en el NF. Esto sirve como indicador de cuánto material orgánico estaba adherido a la superficie de la muestra T2 con referencia a la R0. Donde podemos apreciar que el efecto hidrofóbico fungió como inhibidor del crecimiento de microorganismos, evitando que el agua, producto de lluvias o riego, se adhiriera y se presentaran las condiciones necesarias para el crecimiento de estos. No obstante, 5 años después, el área donde se aplicó el tratamiento T2 aún presenta una reducción en el crecimiento de microorganismos. Cabe mencionar que, para esta aplicación, el sustrato ya presentaba un envejecimiento de 10 años aproximadamente, por lo que la penetración del T2 puede presentar un comportamiento diferente a un sustrato recién construido. No obstante, el comportamiento nos reafirma que este TS puede ser aplicado a estos dos tipos de sustratos. Sin embargo, aún faltan evaluaciones por hacer sobre otros sustratos y las propiedades físico-mecánicas de este.



Figura 7. Fotografías de la evolución del T2 a una exposición en ambiente industrial/urbano.

De acuerdo con el conjunto de resultados obtenidos, podemos decir que el tratamiento T2 es el tratamiento superficial que presentó un mejor comportamiento ante los dos medios tipos de sustratos, a diferencia del resto de los TS (C1, C2, SX y T1), en donde se presentaron reducciones de la funcionalidad y permanencia de la hidrofobicidad durante los primeros 24 meses de exposición. Por lo que, considerando el desempeño de estos, no serían recomendables para el uso en infraestructura actual o de interés histórico debido a su baja durabilidad a diferencia. Mientras que el TS T2, presentó un buen comportamiento en ambos sustratos, logrando esta muestra con comportamiento estable lo que lo convierte un TS con mayor tiempo de vida útil bajo estas condiciones.

#### 4. CONCLUSIONES

La aplicación de diversos tratamientos superficiales en sustratos a base de arcilla cocida y cementantes, empleado bajo las condiciones experimentales descritas en este trabajo, permite concluir lo siguiente:

- La efectividad de los tratamientos superficiales depende de la afinidad y la interacción que se desarrolla entre el sustrato y el principio activo (siloxano, silanos, entre otros). Por ello, es importante conocer su naturaleza previa a la aplicación en el patrimonio actual y/o histórico, ya que la eficiencia estará basada obtener y mantener un ángulo de contacto  $>90^\circ$  y valores de  $\Delta E^* < 5$ , requeridos para este tipo de sustratos.
- El tratamiento T2 demostró la capacidad de retardar el crecimiento de microorganismos, como moho y líquenes, en el concreto al repeler la humedad de la superficie. Lo que evita que se generen las condiciones necesarias para ser inoculada y colonizada.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

La investigación descrita en este trabajo fue financiada por los Proyectos N° CB-2016/285453 y IT1765-21. Mónica Neri-Álvarez agradece a CONACYT por la beca N° 872560 otorgada para su formación de maestría.

#### 6. REFERENCIAS

- Beirami, K., Baghshahi, S., Ardestani, M., & Riahi, N. (2020). Synthesis and characterization of hydrophobic nano-silica thin coatings for outdoor insulators. *Processing and Application of Ceramics*, 14(1), 40–46. <https://doi.org/10.2298/PAC2001040B>
- Cruz-moreno, D., Fajardo, G., Flores-vivian, I., Orozco-cruz, R., & Ramos-rivera, C. (2020). Applied Surface Science Multifunctional surfaces of portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles. *Applied Surface Science*, 531(May), 147355. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147355>
- Cruz Moreno, D., Fajardo, G., Flores Vivián, I., Cruz López, A., & Valdez Tamez, P. L. (2017). Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 274–285. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>
- Cully, P., Karasu, F., Müller, L., Jauzein, T., & Leterrier, Y. (2018). Self-cleaning and wear-resistant polymer nanocomposite surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 348(May), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.040>
- De Ferri, L., Lottici, P. P., Lorenzi, A., Montenero, A., & Salvioli-Mariani, E. (2011). Study of silica nanoparticles - polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4), 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.02.006>

- Ding, X., Zhou, S., Gu, G., & Wu, L. (2011). A facile and large-area fabrication method of superhydrophobic self-cleaning fluorinated polysiloxane/TiO<sub>2</sub> nanocomposite coatings with long-term durability. *Journal of Materials Chemistry*, 21(17), 6161. <https://doi.org/10.1039/c0jm04546b>
- Drugă, B., Ukrainczyk, N., Weise, K., Koenders, E., & Lackner, S. (2018). Interaction between wastewater microorganisms and geopolymer or cementitious materials: Biofilm characterization and deterioration characteristics of mortars. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 134(May), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.08.005>
- Efome, J. E., Baghbanzadeh, M., Rana, D., Matsuura, T., & Lan, C. Q. (2015). Effects of superhydrophobic SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the performance of PVDF flat sheet membranes for vacuum membrane distillation. *Desalination*, 373, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.002>
- Elert, K., & Rodriguez-Navarro, C. (2022). Degradation and conservation of clay-containing stone: A review. *Construction and Building Materials*, 330(January), 127226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127226>
- Fajardo, G., Cruz-López, A., Cruz-Moreno, D., Valdez, P., Torres, G., & Zanella, R. (2015). Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 76, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.054>
- García, O., & Malaga, K. (2012). Definition of the procedure to determine the suitability and durability of an anti-graffiti product for application on cultural heritage porous materials. *Journal of Cultural Heritage*, 13(1), 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.004>
- Joseph, E., & Junier, P. (2020). Metabolic processes applied to endangered metal and wood heritage objects: Call a microbial plumber! *New Biotechnology*, 56(November 2019), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.11.003>
- Kim, D. S., Suh, A., Yang, S., & Yoon, D. K. (2018). Grooving of nanoparticles using sublimable liquid crystal for transparent omniphobic surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 513, 585–591. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.11.033>
- Kua, H. W., Gupta, S., Aday, A. N., & Srubar, W. V. (2019). Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles. *Cement and Concrete Composites*, 100, 35–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.017>
- Lakshmi, R. V., Bharathidasan, T., Bera, P., & Basu, B. J. (2012). Fabrication of superhydrophobic and oleophobic sol-gel nanocomposite coating. *Surface and Coatings Technology*, 206(19–20), 3888–3894. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.044>
- Lavat, A. E., Trezza, M. A., & Poggi, M. (2009). Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, 29(5), 1666–1674. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.019>
- Liu, M., Hou, Y., Li, J., Tie, L., & Guo, Z. (2018). Transparent slippery liquid-infused nanoparticulate coatings. *Chemical Engineering Journal*, 337(December 2017), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.118>
- Liu, S., Wang, R., Yu, J., Peng, X., Cai, Y., & Tu, B. (2020). Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles. *Construction and Building Materials*, 243, 118202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118202>
- Nik, V. M., Mundt-Petersen, S. O., Kalagasidis, A. S., & De Wilde, P. (2015). Future moisture loads for building facades in Sweden: Climate change and wind-driven rain. *Building and Environment*, 93(P2), 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.012>
- Ogawa, Y., Trinh, P., Kawai, K., & Sato, R. (2020). Effects of porous ceramic roof tile waste aggregate on strength development and carbonation resistance of steam-cured fly ash concrete.

- Construction and Building Materials*, 236, 117462.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117462>
- Oliveira, M. L. S., Flores, E. M. M., Dotto, G. L., Neckel, A., & Silva, L. F. O. (2021). Nanomineralogy of mortars and ceramics from the Forum of Caesar and Nerva ( Rome , Italy ): The protagonist of black crusts produced on historic buildings. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123982. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123982>
- Oliveira, M. L. S., Tutikian, B. F., Milanés, C., & Silva, L. F. O. (2020). Atmospheric contaminations and bad conservation effects in Roman mosaics and mortars of Italica. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119250>
- Orlowsky, J., Braun, F., & Groh, M. (2020). The influence of 30 years outdoor weathering on the durability of hydrophobic agents applied on obernkirchener sandstones. *Buildings*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/buildings10010018>
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. C., & Li, N. (2017). A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance. *Construction and Building Materials*, 133, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>
- Piskin, S., Figen, A. K., Ozkan, E., & Ozcay, U. (2013). Structural characterization of seydisehir red mud to utilization in roof tile manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(PART 1), 484–487. <https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00010>
- Quercia, G., Lazaro, A., Geus, J. W., & Brouwers, H. J. H. (2013). Characterization of morphology and texture of several amorphous nano-silica particles used in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 44, 77–92. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.05.006>
- Saba, M., Quiñones-Bolaños, E. E., & Martínez Batista, H. F. (2019). Impact of environmental factors on the deterioration of the Wall of Cartagena de Indias. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.03.001>
- Sesana, E., Gagnon, A. S., Bonazza, A., & Hughes, J. J. (2020). An integrated approach for assessing the vulnerability of World Heritage Sites to climate change impacts. *Journal of Cultural Heritage*, 41, 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.06.013>
- Šuligoj, A., Štangar, U. L., & Tušar, N. N. (2014). Photocatalytic air-cleaning using TiO<sub>2</sub> nanoparticles in porous silica substrate. *Chemical Papers*, 68(9), 1265–1272. <https://doi.org/10.2478/s11696-014-0553-7>
- Tan, S. Bin, & Ti, E. S. W. (2020). What is the value of built heritage conservation? Assessing spillover effects of conserving historic sites in Singapore. *Land Use Policy*, 91(November 2019), 104393. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104393>
- Tricoli, A., Righettoni, M., & Pratsinis, S. E. (2009). Anti-fogging nanofibrous sio<sub>2</sub> and nanostructured sio<sub>2</sub>-tio<sub>2</sub> films made by rapid flame deposition and in situ annealing. *Langmuir*, 25(21), 12578–12584. <https://doi.org/10.1021/la901759p>
- Tweed, C., & Sutherland, M. (2007). Built cultural heritage and sustainable urban development. *Landscape and Urban Planning*, 83(1), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.008>
- Varshney, P., & Mohapatra, S. S. (2018). Durable and regenerable superhydrophobic coatings for brass surfaces with excellent self-cleaning and anti-fogging properties prepared by immersion technique. *Tribology International*, 123(February), 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.036>
- Wang, H., Yang, D., Xiong, W., Liu, W., & Qiu, X. (2021). One-pot preparation of hydrophobic lignin/SiO<sub>2</sub> nanoparticles and its reinforcing effect on HDPE. *International Journal of Biological Macromolecules*, 180, 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.091>
- Wu, J., Wu, G., Zheng, T., Zhang, X., & Zhou, K. (2020). Value capture mechanisms, transaction costs, and heritage conservation: A case study of Sanjiangyuan National Park, China. *Land Use Policy*, 90(September 2019), 104246. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104246>
- Yu, F., Gao, J., Liu, C., Chen, Y., Zhong, G., Hodges, C., Chen, M., & Zhang, H. (2020).

Preparation and UV aging of nano-SiO<sub>2</sub>/fluorinated polyacrylate polyurethane hydrophobic composite coating. *Progress in Organic Coatings*, 141, 105556.  
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105556>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-788-MX  
Conferencia Temática Invitada  
pp. RC – 21 – 28



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## Recubrimiento fotocatalítico a base de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) para la mineralización de contaminantes en morteros

J. A. Borrego Pérez <sup>1\*</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>1</sup>, W. Martínez Molina<sup>1</sup>, H. L. Chávez García<sup>1</sup>, I. A. Tapia Mejía<sup>2</sup>, S. C. Arguello Hernández<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [jorge.borrego@umich.mx](mailto:jorge.borrego@umich.mx)

<sup>1</sup>Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Veracruz, México

### RESUMEN

En este trabajo se expone la obtención de películas a base de nanopartículas de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) para recubrir morteros in situ. Como primer trabajo, se caracterizaron las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> utilizadas para analizar las propiedades estructurales y ópticas. Los resultados de difracción de rayos X muestran la presencia de una sola fase, anatasa tetragonal con buena intensidad en los patrones de difracción del TiO<sub>2</sub>. Las caracterizaciones ópticas por su parte muestran una brecha de energía de activación entre 3.20 y 3.28 eV, propias de la fase obtenida en difracción. Una vez caracterizadas las nanopartículas se sintetizó una solución coloidal con diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub> para su aplicación in situ y analizar su adherencia al material. Los recubrimientos obtenidos muestran buena adherencia al sustrato (mortero), sin cambio de color, rugosidad y apariencia. Los morteros con recubrimientos se analizaron por difracción de rayos X para corroborar la presencia del TiO<sub>2</sub>, en los resultados se observa que el TiO<sub>2</sub> está presente en el recubrimiento, pero la intensidad disminuye a medida que la proporción aumenta.

**Palabras clave:**

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental producto de las plantas industriales, climatización doméstica y el uso de combustibles fósiles con ineficiente proceso de combustión en el transporte, son el principal responsable de la degradación de monumentos históricos y edificios en áreas urbanas (Gherardi, et al., 2016). Las superficies exteriores de los materiales de construcción están constantemente expuestas a las acciones de los factores ambientales, contaminantes de origen orgánico e inorgánico, así como a las acciones de microorganismos que contribuyen significativamente al deterioro (López Moreno, et al., 2014); que en la mayoría de los casos presenta cambios irreversibles en alguna de las propiedades de los materiales. Este deterioro envuelve procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales comienzan en la superficie penetrando gradualmente al interior del material (Vulic, et al., 2015). Uno de los signos más evidentes del deterioro en los edificios es la presencia de manchas negras, cianobacterias, en las áreas superficiales expuestas, debido a los contaminantes transportados por el aire y agua de lluvia. Estas manchas negras no solo son un problema de carácter estético, ya que revelan el deterioro de los materiales de construcción (Alfieri, et al., 2017).

El daño producido por los agentes contaminantes puede mitigarse o disminuirse evitando que sigan afectando la estructura de los materiales en los edificios, si estuvieran adecuadamente protegidos. La aplicación de recubrimientos protectores disminuye la acción negativa de los contaminantes minimizando el contacto directo con el entorno, el depósito de una capa protectora adecuada puede mejorar las propiedades de la superficie, dando paso a un deterioro de los materiales de construcción más lento.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diferentes soluciones para preservar los materiales de construcción de agentes contaminantes y degradantes: desde los recubrimientos con materiales como el lodo, baba de nopal y cal; pasando después al uso de yeso, cemento, pinturas, barnices o lacas; hasta hoy en día la aplicación de polímeros y resinas naturales o sintéticas. En este camino por desarrollar recubrimientos que resistan el ambiente y protejan de la contaminación a las construcciones actuales y patrimoniales y simultáneamente cumplan con los criterios estéticos, los recubrimientos nano-estructurados han adquirido gran interés por parte de los investigadores y de los usuarios finales, ya que estos proporcionan superficies resistentes a la adherencia de contaminantes, polvo y agua, además de ofrecer otras propiedades como fotoluminiscencia, autolimpieza o resistencia a impactos. La propiedad de autolimpiarse es un fenómeno foto-inducido que comprende dos diferentes procesos: las reacciones de degradación fotocatalítica de diferentes contaminantes y el incremento de la hidrofiliadad superficial por la disminución del ángulo de contacto y la creación de una película uniforme de agua sobre la superficie del recubrimiento; de esta forma, los contaminantes atrapados en la superficie del recubrimiento auto limpiante son descompuestos parcial o totalmente debido a la acción fotocatalítica y los residuos son removidos por el aire o las lluvias debido a la superficie hidrofóbica (Vulic, et al., 2015).

En los últimos años, se han hecho esfuerzos en la síntesis de materiales nanoestructurados que sean capaces de degradar los contaminantes alojados en los edificios y monumentos patrimoniales y artísticos. Se han analizado una gran variedad de materiales para identificar cuáles pueden ser usados como recubrimientos de acuerdo con sus propiedades estructurales, ópticas y fotocatalíticas. Dentro de los materiales con mejores propiedades para cumplir esta función se encuentran los óxidos metálicos semiconductores como el óxido de zinc (ZnO), trióxido de Wolframio (WO<sub>3</sub>) y el óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) (Gherardi, et al., 2016) (Hernandez Carrillo, et al., 2018), (Tseng, et al., 2010). De los tres materiales antes mencionados, el TiO<sub>2</sub> es el semiconductor más utilizado debido a sus propiedades ópticas, eléctricas, y su alta actividad fotocatalítica (Astinchap, et al., 2017); estabilidad química y estructural, bajo costo, abundancia de material, baja toxicidad y amigable con el medio ambiente (Yu, et al., 2002) (Wang, et al., 2016) (Crisan, et al., 2008) (Wu, et al.,

2014).

El óxido de titanio se presenta en tres formas cristalinas: anatasa (tetragonal), rutilo (tetragonal) y brookita (ortorrómbica). De estas fases, la anatasa presenta mejores propiedades para la fotodegradación de contaminantes (Kallel, et al., 2006); además, una mayor capacidad de absorción y una menor tasa de recombinación electrón-hueco (Kapusuz, et al., 2013). La brecha de energía de 3.2 eV de la anatasa-TiO<sub>2</sub> hace que este material se active con la luz UV generando pares electrón-hueco los cuales pueden recombinarse o migrar a la superficie del material donde participan en reacciones de reducción-oxidación (redox) originando la mineralización de contaminantes (Gherardi, et al., 2016).

Las aplicaciones recientes que se le han dado al óxido de Titanio en los materiales de construcción han sido, al interior en la mezcla de concreto, morteros y cerámicas, o usado de forma externa como recubrimiento sobre vidrios o superficies de piedras naturales o artificiales. (Colangiuli, et al., 2015). En el presente trabajo se desarrollo un recubrimiento a base de una solución coloidal con nanopartículas de anatasa-TiO<sub>2</sub> dispersas con aplicación in situ. La importancia de este trabajo radica en la utilización de nanopartículas capaces de mineralizar contaminantes en agua y aire por medio de un recubrimiento el cual se puede aplicar en el lugar de trabajo sin necesidad de algún procedimiento adicional para activar las nanopartículas ya que están funcionan directamente con la luz solar. Adicionalmente, el recubrimiento no afecta la apariencia del material.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Obtención de nanopartículas y recubrimiento.

Las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> se obtuvieron por la técnica de Sol-gel, los reactivos que se utilizaron para realizar la solución coloidal fueron: Tetrabutóxido de titanio (Ti (OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub>) como fuente de Titanio, ácido clorhídrico (HCl), alcohol etílico absoluto y Agua desionizada. El TiO<sub>2</sub> se obtuvo de la hidrólisis de tetrabutóxido de titanio con el ácido clorhídrico (HCl) y el agua desionizada diluida en etanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH). El ácido funcionó como catalizador de la hidrólisis. La solución coloidal se compone de dos soluciones: la primera contiene el tetrabutóxido de titanio y el HCl en un matraz; y la segunda por una mezcla de agua y alcohol etílico. Las dos soluciones se mezclan agregando la segunda por medio de goteo manteniendo la primera en agitación constante y temperatura ambiente. La solución se mantiene en agitación continua durante una hora. Posteriormente se eleva la temperatura a 70°C para comenzar a eliminar por evaporación los residuos y obtener un gel que posteriormente se convierte en cristal.

Los cristales obtenidos se trituran con la ayuda de un mortero hasta obtener un polvo fino. El polvo se lleva a tratamiento térmico por 1 hora a 450°C para obtener las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> en fase anatasa.

Una vez obtenidas las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, estas se dispersan en una solución a base de tetraetilortosilicato (TEOS) y alcohol polivinílico (PVA) con la ayuda de un dispersor de partículas ultrasónico. El sol obtenido es transparente sin presencia de color.

La solución coloidal esta lista para su aplicación por medio de spray o brocha.

### 2.2 Caracterizaciones.

Las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> se caracterizaron por Difracción de rayos X (Bruker D2 phaser) las mediciones de las muestras fueron realizadas en 2θ en un rango de 20° a 80°. Los espectros de reflectancia difusa fueron realizados con un espectrofotómetro UV-Vis (Shimadzu UV-vis-NIR 3600) en un rango de longitud de onda de 25 a 800 nm.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Difracción de rayos X.

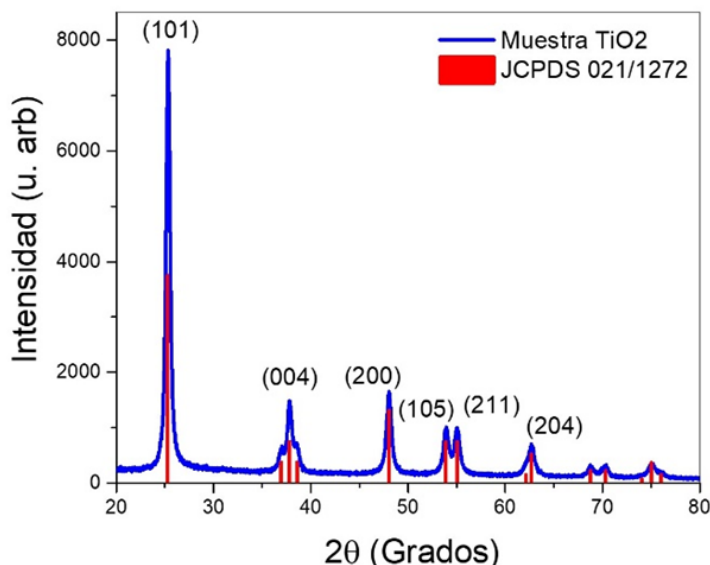


Figura 1. Patrón de difracción de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

El patrón de difracción de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> se muestran en la Figura 1. Todas las intensidades de los patrones coinciden con los patrones de la fase anatasa del TiO<sub>2</sub> acorde a la tarjeta (JCPDS 021/1272) del equipo de detección. Las nanopartículas muestran alta intensidad y patrones bien definidos al igual que los planos característicos en  $2\theta = 25.38^\circ$ ,  $38.02^\circ$ ,  $48.08^\circ$ ,  $54.08^\circ$ ,  $55.21^\circ$  y  $62.78^\circ$  que corresponden a los planos (101), (004), (200), (105), (211) y (204) respectivamente. No se observa la presencia de otras fases, lo cual demuestra la presencia de una fase pura de anatasa debido a la temperatura utilizada en el tratamiento térmico y al tiempo determinado.

Para determinar el tamaño de cristal promedio se calculó por medio de la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$$

Donde D es el tamaño de cristal,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\beta$  es el ancho medio a la altura media del plano principal (FWHM) (101) y  $\theta$  es el ángulo de difracción. El tamaño de cristal calculado fue de 32 nm. También se determinaron los parámetros y el volumen de la celda los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros estructurales obtenidos del patrón de difracción de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>.

Muestra	Parámetros de la celda (Å)		Volumen de la celda (Å <sup>3</sup> )	Tamaño de cristal (nm)
	a=b	c		
TiO <sub>2</sub>	3.7876	9.5203	136.5731	32.0

### 3.2 Espectroscopia UV-vis.

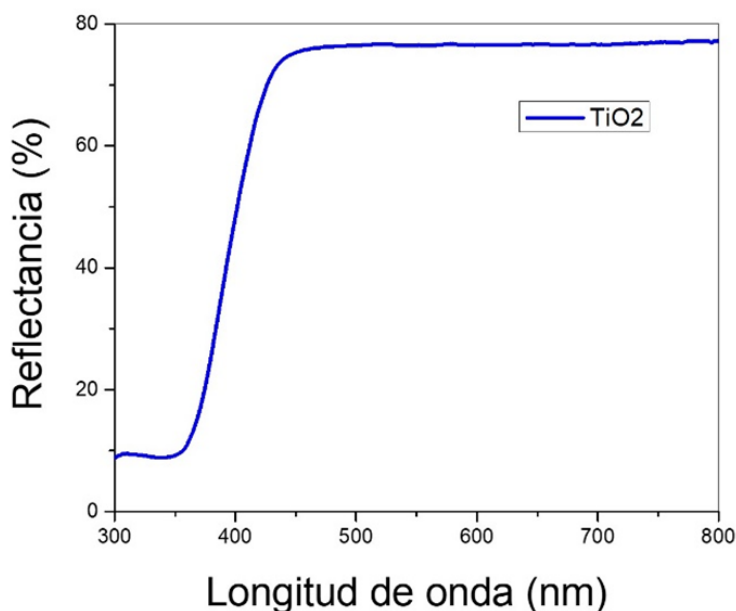


Figura 2. Reflectancia difusa de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

Se realizó la medición de reflectancia difusa a las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, el patrón de reflectancia se muestra en la Figura 2. La gráfica muestra una reflectancia consistente entre 70 y 80%, no se observa la presencia de bandas de absorción por encima de los 500 nm. En el rango de longitud de onda entre 350 a 480 nm aproximadamente se observa un incremento de la reflectancia entre 10 y 70%, la cuales la banda de absorción propia del TiO<sub>2</sub>. Se determinó la brecha de energía usando la función de Kubelka-Munk (Borrego Pérez, y otros, 2021). La gráfica del cálculo de la brecha de energía se muestra en la Figura 3. El valor de la brecha de energía calculado fue de 3.2 eV la cual es el valor acorde a la fase anatasa.

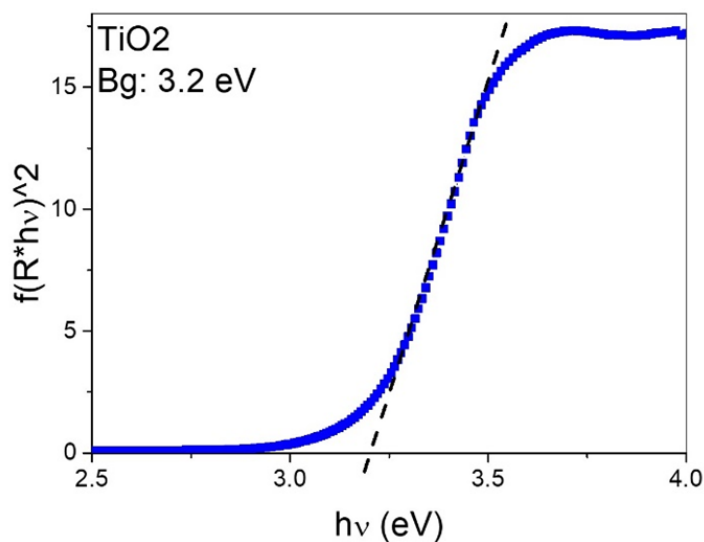


Figura 3. Determinación de la brecha de energía (bg) de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

Por medio de estas caracterizaciones realizadas se pudo comprobar que las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> tenían las propiedades estructurales y ópticas de la fase deseada, en este caso de la fase anatasa.

### 3.3 Recubrimiento en las muestras de mortero.

Se realizaron pruebas de recubrimiento en las muestras de mortero. La muestra se dividió y del un lado se aplicó la solución coloidal por brocha y en el otro lado se aplicó la solución por spray como se observa en la Figura 4 (a). La solución tardó en secar, alrededor de 1 hora, después de ello se observa una película húmeda, al paso del tiempo, la muestra vuelve al color original como se observa en la figura 4(b). El recubrimiento presenta buena adherencia a la muestra de mortero, sin alterar la rugosidad, color y textura. Se hicieron pruebas para determinar la resistencia del recubrimiento por medio de rayaduras y de la exposición a condiciones exteriores medioambientales, se observó que el recubrimiento muestra buena resistencia.

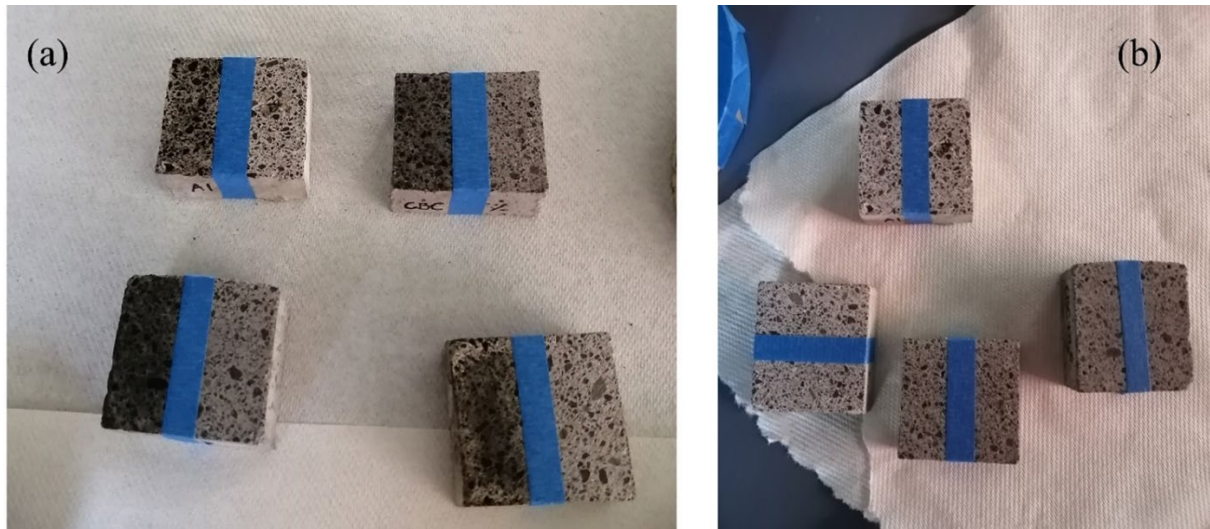


Figura 4. (a) Muestras de mortero recubiertas. (b) Acabado final del recubrimiento con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  una vez seco.

## 4. CONCLUSIONES

Las caracterizaciones realizadas a las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  corroboraron la presencia de la fase deseada para la aplicación de estas en la degradación de contaminantes. El recubrimiento realizado con nanopartículas dispersas de  $\text{TiO}_2$  mostró buena adherencia a las muestras de mortero sin modificar las propiedades ópticas y estructurales del sustrato como el color, apariencia, rugosidad y/o acabado. También mostró resistencia a las rayaduras y a las condiciones exteriores. Actualmente se está probando la eficiencia fotocatalítica del recubrimiento y su capacidad de proteger al mortero de la penetración del agua.

El recubrimiento con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  muestra una fácil aplicación in situ y una buena resistencia a las condiciones que podríamos encontrar en un ambiente urbano, aunado a la posibilidad de mostrar una buena eficiencia fotocatalítica.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, CONACyT, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán. También agradecen el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH

## 6. REFERENCIAS

- Alfieri, I., Lorenzi, A., Ranzenigo, L., Lazzarini, L., Predieri, G., Lottici, P. P. (2017). *Synthesis and characterization of photocatalytic hydrophobic hybrid TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> coatings for building applications*. *Building and Environment*, 111, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.019>
- Astinchap, B., Moradian, R., Gholami, K. (2017). *Effect of sputtering power on optical properties of prepared TiO<sub>2</sub> thin films by thermal oxidation of sputtered Ti layers*. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 63, 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.02.007>
- Borrego Pérez, J. A., González, F., Meza Avendaño, C. A., Montoya de los Santos, I., López Juárez, R., Hernández, I., Alonso-Guzmán, E. M., Martínez-Monilia, W., Chávez García, H. L. (2021). *Structural, optical and photoluminescence properties of TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>: Tm<sup>3+</sup> nanopowders*. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.166083>
- Colangiuli, D., Calia, A., Bianco, N. (2015). *Novel multifunctional coatings with photocatalytic and hydrophobic properties for the preservation of the stone building heritage*. *Construction and Building Materials*, 93, 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.100>
- Crişan, M., Brăileanu, A., Răileanu, M., Zaharescu, M., Crişan, D., Drăgan, N., Anastasescu, M., Ianculescu, A., Niţoi, I., Marinescu, V. E., Hodoroagea, S. M. (2008). *Sol-gel S-doped TiO<sub>2</sub> materials for environmental protection*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 354, Issues 2–9, Pages 705-711, ISSN 0022-3093, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.07.083>.
- Gherardi, F., Colombo, A., D'Arienzo, M., Di Credico, B., Goidanich, S., Morazzoni, F., Simonutti, R., Toniolo, L. (2016). *Efficient self-cleaning treatments for built heritage based on highly photo-active and well-dispersible TiO<sub>2</sub> nanocrystals*. *Microchemical Journal*, 126, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.043>
- Hernandez Carrillo, M. A., Torres Ricardez, R., García Mendoza, M. F., Ramirez Morales, E., Rojas Blanco, L., Diaz Flores, L. L., Sepúlveda-Palacios, G. E., Paraguay-Delgado, F., Pérez Hernández, G. (2020). *Eu-modified ZnO nanoparticles for applications in photocatalysis*. *Catalysis Today*. Volume 349, Pages 191-197, ISSN 0920-5861, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.04.060>.
- Kallel, W., Bouattour, S., Kolsi, A. (2006). *Structural and conductivity study of Y and Rb co-doped TiO<sub>2</sub> synthesized by the sol-gel method*. *Journal of Non-crystalline Solids*. Volume 352, Issues 38–39, 3970–3978. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.08.014>
- Kapusuz, D., Park, J., Ozturk, A. (2013). *Sol-gel synthesis and photocatalytic activity of B and Zr co-doped TiO<sub>2</sub>*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 74, Issue 7, Pages 1026-1031, ISSN 0022-3697, <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2013.02.022>.
- López Moreno, A., Sepúlveda Sánchez, J., Mercedes Alonso Guzmán, E., & Le Borgne, S. (2014). *Calcium carbonate precipitation by heterotrophic bacteria isolated from biofilms formed on deteriorated ignimbrite stones: influence of calcium on EPS production and biofilm formation by these isolates*. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 30(5), 547-560. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.888715>
- Tseng, T. K., Lin, Y. S., Chen, Y. J., Chu, H. (2010). *A review of photocatalysts prepared by solgel method for VOCs removal*. *International Journal of Molecular Sciences*, 11, 2336-2361. <https://doi.org/10.3390/ijms11062336>
- Vulic, T., Rudic, O., Vucetic, S., Lazar, D., Ranogajec, J. (2015). *Photocatalytic activity and stability of TiO<sub>2</sub>/ZnAl layered double hydroxide based coatings on mortar substrates*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 58, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.015>
- Wang, W., Li, Y., Kang, Z., Wang, F., & Yu, J. C. (2016). *Applied Catalysis B: Environmental*, 182, 184-192.

- Wu, N., Wang, Y., Lei, Y., Wang, B. (2014). *Preparation and photocatalytic activity of N–Ag co-doped TiO<sub>2</sub>/C porous ultrafine fibers mat*. *Ceramics International*, 20(40), 2017-2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.112>
- Yu, J. C., Yu, J., Ho, W., Jiang, Z., & Zhang, L. (2002). Effects of F- Doping on the Photocatalytic Activity and Microstructures of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Powders. *Chemistry of Materials*, 14, 3808-3816. <https://doi.org/10.1021/CM020027C>



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-739-MX  
pp. RC – 29 – 39



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## Eficiencia energética en una rehabilitación patrimonial en el centro histórico de Oaxaca. Caso de estudio casa habitación Independencia N° 204

K.Y. Hernández Matus<sup>1\*</sup>, H. Gómez Barranco<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [karime.hdzm@gmail.com](mailto:karime.hdzm@gmail.com)

<sup>1</sup> Egresada del Posgrado en Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, UABJO, Oaxaca de Juárez, México.

<sup>2</sup> Profesora del Posgrado en Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, UABJO, Oaxaca de Juárez, México.

### RESUMEN

Debido a los elevados índices de contaminantes antropogénicos producidos por las ciudades, se ha promovido la eficiencia energética para conservar integralmente el patrimonio inmueble inserto en entornos urbanos; empero, los proyectos de intervención en el Centro Histórico de Oaxaca no estiman el consumo energético en etapas tempranas de la propuesta. Al abordar un enfoque preexistente, la investigación busca hacer aportes disciplinares y promover la sustentabilidad del patrimonio en un entorno exiguamente estudiado, teniendo como objetivo incorporar estrategias de eficiencia energética para mitigar el consumo energético de un anteproyecto de rehabilitación del inmueble en precario estado de conservación ubicado en Av. Independencia N° 204, siendo esto la principal limitante al proponer una intervención arquitectónica por mimesis. La metodología empleada es mixta, involucrando variables cualitativas y cuantitativas para la medición de las variables de investigación. En una primera etapa se realizó una revisión bibliográfica y un análisis in situ del caso de estudio; posteriormente se cuantificó el indicador energético en cinco propuestas de rehabilitación arquitectónica. Los resultados indicaron que las propuestas con estrategias pasivas y de gestión energética presentaban una mejora mayor al 50% con respecto al proyecto de referencia, concluyendo que es imprescindible su aplicación para una adecuada conservación.

**Palabras clave:** consumo energético; patrimonio inmueble; rehabilitación energética; sustentabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las ciudades consumen del 60% al 80% de la energía global (Organización de las Naciones Unidas, 2017), potenciando los agentes atmosféricos relacionados con la oxidación, erosión y deterioro de inmuebles patrimoniales, los cuales son todos aquellos monumentos, lugares y conjuntos con un valor único excepcional (UNESCO, 2019).

En consecuencia, se ha abogado por la inclusión de estrategias que aminoren la energía utilizada sin alterar las actividades dentro de los edificios, como la Cumbre de la Tierra de Río (1992) o el Acuerdo de París (2016).

De acuerdo a la Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), es necesario incorporar tecnologías para mitigar los efectos del cambio climático en la salvaguarda del patrimonio inmueble (ICOMOS, 2021). En conjunto con la eficiencia energética se consideran indispensables para la conservación integral de inmuebles históricos, siendo ratificado por instituciones como en los indicadores de cultura para el desarrollo (2014) de la UNESCO, en los Objetivos del Desarrollo Sostenible, en la Agenda 2030, en la Resolución 20GA/15 - Cultural Heritage and the Climate Emergency (2020) donde el patrimonio se destacó como facilitador de la sustentabilidad.

Investigaciones han analizado los alcances de la rehabilitación energética en materia de gestión eléctrica en luminarias, equipos y sistemas de refrigeración artificial; concluyendo que, siempre que respete la historicidad, la eficiencia energética permite conservar integralmente el patrimonio edificado y adaptarlo a los usos contemporáneos (Cabeza et al., 2018; Martínez-Molina et.al, 2016). Respetando las técnicas de construcción y dependiendo de las estrategias implementadas, entre las que destacan análisis de materiales y gestión de sistemas eléctricos, se obtuvieron mejoras del 20% al 80% en edificios de diferentes tipologías y antigüedad (Kerdan et al., 2017; Maestre de San Juan Escolar, 2015; Espinoza et al., 2017).

Lamentablemente, en las ciudades patrimoniales de México existen problemáticas socioeconómicas que relegan la eficiencia energética al segundo plano; que en conjunto con el 70% de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por el uso energético (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático et al., 2018), someten al patrimonio inmueble de las centralidades urbanas a una gran cantidad de contaminantes antropogénicos que comprometen su historicidad. Tal es el caso del Centro Histórico de Oaxaca, un entorno urbano que refleja una pérdida histórica y cultural al poseer inmuebles en precario estado de conservación.

Este panorama nos lleva a aprovechar el estado actual de la casa habitación ubicado en Av. Independencia N° 204 para incorporar estrategias de eficiencia energética y mitigar el consumo energético en un proyecto de rehabilitación en más del 20%.

El caso de estudio se encuentra emplazado en una superficie de más de 600 metros cuadrados y cuenta con elementos ornamentales de cantera (ignimbrita) rosa. Debido a los daños ocasionados por la humedad, colonización biológica y la mala praxis en la restauración, actualmente solo conserva su primera crujía y remanentes en la parte posterior del inmueble (ver figura 1 y 2).

Al ser una investigación cuali-cuantitativa, con limitantes espaciales relacionadas al caso de estudio, se partió de un análisis in situ para cuantificar la variable de investigación mediante simuladores energéticos en cinco propuestas de rehabilitación, las cuales se identificaron por el cambio de materiales. Se concluye con un análisis comparativo, destacando el aporte demostrativo para poder aplicarlo en otros casos de estudio con mayor nivel de conservación.

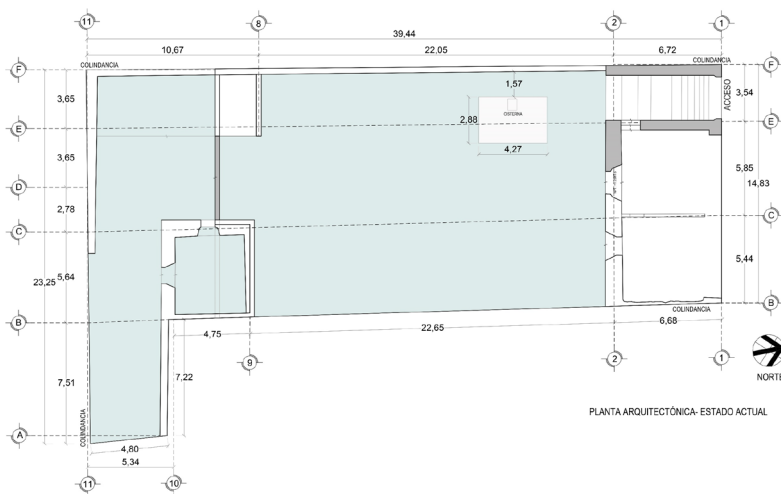


Figura 1. Vista en planta del caso de estudio, especificando colindancias y acceso principal.  
 Fuente: Plano modificado por los autores



Figura 2. Vista de la primera crujía del caso de estudio. Fuente: Tomada por los autores en 2020.

## 2. PROCEDIMIENTO

Siendo una investigación causal de carácter cuali-cuantitativo, se partió de una revisión bibliográfica y de técnicas no invasivas, como la termografía, para reconocer el estado actual del caso de estudio; y determinar las estrategias de gestión energética a implementar, siendo esta la variable independiente de la investigación.

Lo anterior es refutado por las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Bioclimatic Analysis Tool (BAT). En lo que concierne a las variables dependientes, se cuantificaron los alcances de las estrategias en el consumo energético de cuatro propuestas, siendo comparadas con un proyecto de referencia.

Para conocer el comportamiento térmico, se recurrió a los simuladores Two-Dimensional Building Heat-Transfer Modeling (THERM) y Energy Plus; posteriormente se realizó un cálculo paramétrico a partir de los valores dados por el software (ver tabla 1).

Tabla 1. Diseño del experimento.

Variable independiente		Variable dependiente
Estrategias de eficiencia energética	Sin estrategias (referente)	Conductividad térmica (W/mK)
	Con estrategias	Consumo energético (kW/h)

Fuente: Elaborada por los autores

Al concluir las simulaciones se realizó un análisis comparativo de los resultados para corroborar si existe una diferencia significativa con respecto al proyecto de referencia.

### 2.1 Estrategias de gestión energética y propuestas de rehabilitación

Al incorporar los valores de las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el Bioclimatic Analysis Tool, se visualizó que la ciudad de Oaxaca de Juárez cuenta con una zona de confort entre 21.9 °C – 26.9 °C, un clima cálido húmeda con poca oscilación, de acuerdo a la clasificación de Köppen, y un bioclima templado; determinando que la masividad en los materiales y la ventilación controlada eran las principales estrategias a considerar en la



propuesta arquitectónica.

La ASHRAE Guideline 34-2019 Energy Guidelines for Historical Buildings exhorta incorporar aislantes térmicos, luminarias LED, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que respondan a las normas de eficiencia energética del contexto, como la NOM-026-ENER-2015 en México. Por lo tanto, se desarrolló un proyecto de intervención arquitectónica que se incorpore por mimesis y el principio de reversibilidad; además de respetar el sistema constructivo de los elementos históricos existentes de la primera crujía.

Se proyectaron doce espacios y en primera instancia se realizó un proyecto de referencia que no consideraba las estrategias establecidas.

Se incorporaron sistemas constructivos sin materiales aislantes, altura interior de 3.50 m, luminarias fluorescentes e incandescentes; se consideró el uso de equipos eléctricos e infiltración de aire a lo largo de todo el día.

En respuesta se desarrollaron las siguientes propuestas con estrategias de eficiencia energética:

- Primera propuesta: Losa de vigueta y bovedilla, muros de ladrillo rojo recocido sin aislantes y de 24 cm con espuma de poliuretano.
- Segunda propuesta: Cubierta invertida con el sistema de vigueta y bovedilla, y con espuma aislante en muros de 24 cm.
- Tercera propuesta: Losa de vigueta y bovedilla, y todos los paramentos exteriores con espuma de poliuretano.
- Cuarta propuesta: Análoga a la segunda, pero con todos los muros con material aislante.

Las propuestas anteriormente listadas se caracterizan por tener una altura interior de 4.20 m, luminarias LED, gestión de equipos eléctricos e infiltración del aire en horario diurno, y árboles pivotantes. Los cinco proyectos fueron sometidos a simulaciones energéticas para conocer el comportamiento y consumo energético de cada una de ellas.

## 2.2 Cálculo de conductividad térmica mediante puentes térmicos.

La conductancia térmica de los materiales está ligada al comportamiento y consumo energético de un inmueble; de acuerdo a la ASHRAE Guideline 34-2019, es importante considerar los puentes térmicos, los cuales aumentan el flujo de calor al interior de los espacios debido al cambio significativo de la resistencia térmica, propiciando el aumento en el consumo energético y de condensaciones en los elementos constructivos (Ministerio de Fomento, 2014, pág. 2). Se utilizó una cámara termográfica para registrar los puentes térmicos en el caso de estudio, identificando varios en el vestíbulo del inmueble (ver figura 3) y en construcciones aledañas (ver figura 4), los cuales comprometen la historicidad del inmueble; en las imágenes se reconocen por la variación de color relacionado con un cambio geométrico o constructivo.

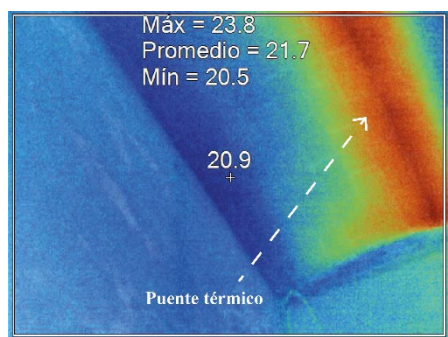


Figura 3. Puente térmico en el vestíbulo.  
Fuente: Tomada por los autores en 2020

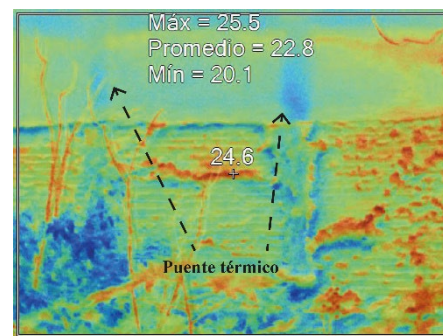


Figura 4. Puente térmico en la parte posterior.  
Fuente: Tomada por los autores en 2020

En la etapa proyectual, por medio del software de análisis de transmisión bidimensional THERM, se estimó el valor  $\psi$ , el cual es valor de flujo de calor de un puente térmico (W/mK), en diez detalles constructivos de techumbres, muros de diferentes espesores y cimentaciones de cada una de las propuestas de rehabilitación, los cuales se detallan a continuación:

- Detalle 1: Muro de 24 cm y losa.
  - Proyecto de referencia: Muro sin aislante de poliestireno.
  - Primera y tercera propuesta de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno con losa de vigueta y bovedilla.
  - Segunda y cuarta propuesta de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno con cubierta invertida.
- Detalle 2: Muro de 24 cm y ventana.
  - Proyecto de referencia: Muro sin aislante de poliestireno
  - Propuestas de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno.
- Detalle 3: Cimentación de muro de 24 cm.
  - Proyecto de referencia: Muro sin aislante de poliestireno.
  - Propuestas de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno.
- Detalle 4: Muro de 48 cm y losa.
  - Proyecto de referencia: Muro sin aislante de poliestireno.
  - Primera propuesta de eficiencia energética: Muro sin aislante de poliestireno y losa de vigueta y bovedilla.
  - Segunda propuesta de eficiencia energética: Muro sin aislante de poliestireno con cubierta invertida.
  - Tercera propuesta de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno y losa de vigueta y bovedilla.
  - Cuarta propuesta de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno con cubierta invertida.
- Detalle 5: Muro de 48 cm y ventana.
  - Proyecto de referencia: Muro sin aislante de poliestireno.
  - Primera y segunda propuesta de eficiencia energética: Muro sin aislante de poliestireno.
  - Tercera y cuarta propuesta de eficiencia energética: Muro con aislante de poliestireno.
- Detalle 6: Cimentación.
  - Proyecto de referencia: Cimentación y muro sin aislante de poliestireno.
  - Primera y segunda propuesta de eficiencia energética: Cimentación y muro sin aislante de poliestireno, con baldosa de barro en pisos interiores.
  - Tercera y cuarta propuesta de eficiencia energética: Cimentación y muro con aislante de poliestireno, con baldosa de barro en pisos interiores.
- Detalle 7: Muro de adobe y viguería de madera de la primera crujía.
  - Proyecto de referencia: Muro de adobe con viguería en madera de pino.
  - Propuestas de eficiencia energética: Muro de adobe y viguería en madera de cedro.
- Detalle 8: Muro de ladrillo y viguería de madera de la primera crujía.
  - Proyecto de referencia: Muro de ladrillo y viguería en madera de pino.
  - Propuestas de eficiencia energética: Muro de ladrillo y viguería en madera de cedro.
- Detalle 9: Muro de ladrillo, viguería y bóveda de primera crujía.
  - Proyecto de referencia: Muro de ladrillo, viguería en madera de pino y terrado de bóveda de tres centímetros

- Propuestas de eficiencia energética: Muro de ladrillo, vigería en madera de pino y terrado de bóveda de quince centímetros.
- Detalle 10: Losa de vigería en primera crujía.
  - Proyecto de referencia: Vigería en madera de pino.
  - Propuestas de eficiencia energética: Vigería en madera de cedro.

A partir de los valores de las resistencias térmicas superficiales, la conductividad térmica y el espesor de los materiales, el software desarrolla un gráfico de isotermas, donde se representa las temperaturas del detalle; el gráfico Heat Flux, donde se refleja el flujo de calor; y el factor U, el cual es la recopilación de los valores transmitancia térmica de un elemento arquitectónico ( $W/m^2K$ ). En conjunto con la longitud del detalle constructivo, se determina el valor psi del mismo; un ejemplo se ve en la figura 5 y 6 del elemento constructivo de la losa de vigueta y bovedilla con muro de ladrillo rojo recocido con aislante de la tercera propuesta de estrategias de eficiencia energética.

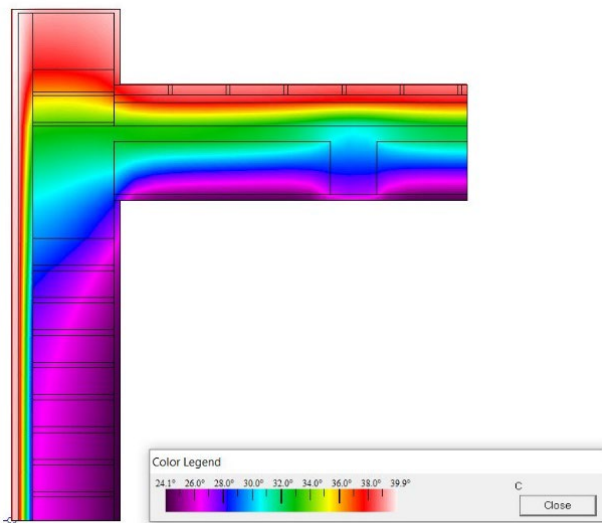


Figura 5. Gráfico de los isotermas del detalle constructivo. Fuente: Imagen elaborada por los autores, retomada de THERM.

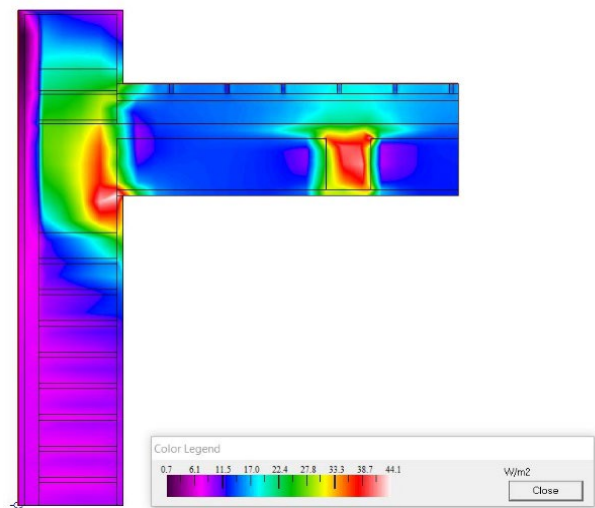


Figura 6. Gráfico de Heat Flux del detalle constructivo. Fuente: Imagen elaborada por los autores, retomada de THERM.

En las imágenes se observa que, gracias al aislante, el calor se va disipando de 39.9 °C a 24.1 °C al interior del espacio, logrando un valor psi de -0.0849  $W/mK$ . Se debe enfatizar que los puentes térmicos no pueden desaparecer, sin embargo, entre más cercano esté al valor de cero, se considera que existe un menor flujo de calor hacia el interior del espacio. Lo anterior fue repetido en cada elemento constructivo desarrollado.

### 2.3 Comportamiento y consumo energético

Para cuantificar el consumo energético en Energy Plus se consideró la conductancia térmica del sistema constructivo, el porcentaje de infiltración de aire, uso de la iluminación interior y exterior, la ocupación y el equipo de oficina para visualizar el comportamiento térmico en un año promedio de cada una de las propuestas.

Se calculó el número de horas en uso de los sistemas de refrigeración, teniendo un setpoint de 25.1°C, posteriormente se cuantificaron los kilowatt-hora (kWh) y el porcentaje de ahorro con respecto al proyecto de referencia.

### 3. RESULTADOS

En México, la NMX-AA-164-SCFI-2013 recomienda mitigar más del 10% de la ganancia de calor con respecto al proyecto de referencia, reduciendo significativamente el consumo energético de un espacio. A partir de los elementos generados en THERM, se demostró que los detalles que cuentan con aislante disminuyeron entre el 7.49% hasta el 62.52% en valor psi. Mientras que los elementos de la primera crujía (noveno y décimo detalle) presentan optimizaciones menores al 3.0%, mejorando el comportamiento térmico al incorporar material con menor conductividad térmica (ver tabla 2 y figura 7).

Tabla 2. Valor psi de los detalles constructivos

Detalle	Sin eficiencia (W/mK)	Con eficiencia			
		1° Propuesta (W/mK)	2° Propuesta (W/mK)	3° Propuesta (W/mK)	4° Propuesta (W/mK)
1	-0.17357	-0.0849	-0.06505	-0.0849	-0.06505
2	-0.16708	-0.15456	-0.15456	-0.15456	-0.15456
3	-0.03914	-0.01614	-0.01614	-0.01614	-0.01614
4	-0.19652	-0.18336	-0.16136	-0.11434	-0.09163
5	-0.28957	-0.24641	-0.24641	-0.24752	-0.24752
6	-0.08049	-0.07671	-0.07671	-0.02968	-0.02968
7	-0.12516	-0.12256	-0.12256	-0.12256	-0.12256
8	-0.1357	-0.13312	-0.13312	-0.13312	-0.13312
9	-0.12693	-0.12103	-0.12103	-0.12103	-0.12103
10	-0.03068	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03

Fuente: Elaborada por los autores

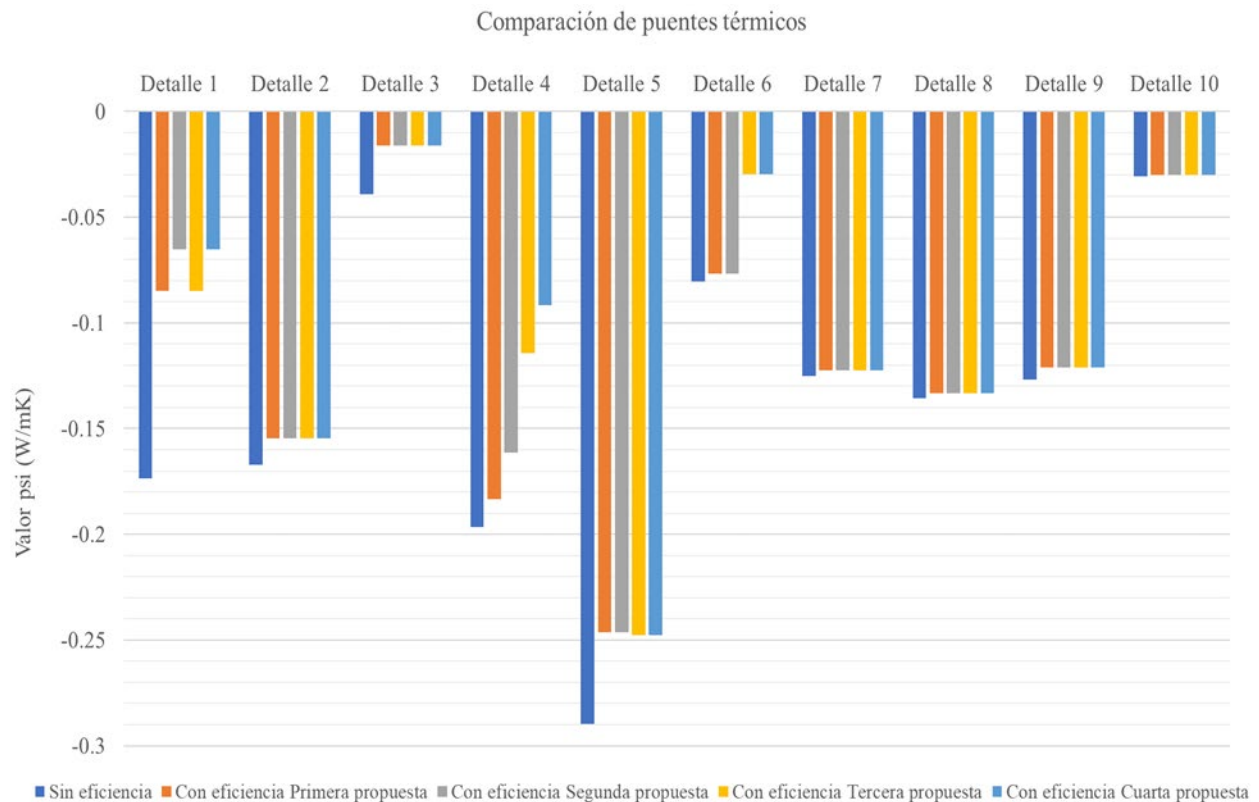


Figura 7. Gráfico comparativo de los valores psi. Fuente: Elaborada por los autores.

El consumo energético es uno de los principales indicadores de eficiencia energética; por lo tanto, en Energy Plus se visualizó con mayor profundidad el comportamiento térmico de las propuestas para cuantificar el consumo energético anual de cada una de ellas.

En Energy Plus se visualizó con mayor profundidad el comportamiento térmico de cada una de las propuestas anteriormente mencionadas. En primera instancia, las estrategias pasivas permitieron mitigar el uso del aire acondicionado en más de tres mil horas en un año, representando una optimización del 15% si consideramos que el proyecto de referencia superó el setpoint en 22,350 horas.

En la primera propuesta se contempló un uso de 18,013 horas; la segunda con 17,396 horas, siendo esta la opción con mayor optimización; la tercera con 18,959 horas; y la cuarta con 18,341 horas. Dichos datos se relacionan directamente con el consumo energético anual de cada una de las propuestas. Existiendo una diferencia en el uso de aire acondicionado de 5,746.64 kWh con la segunda propuesta y de 3,933.56 con la tercera propuesta, siendo la de mayor y menor optimización respectivamente.

En conjunto con la incorporación de luminarias LED, la gestión de equipos eléctricos y la infiltración de aire, se logró un ahorro mayor al 50% en el consumo energético anual en cada una de las propuestas con estrategias de eficiencia energética, siendo la segunda propuesta la que tuvo mejor comportamiento, lo cual se observa con mayor detenimiento en la tabla 3 y figura 8.

Tabla 3. Análisis comparativo del consumo energético

Simulación		Aire acondicionado con setpoint 251°C (kWh)	Ahorro energético	Consumo energético anual (kWh)	Ahorro energético total
Sin eficiencia		25,926.00	-	61,980.85	-
Con eficiencia energética	Primera simulación: Losa de vigueta y bovedilla	20,895.08	19.40%	29,621.98	52.20%
	Segunda simulación: Cubierta invertida	20,179.36	22.17%	28,906.26	53.36%
	Tercera simulación: Losa de vigueta y bovedilla con aislantes en muros	21,992.44	15.17%	30,719.34	50.43%
	Cuarta simulación: Cubierta invertida con aislantes en muros	21,275.56	17.93%	30,002.46	51.59%

Fuente: Elaborada por los autores

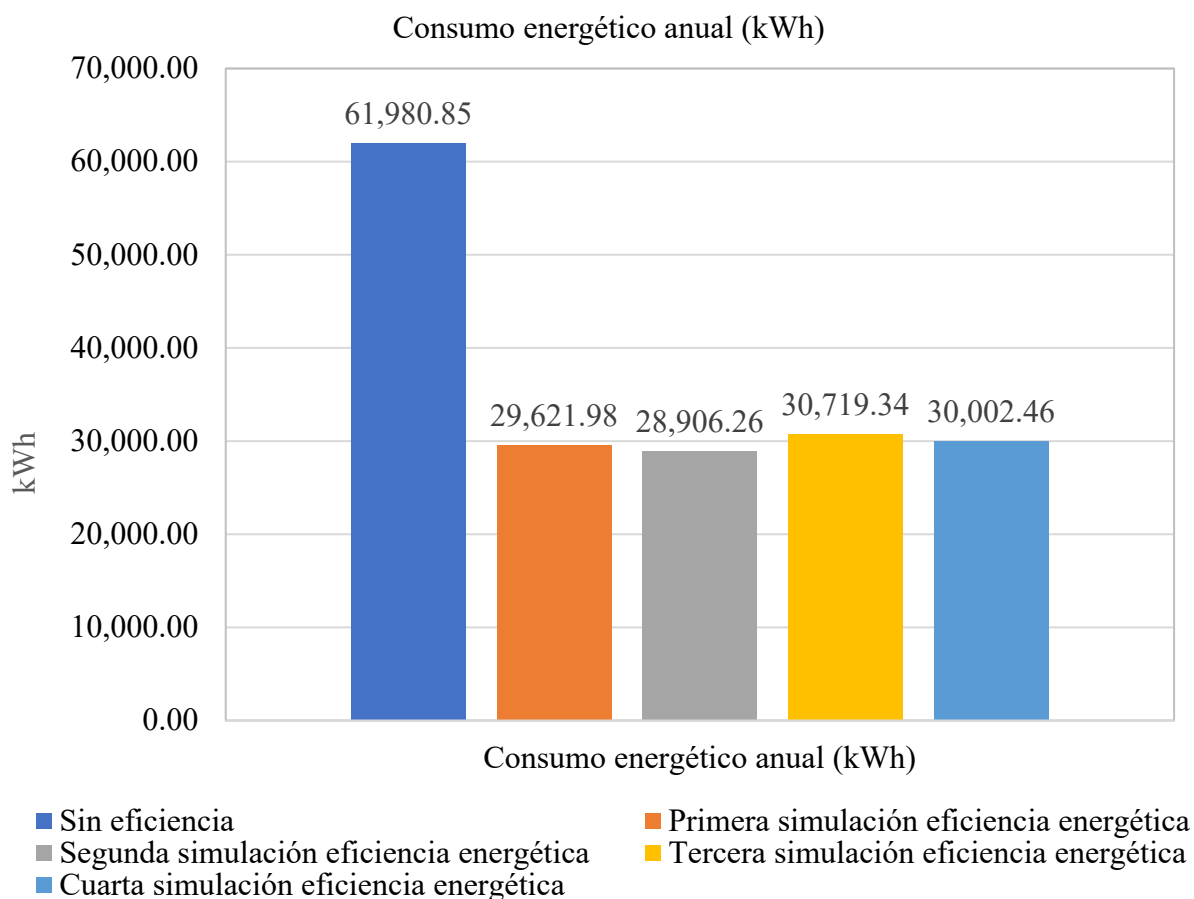


Figura 8. Gráfico de consumo energético anual. Fuente: Elaborada por los autores.

Se mejoró el comportamiento térmico en un 15%, lo que se encuentra concatenado con el consumo energético. Dichos resultados se apegan a la recomendación de las normas mexicanas y se encuentran dentro de los parámetros obtenidos en investigaciones análogas descritas en la introducción.

Al contar con un caso de estudio de un inmueble en desuso, la investigación se limitó a calcular los alcances de diversas propuestas en etapas tempranas de un proyecto de rehabilitación arquitectónica. Particularmente, la segunda propuesta, la cual contempla una cubierta invertida y espuma aislante solo en muros de 24 cm, es la que mejor comportamiento térmico y ahorro energético presentó, con una disminución del 22.17% y 53.36% con respecto al proyecto de referencia.

Le sigue la primera propuesta, con una loseta de vigueta y bovedilla y un porcentaje de optimización de 19.49% y 52.20% respectivamente. Mientras que, la cuarta cuenta con un ahorro de 51.59% y la tercera de 50.43% en consumo energético, siendo estas las propuestas con espuma de poliuretano en todos los muros y con mejor mitigación en las variables de investigación.

Esto demuestra la importancia de cuantificar y comparar los alcances de diversas propuestas, ya que nos permite gestionar las decisiones proyectuales.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los centros históricos son parte intrínseca de la sociedad, reflejan el pasado y permiten sustentar las bases del futuro. Sin embargo, la exigua gestión en el uso de equipos eléctricos y el comportamiento térmico del edificio ha ocasionado elevados índices en el consumo energético de las zonas urbanas, lo que pone en riesgo la historicidad del patrimonio inmueble.

Esto ha llevado a la incorporación de estrategias de eficiencia energética en diversos tipos de inmuebles. Por lo tanto, la presente investigación decidió aprovechar el estado de conservación del objeto de estudio para realizar un análisis descriptivo del comportamiento de las variables de investigación, logrando una mitigación de más del 50% en el consumo energético de las propuestas con estrategias de eficiencia energética. Desde un enfoque teórico, el análisis in situ permitió identificar las estrategias pasivas adaptables al caso de estudio, mientras que en la cuantificación de resultados se reconocieron los alcances en materia de eficiencia energética.

Esto hace hincapié en la recuperación de las características bioclimáticas que perdieron los edificios históricos al ser acondicionados para su nuevo uso, siendo necesario el desarrollo de trabajos que contemplen perspectivas multidisciplinarias en el área de rehabilitación arquitectónica. En este sentido, se busca crear un punto de referencia para trabajos similares o inmuebles con mayor estado de conservación que busquen analizar diversos indicadores energéticos.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Coordinación de la Maestría en Ciencias de la Construcción, con PNPCCONACYT, de la Facultad de Arquitectura de “5 de Mayo” perteneciente a la UABJO, quien facilitó la entrada al inmueble histórico y brindó el equipo necesario para el análisis in situ.

#### **6. REFERENCIAS**

ASHRAE. (2019). *ASHRAE Guideline 34-2019- Energy Guidelines for Historical Buildings*. Atlanta: ASHRAE.

Cabeza, L., de Gracia, A., Pisello, A. (2018). *Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review*. Energy and Buildings, 177, 96-111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.058>

Espinoza, J., Quesada, F., Calle, A., Ortiz, J. (2019). *Estándares de sustentabilidad para viviendas patrimoniales del Centro Histórico de Cuenca-Ecuador*. Estoa, 8(15), 103-131. <https://doi.org/10.18537/est.v008.n015.a06>

ICOMOS. (2021). *Plan Científico Triennial Plan (TSP) 2021-24*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2022, de Consejo Internacional de Monumentos y Sitios: [https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Secretariat/2022/TSP/ADCOMSC\\_202110\\_2-1\\_Triennial\\_Scientific\\_Plan\\_ESP.pdf](https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Secretariat/2022/TSP/ADCOMSC_202110_2-1_Triennial_Scientific_Plan_ESP.pdf)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informa Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: SEMARNAT, INEEC.

Kerdan, I., Raslan, R., Ruysevelt, P., Gálvez, D. (2017). *A comparison of an energy/economic-based against an exergoeconomic-based multi-objective optimisation for low carbon building energy design*. Energy, 128, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.142>

Maestre de San Juan Escolar, C. (2015). *Rehabilitación Energética en Edificios Históricos, Análisis y propuestas de actuación en el Antiguo Palacio del Marqués de Casa-Tilly*, en Cartagena. 386. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena.

Martínez-Molina, A., Tort-Ausina, I., Cho, S., Vivancos, J. (2016). *Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 70-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>

Ministerio de Fomento. (2014). *Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía Código Técnico de la Edificación, Puentes Térmicos*. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, España.

Organización de las Naciones Unidas. (2017). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

UNESCO. (2019). *UNESCO*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2022, de UNESCO: <https://es.unesco.org/about-us/introducing-unesco>





Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-772-MX  
pp. RC – 40 – 45



X CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## **Material ecológico - sustentable con propiedades físico - mecánicas e impermeables, elaborado a base de resina de pino para uso en la construcción**

J. C. Guerrero Jerónimo<sup>1\*</sup>, N. Díaz González<sup>1</sup>, R. Silva Orozco<sup>1</sup>

\*Autor de Contacto: [juan.carlos.guerrero.jeronimo@gmail.com](mailto:juan.carlos.guerrero.jeronimo@gmail.com)

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

### **RESUMEN**

La resina de pino es un producto forestal no maderable, su extracción proviene principalmente de los pinos (*pinus*), es un producto con grandes propiedades químicas, su uso se limita a algunas aplicaciones químicas y dentro del mercado de barnices, impermeabilizantes y adhesivos, sin embargo, en este trabajo se busca crear un material cementante totalmente ecológico y sustentable, con la finalidad de utilizarse en la construcción. Se utilizó una metodología experimental donde se elaboraron 90 mezclas diferentes y se eligieron solo 2 mezclas con las condiciones más favorables. Se realizaron especímenes cúbicos de 5x5x5 cm de longitud y las pruebas realizadas fueron físicas, mecánicas y de durabilidad. Los resultados de la última mezcla elaborada indican que las mezclas con resina de pino presentan características físicas adecuadas, la resistencia obtenida fue superior a 300 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual indica un posible uso de la resina de pino como material alternativo en obras de ingeniería.

**Palabras clave:**

## 1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el uso de un nuevo material el cual contiene características ecológicas sustentables esto permitiendo el uso de fuentes ecológicas para el uso en la construcción con lo cual nos ayudará y fortalecer a un uso dentro de la construcción ya que por el momento dentro del mercado no existen muchos materiales con base ecológica causando un alto impacto dentro del planeta tierra principalmente la generación de dióxido de carbono el cuál ha sido una de las afectaciones más grandes que los materiales al causado es por esto que nuestra investigación es de vital importancia.

Se pretende promover un mayor uso de materiales ecológicos para reactivar la economía de los campesinos que se dedican a la extracción de estos recursos naturales los cuales ayudan a la conservación de los bosques impidiendo un mal uso de este, la resina de pino es un material totalmente renovable y que dentro de la comunidad indígena de Cherán la producción es una de las mejores en todo el estado de Michoacán, motivación para la población a seguir reforestando el bosque y al cuidado del mismo.

Las pruebas presentadas se elaboraron de acuerdo a las normativas que cada una de ellas representa guía das en las normativas ONNCCE para una correcta metodología siendo así resultados confiables y de fácil aceptación.

La extracción de la resina de pino se realiza mediante el método francés, es importante mencionar que la extracción de la resina de pino no afecta negativamente al ecosistema del bosque, sin embargo, la extracción de la resina de pino es un impacto positivo a todo el bosque ya que además de ser una actividad económica positiva ayuda al cuidado de cada hectárea de bosque de donde es extraída.

## 2. PROCEDIMIENTO

El principal problema al cual nos enfrentamos a la hora de su elaboración fue que no contábamos con un previo conocimiento sobre el uso de la resina de pino esto nos llevó a un procedimiento de prueba y error el cual consistió en la elaboración de alrededor de 90 mezclas con el fin de obtener la relación con la cual la resina de pino se pudiera solidificar.

Para determinar está mezcla adecuada se mezclaron en moldes la misma cantidad de resina (20 gramos) por la cantidad de 50 gramos de cualquier material que se tuviera fácil acceso.

El uso de diferentes materiales para determinar una buena mezcla con la resina de pino fueron las siguientes:

- Semillas de pino (piñas)
- Arena
- Arcilla
- Carbonato
- Harina
- Cal
- Vegetales (restos)
- Cemento
- Pintura
- Semillas de trigo
- Avena molida
- Maíz molido
- Olote molido
- Maizena
- Pastas de trigo molidas

- Azúcar
- Entre otras más.

Sin embargo, de las mezclas con los materiales descritos anteriormente solo se solidificaron dos, los cuales fueron mediante el uso del cemento y la cal, se optó por desarrollar la mezcla con la combinación de cal, ya que la elaboración de esta misma conlleva procesos menores a la elaboración del cemento.

El tipo de cal que se utilizó dentro de la elaboración de las mezclas fue cal hidratada el cual a la hora de su mezclado no presenta algún fenómeno destacado y solo presenta un brillo constante dentro de la masilla de cal y resina de pino.

A si mismo la cal y la resina de pino representan la base principal de nuestra investigación, ya que los dos materiales son de cualidades amigable en relación al uso de cementos, la cal es un material que a la hora de ser hidratado este es capaz de absorber en pequeñas cantidades el dióxido de carbono que se encuentra a su alrededor, mientras que el uso de resina de pino beneficia en gran cantidad a la conservación y protección del bosque de dónde es extraída.

A la mezcla de cal y resina de pino se le adicionó agregado pétreo, para así darle una mayor solidificación a la hora de su fraguado y terminado, estos tres materiales son los compuestos principales de nuestro material.

### **2.1. Elaboración de la mezcla con base en resina de pino y cal.**

Se elaboraron probetas con dimensiones de 5 \* 5 \* 5 cm el cual consistió en la mezcla de diferentes proporciones de cal y resina de pino estas proporciones fueron calculadas mediante la metodología de prueba y error ya que el inicio de la investigación no se contaba con una previa exactitud en cantidades.

Se usó la resina de pino tal cual provenía directamente del bosque sin sufrir ningún cambio en ella, al mezclar las cantidades adecuadas la resina de pino junto con la cal elabora un tipo de masilla la cual presenta características de adherencia muy importantes, así mismo, se utilizó arena para obtener una mayor dureza a la hora de su secado.

La mezcla se realizó de la misma forma que se elabora un mortero convencional, usando la resina de pino como la base para la adherencia entre la arena y la cal. Para nuestra primera mezcla, la resina de pino se utilizó al doble de cantidad del peso de la arena, esto con el fin de cubrir todas las superficies y caras de la arena y la cal, se mezcló con ayuda de espátulas ya que la fluidez que presentaba era muy poco, esto derivado de la falta de cantidad de la resina de pino, esta primer mezcla tenía similitud a una mezcla seca, con la cual se rellenaron los moldes para las probetas.

Para rellenar las probetas, se rellenaron mediante tres capas, de las cuales se optó por darle 30 golpes para su compactación, esto por las tres capas ya mencionadas, la consistencia del material se asimilaba mucho al material utilizado en la elaboración de block por lo cual decidimos ejercer más presión a la hora de su compactado y así poder obtener un material mayormente estable.

Sin embargo, con la elaboración de los especímenes nos dimos cuenta que la resina de pino contenía demasiada materia orgánica (restos de madera, moscos, huinumo) que posiblemente podría alterar el estado funcional de los especímenes a la hora de sus pruebas por lo que se decidió colarla mediante coladores de plástico, debido a su poca fluidez la resina de pino esta se tardó en colar dos días aproximadamente, eliminando así gran cantidad de restos de madera procedentes del rebane que se le hace al canal donde la resina es extraída, con esto la principal recomendación es limpiar la resina de todas esas materias orgánicas procedentes de la extracción.

Una observación más es el contenido de agua que la resina de pino posee, está proveniente de la temporada de lluvia que se da en el transcurso del año, una manera de observarla claramente es cuando el agua sube a la parte superior dejando a la resina de pino en la parte inferior, aprovechando para sacar toda el agua que se pueda extraer y así evitar que está sea mezclada y

tomada en cuenta con resina de pino.

Teniendo en cuenta estas observaciones, realizamos nuevamente una próxima mezcla, en esta ocasión para lubricar el molde se utilizó aceite de cocina ya que el aceite que se utiliza comúnmente para descimbrar el concreto contiene una cantidad de gasolina o Diesel, dos peligros potenciales para la resina de pino, en cambio el aceite de cocina no representa ningún peligro hacia la resina, facilitando los labores de descimbrado.

Se realizó la siguiente mezcla, para esta, se vació en el recipiente la arena y la cal para darle una previa mezcla y facilitar las labores, se procedió a vaciar la resina de pino en el doble de la cantidad de los agregados pétreos, en esta ocasión la masilla tenía una consistencia aún mejor derivado del colado de la resina de pino que se realizó previamente, el resultado en nuestra probeta presento características aún mejores, sellando todos los posibles huecos que en ella se presentaban.

Para desmoldarlo no se tiene que dejar un tiempo como el concreto o mortero, está probetas se desmoldaban inmediatamente sin ser destruidas y con una resistencia aparente, con esto observamos que es muy importante la compactación ya que utilizando una mayor fuerza este material presenta características aún mejores.

Se dejo reposar por medio de tres días para la siguiente obtención de resultados en la prueba de compresión simple, a los tres días de secado, se observa como la resina de pino está solidificada que a simple vista no se observa la utilización de la misma.

Se continuó realizando más mezclas modificando la cantidad de resina de pino empleada en las siguientes mezclas, así como cambiando un poco la metodología, observamos que al agregar un poco de agua cuando la mezcla de arena y cal está sin la resina está se vuelve más fácil de mezclar, por lo que utilizamos el mínimo porcentaje de agua antes de agregar la resina de pino, estas probetas quedan idénticas a la primera mezcla, pero facilitaban a la hora de ser mezcladas.

Un acontecimiento importante y a destacar es que al llevar estos especímenes al sol soportaban fácilmente las temperaturas que el sol presentaba, sin modificar físicamente su apariencia, aclarando que la resina de pino es de muy fácil cambio de estado físico al aplicar un cambio en la temperatura, volviéndose prácticamente un líquido, con esto obtenemos un importante paso para dentro de nuestra investigación, lograr que la resina de pino soporte las inclemencias del sol.

Actualmente se siguen desarrollando mezclas las cuales siguen soportando las inclemencias del sol y demás factores climáticos y que además cuentan con gran resistividad a la compresión simple, soportando cargas puntuales altas y todo esto siguiendo la misma metodología descrita anteriormente.

Es importante mencionar que la resina de pino es extraída por el método francés haciendo que esta se encuentre en un estado semisólido sin embargo la resina de pino se transforma a un estado líquido conforme a una constante agitación antes de vaciarla a la mezcla de arena y cal.

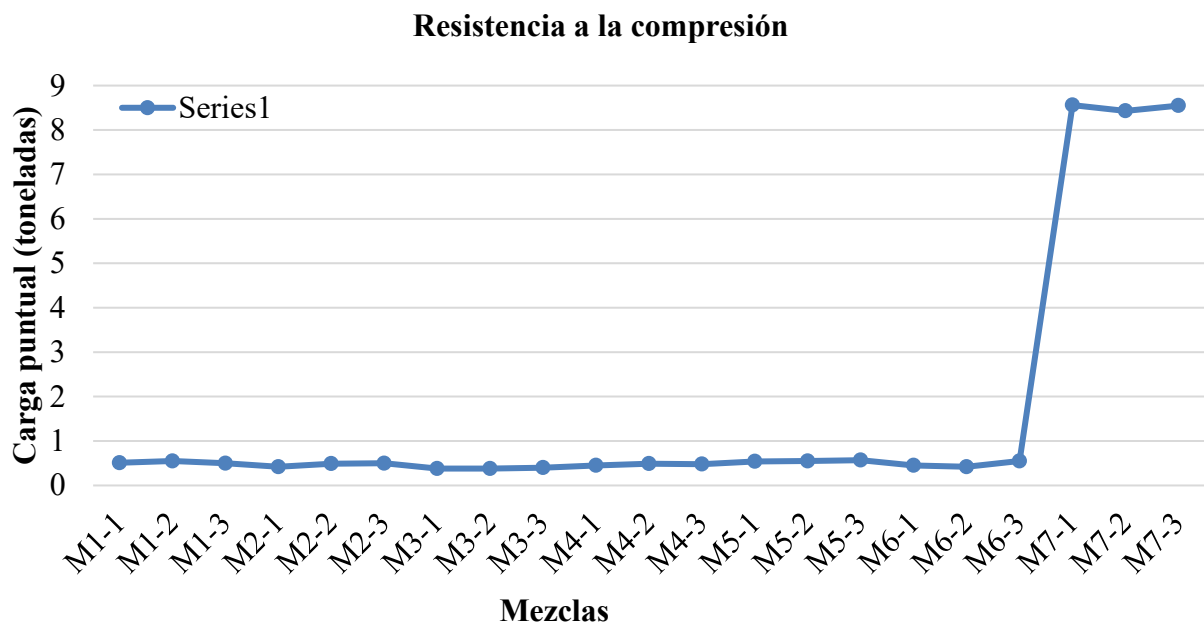
Una siguiente observación es que al reducir la cantidad de resina de pino la mezcla no se puede realizar, esto debido a que no se presenta una adherencia entre los materiales, por lo que es importante señalar el uso de la resina de pino como un adhesivo entre estos dos materiales.

Los resultados se muestran en la tabla 1 y la gráfica 1 en donde se observa el comportamiento de las diferentes mezclas dentro de un rango de un mes.

### 3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Tabla 1. En la tabla se presenta las diferentes cargas puntuales soportadas esto en la realización de la prueba a compresión simple.

Mezcla	Carga puntual resistida hasta la falla (toneladas)
M1-1	0.51
M1-2	0.55
M1-3	0.50
M2-1	0.42
M2-2	0.49
M2-3	0.50
M3-1	0.38
M3-2	0.38
M3-3	0.40
M4-1	0.45
M4-2	0.49
M4-3	0.48
M5-1	0.54
M5-2	0.55
M5-3	0.57
M6-1	0.45
M6-2	0.42
M6-3	0.55
M7-1	8.56
M7-2	8.43
M7-3	8.55



Grafica 1. En la gráfica se presenta el comportamiento que las mezclas tienden a realizar respecto a la carga puntual que se le ejerce a la hora de realizar la prueba de compresión simple.

Para la elaboración de este resumen se eligieron las mezclas más representativas en cuestiones físico-mecánicas y en relación al contenido de resina de pino las 7 mezclas elegidas presentan comportamientos adecuados físicamente aparentes, sin embargo, se puede observar dentro de la gráfica 1 que los resultados de la mezcla 1 a la mezcla 6 presentan un comportamiento pésimo en cuestión a la resistencia a la compresión simple.

Sin embargo, en la misma grafica (grafica 1) se presenta la última mezcla que actualmente seguimos desarrollando dentro del laboratorio de materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo asignada como M7 esta mezcla contiene una resistencia superior a las 8 toneladas de carga puntual con una resistencia de 320 kg/cm<sup>2</sup>.

Un resultado importante de nuestras mezclas su impermeabilidad, esto es sumamente importante ya que dentro de la construcción un problema frecuente es la humedad y el mal manejo de las filtraciones dentro de las obras ejecutadas.

#### **4. CONCLUSIONES**

Con forme seguimos realizando mezclas podemos entender aún mejor el comportamiento que la resina de pino aporta a las mezclas elaboradas, además, con esta investigación nos damos cuenta que la resina de pino puede aportar una solidificación que ayude a una resistencia superior a los 300 kg/cm<sup>2</sup>, gracias a esta última mezcla (M7) seguiremos realizando diferentes mezclas con contenido similar de los materiales para seguir estudiando la gran resistencia obtenida y con ella mantenemos la idea de crear un material a base de material ecológico.

Sin duda alguna la resina de pino puede ser una alternativa que se pueda utilizar dentro de la construcción a de más de ser un producto autosustentable, esto lo hace ser un material aún mejor, a de más de crear una mayor fuente de empleos dentro de las comunidades donde es extraída.

Seguiremos investigando para obtener mayores resultados de un material totalmente funcional y a de cuando en la rama de la construcción todo esto sin olvidarnos de nuestro objetivo principal, reducir la contaminación que los materiales tradicionales ejecutan.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al ingeniero Noel Diaz Gonzales por el gran conocimiento aportado a esta investigación de más de un gran interés en ella. De igual manera agradezco a la facultad de ingeniería civil por todo el conocimiento que me ha brindado, así mismo al laboratorio de materiales por darme la facilidad de uso en las diferentes maquinarias para ejecutar las diferentes pruebas realizadas y obtener los resultados presentados.

Los autores agradecen el apoyo financiero de: CIC-UMSNH, Conacyt, Proyecto Pronaces 321260, Sep-Promep e ICTI-Gob. Michoacán.



Editado por:  
P. Castro Borges  
E. M. Alonso Guzmán  
T. Pérez López



Trabajo en Extenso  
PC-856-MX  
pp. RC – 46 – 56



CONGRESO NACIONAL  
ALCONPAT  
MÉXICO 2022

Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México, 8 al 10 de noviembre de 2022, Telchac, Yucatán, México.  
Vol. III, Recuperación de las Construcciones

## Estudio a la resistencia de sulfatos (formación de etringita) en concretos con fly-ash

A. González De la Cerda<sup>1</sup>, C.K. Rojas Mayorga<sup>1</sup>, L.G. Ramírez Martínez<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [agonzalez15@ucol.mx](mailto:agonzalez15@ucol.mx)

<sup>1</sup> Universidad de Colima, Colima, México

<sup>2</sup> Distribuidora y Comercializadora DCC, México

### RESUMEN

Se buscó la proporción de fly-ash (20%, 30% o 50%) que más ayudaba a las mezclas de concreto atacadas por sulfatos a mantener su resistencia a través de pruebas de compresión, DRX y MEB. Se determinó la resistencia de 5 especímenes con curado y 5 sin curado. Las mezclas de concreto fueron sometidas a un ataque con sulfato de sodio antes de hacer estudios de DRX en un rango de 2° a 80° en 2θ. A diferencia de otros estudios, en este se buscó agregar fly-ash en proporciones altas, sin embargo, no se fue más allá del 50% en volumen. En todas las mezclas favoreció la adición de fly-ash en la resistencia. Después de 12 meses el diseño con curado pasa de 305.45 kg/cm<sup>2</sup> sin fly-ash a 385.71 kg/cm<sup>2</sup> con 30% y 397.15 kg/cm<sup>2</sup> en el diseño con 50% de fly-ash. Un 30% de adición de fly-ash muestra un balance favorable entre modificación de la mezcla y resultados a compresión.

**Palabras clave:** concreto; sustentable; sulfatos; fly-ash; difracción de rayos X;

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en la construcción, su popularidad se debe a la facilidad de su elaboración, que tan solo requiere la mezcla de arena, grava, cemento y agua (Mehta et al., 2005). El cemento es el componente del concreto con mayor costo energético de todos, la mayoría de esta energía es utilizada durante las operaciones de extracción y conminución.

La reducción del consumo energético en el proceso de conminución podría lograrse a través de la reducción del contenido de cemento en el concreto y la adición de un material, como las cenizas volantes o “fly-ash”, que no requiere del proceso de conminución como el cemento Portland, lo que permitiría mantener un bajo consumo energético. (Ali et al., 2011; Meng et al., 2018; Sitarz et al., 2022).

Las fly-ash son parte de los materiales que se conocen como materiales cementantes complementarios (Gokce & Simsek, 2021), que gracias a sus propiedades puzolánicas permiten el remplazo de una parte del cemento en las mezclas de concreto. Estos se obtienen como residuo del proceso de quema de carbón en centrales eléctricas (G. Sosoi et al., 2022) por lo que su uso reduce el impacto ambiental (al evitar su dispersión por el aire y agua) y reduce el riesgo que tienen estos desechos en los seres humanos (Marcin et al., 2021).

Cuando existen estructuras de concreto en suelos o agua ricos en sulfatos (sea agua oceánica, agua subterránea o agua residual industrial), los iones de sulfato reaccionan con las especies iónicas de la mezcla del concreto y precipitan en etringita, yeso o taumasita causando una expansión dentro del concreto y, por lo tanto, pérdida de dureza como resultado del estrés generado en la estructura ya endurecida. Con el tiempo, este tipo de ataque químico deteriora la infraestructura y reduce el ciclo de vida del concreto.

En esta investigación se busca estudiar el efecto que presenta la adición de fly-ash en el concreto con respecto a la resistencia a los iones sulfato a través del monitoreo de la aparición de etringita dentro de las muestras. Específicamente se analizarán muestras elaboradas con contenidos de 20, 30 y 50% en volumen de cenizas volantes, con y sin curado, expuestas a iones sulfatos para demostrar a través de las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) la presencia o ausencia de etringita en las muestras, e indicar si es o no factible el uso de concreto con fly-ash como aditivo para la reducción del impacto de los iones sulfatos en las estructuras de concreto.

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 Materiales y reactivos

Los reactivos utilizados en esta investigación fueron sulfato de sodio anhidrido ( $Na_2SO_4$ ) grado reactivo, arena triturada, grava, cemento portland tipo I, aditivo sikament 307, plastiment 600 y ceniza volante (Fly ash).

### 2.2 Equipos

La determinación de la resistencia a la compresión se llevó a cabo en una prensa en condiciones de operación. La caracterización de los materiales se realizó empleando técnicas como difracción de rayos X y SEM/EDX. El análisis por DRX se realizó con el equipo Xpert-Pro PANalytical de polvos y el análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX) de los materiales utilizados se realizó con un equipo modelo HITACHI TM3000 Tabletop Microscope acoplado a un analizador de energía dispersiva de rayos X de la marca BRUKER-Nano MIN SVE 2017 con un detector X-Flash.



### 2.3 Preparación de muestras

Los especímenes de concreto utilizados en este estudio fueron elaborados con dos diferentes diseños de mezcla ( $f_c$  150kg/cm<sup>2</sup> y  $f_c$  350 kg/cm<sup>2</sup>), para cada diseño se añadieron tres distintas proporciones de fly ash. Para cada una de las configuraciones anteriores se elaboraron diez especímenes de concreto, estos se construyeron con dimensiones de 15 cm x 30 cm y se usaron para observar la variación en el tiempo de la resistencia a la compresión, cinco de cada proporción se sometieron a curado y los otros cinco se evaluaron sin curado. También se elaboraron cuatro especímenes de cada configuración de dimensiones 10 cm x 20 cm, cada uno de estos se utilizaron para la medición de expansión por ataque químico de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la identificación de fases y caracterización mineralógica por difracción de Rayos X y microscopía electrónica de barrido. Todos los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo con el procedimiento reportado en la literatura (Hernández, 2006). Para el análisis por difracción de rayos X, de los especímenes de concreto de 10 cm x 20 cm se cortaron aproximadamente 2 cm de espesor ( $\pm 1$ ), que después fueron triturados y luego pulverizados.

### 2.4 Prueba mecánica de resistencia a la compresión

La determinación de resistencia a la compresión se evaluó en 28 días, 3 meses, 6 meses, 9 meses y 1 año, esto se llevó a cabo de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE 2002. Las bases de los especímenes o caras se cubrieron con una mezcla de mortero de azufre, con la finalidad de nivelar las probetas con los platos de la prensa, luego de esto, se sometieron a la prueba mecánica de resistencia a la compresión. Las medidas iniciales obtenidos de esta prueba se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Mediciones de referencia a prueba de resistencia a la compresión.

Diseño	Con curado	Sin curado
150 kg/cm <sup>2</sup>	305.45 kg/cm <sup>2</sup>	207.31 kg/cm <sup>2</sup>
350 kg/cm <sup>2</sup>	418.64 kg/cm <sup>2</sup>	446.01 kg/cm <sup>2</sup>

### 2.5 Ataque químico por sulfatos

Para la realización de esta prueba, se tomaron 2 cm de los especímenes de 10 x 20cm para someterlos al ataque químico. El ataque químico con sulfato de sodio se realizó de acuerdo con el procedimiento reportado en la literatura (J. Camacho-Bernal et al., 2013).

### 2.6 Pruebas de caracterización

La caracterización por difracción de rayos X (DRX) se realizó en un rango de 2° a 80° en 2 $\theta$  con la finalidad de observar las especies cristalinas presentes.

El análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB/EDX) permitió la obtención de micrografías de los materiales y el estudio semicuantitativo de las especies presentes en la superficie de las muestras.

El análisis EDX de todas las muestras fue llevado a cabo en magnificaciones de 250x, esto con la finalidad de tener un tamaño de muestra homogénea al hacer la cuantificación de componentes dentro del material.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resistencia a la compresión

Se llevaron a cabo los análisis de compresión y se catalogaron según la aplicación o no del proceso de curado. Se tomaron medidas a los 28 días, y a los 3, 6, 9 y 12 meses. En la Tabla 1 se observan los resultados del inicio, la mitad y el final del estudio.

Tabla 2. Evolución de la resistencia a compresión en diseños de mezcla  $f'c$  150kg/cm<sup>2</sup> y  $f'c$  350 kg/cm<sup>2</sup>.

				Mes 1	Mes 6		Mes 12		
D	% FA	PV(kg)	R(cm)	P(kg/cm <sup>2</sup> )	Res(%)	P(kg/cm <sup>2</sup> )	Res(%)	P(kg/cm <sup>2</sup> )	Res(%)
150	0	18.6	13	175.62	117	191.43	128	207.31	138
	20	18.82	14.5	203.04	135	205.54	137	254.89	170
	30	18.6	15	234.43	156	224.95	150	273.85	183
350	0	18.48	18.5	352.39	101	427.06	122	446.01	127
	30	18.74	15	438.55	125	454.43	130	539.61	154
	50	18.82	18	412.84	118	456.65	130	535.77	153

*D= diseño de mezcla, PV (kg)= peso volumétrico, R(cm)=revenimiento, P(kg/cm<sup>2</sup>) = presión, Res (%)= resistencia.*

En la Figura 1 se puede observar la evolución de la resistencia a la compresión de las muestras a las que se les aplicó el proceso de curado y en la Figura 2 la evolución de la resistencia a la compresión de las muestras sin la aplicación este proceso.

Se puede observar en la segunda figura una disminución poco considerable en la resistencia a períodos más largos, con respecto a la primera figura. La diferencia se puede considerar por el curado de las muestras, ya que en la Figura 1 las muestras son con curado, y las de la Figura 2 fueron curadas a temperatura ambiente, lo cual pudo provocar que las reacciones de hidratación no se llevaran adecuadamente.

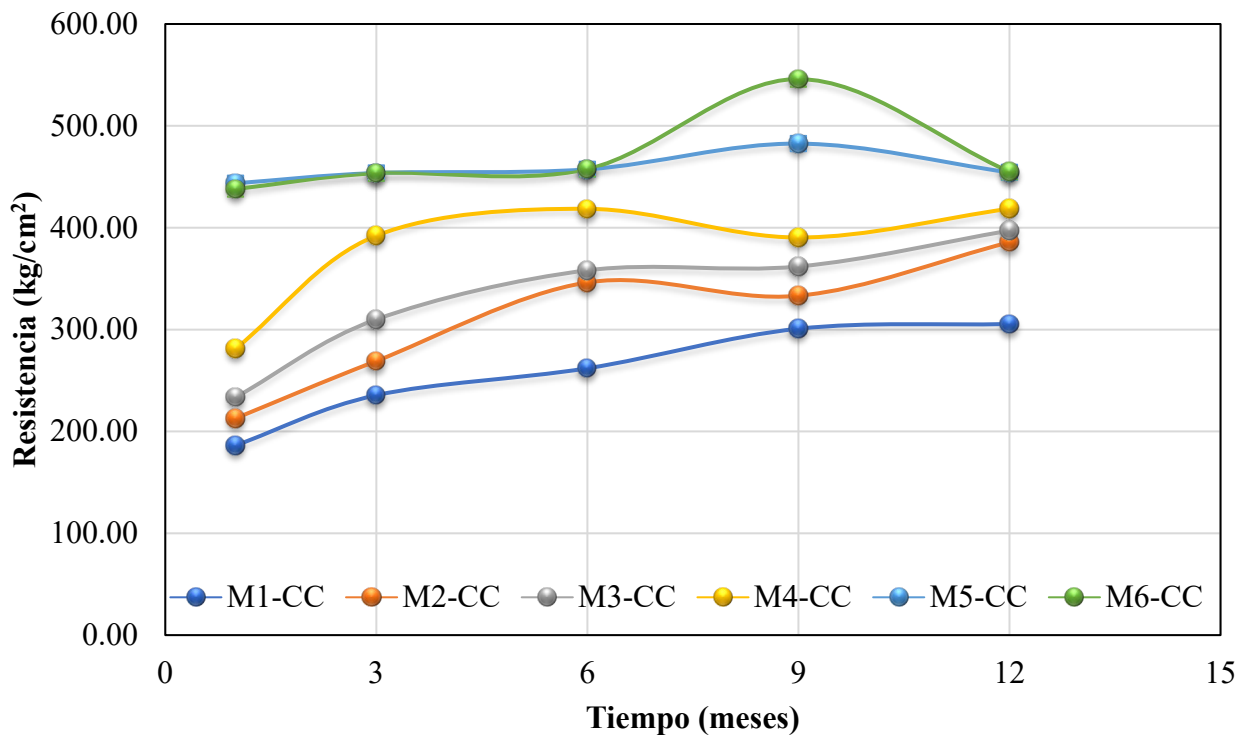


Figura 1. Evolución de la resistencia a la compresión en muestras con curado.

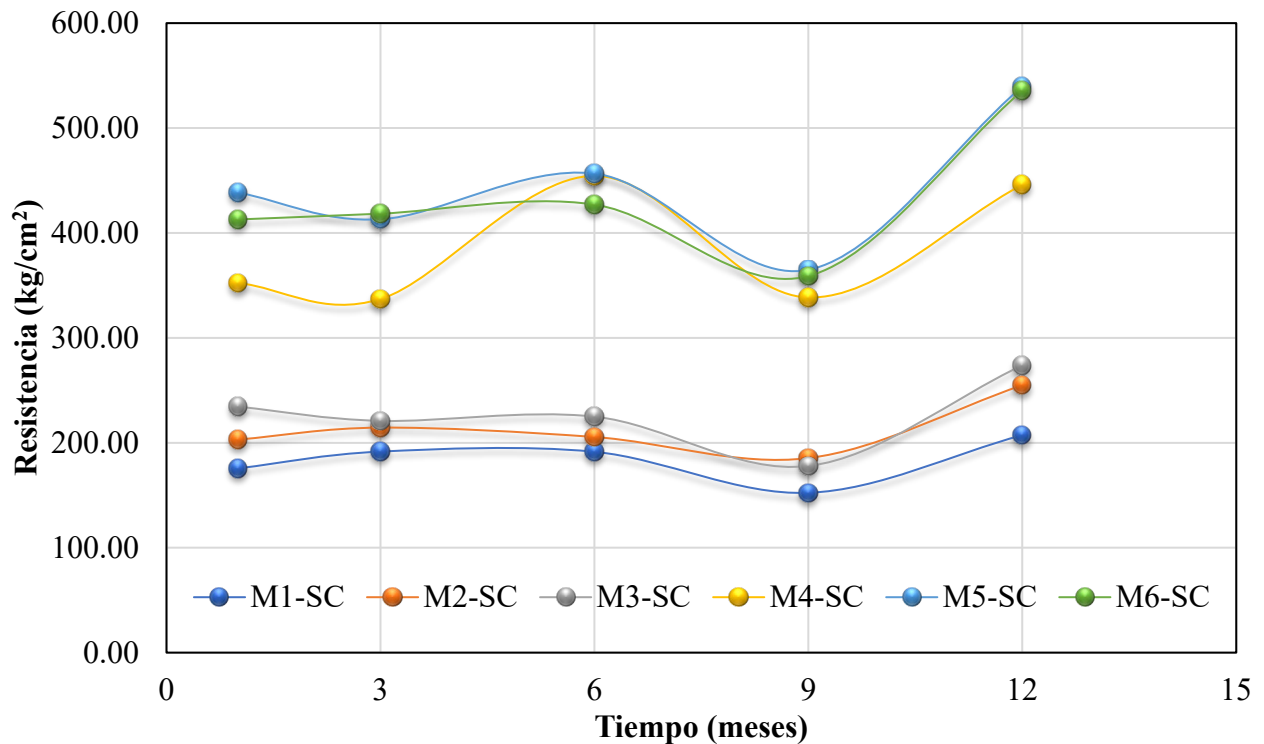


Figura 2. Evolución de la resistencia a la compresión en muestras sin curado.

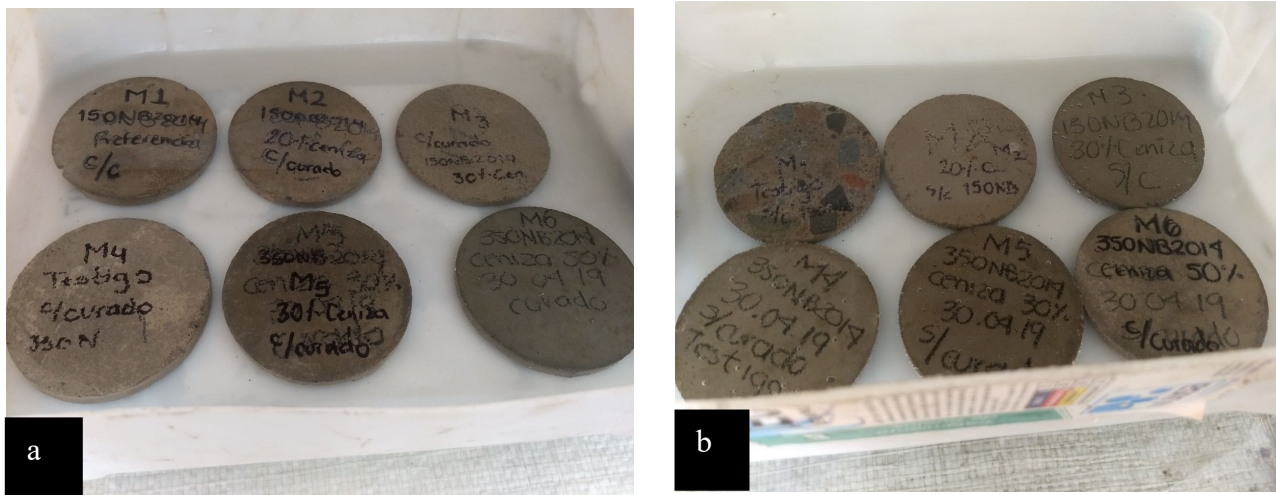


Figura 3. Muestras después de 28 días de exposición en solución 1 molar de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Del lado izquierdo se ven las muestras con curado (a) y del lado derecho se ven las muestras sin curado (b).

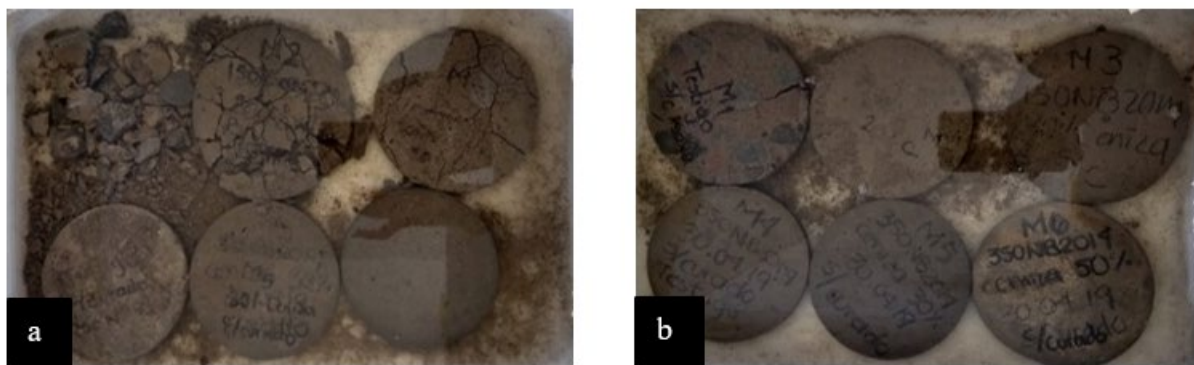


Figura 4. Muestras después de 6 meses de exposición en solución 1 molar de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Del lado izquierdo se ven las muestras con curado (a) y del lado derecho se ven las muestras sin curado (b).

### 3.2 Difracción de rayos X

Las imágenes obtenidas de la difracción de rayos X (Figuras 5 y 6) fueron analizadas a través del software Match. En las imágenes observan los picos correspondientes a la etringita (los picos pequeños entre  $5^\circ - 10^\circ$ ), lo que indica un deterioro dentro de la matriz del concreto en las muestras atacadas por sulfatos.

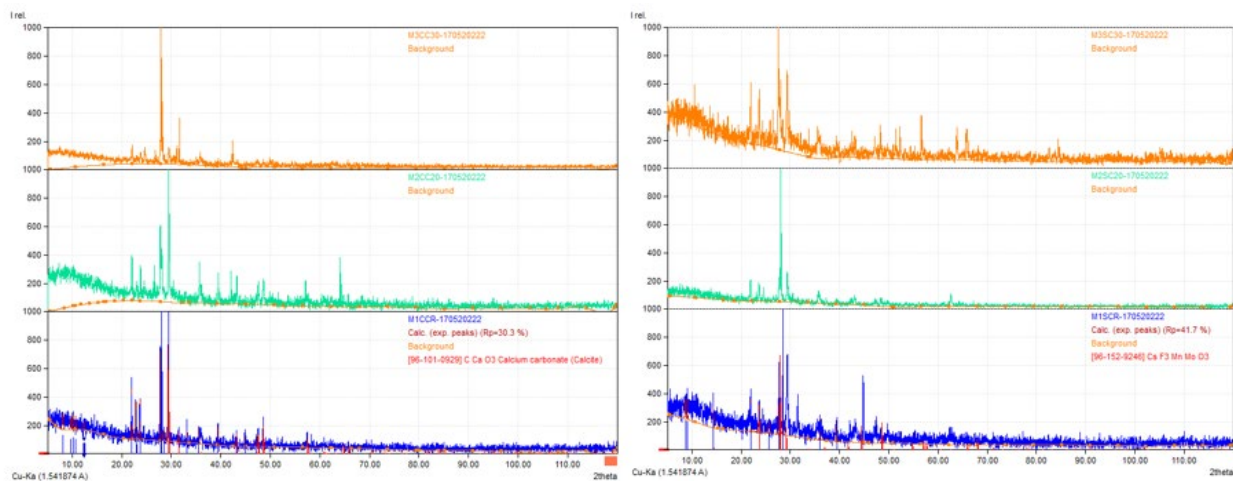


Figura 5. Difractogramas para las muestras de la 1 a la 3 con porcentajes de fly-ash (de abajo hacia arriba) de 0, 20 y 30%. Del lado izquierdo se encuentran los análisis de muestras con curado y del lado izquierdo las muestras sin curado.

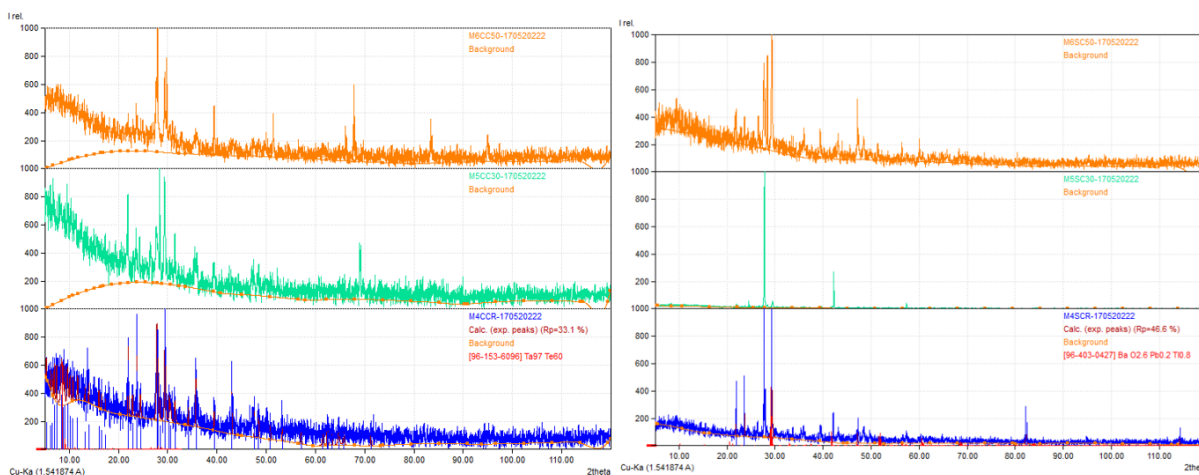


Figura 6. Difractogramas para las muestras de la 4 a la 6 con porcentajes de fly-ash (de abajo hacia arriba) de 0, 30 y 50%. Del lado izquierdo se encuentran los análisis de muestras con curado y del lado derecho las muestras sin curado.

### 3.3 Microscopía electrónica de barrido

En la figura 7 se muestran los resultados del análisis EDS de la muestra de 350 kg/cm<sup>2</sup> en una muestra con curado (lado izquierdo) y sin curado, también se comparan con las mezclas a las que se les agregó un 30% en volumen de fly-ash. Se observa que en la muestra sin curado hay una menor concentración de oxígeno, sodio y hierro en porcentaje de masa. El resto de los componentes, silicio, carbono, calcio y aluminio son mayores en la muestra con curado.

Al agregar fly-ash a cualquiera de las muestras, se puede ver una gran modificación de la distribución de elementos en el material. Esta modificación química es en parte porque se reduce la cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento y también por la generación de materiales cementantes extras para la producción de C-S-H. Esta modificación química permite la reducción del calor de hidratación sin sacrificar la resistencia del material al pasar el tiempo.

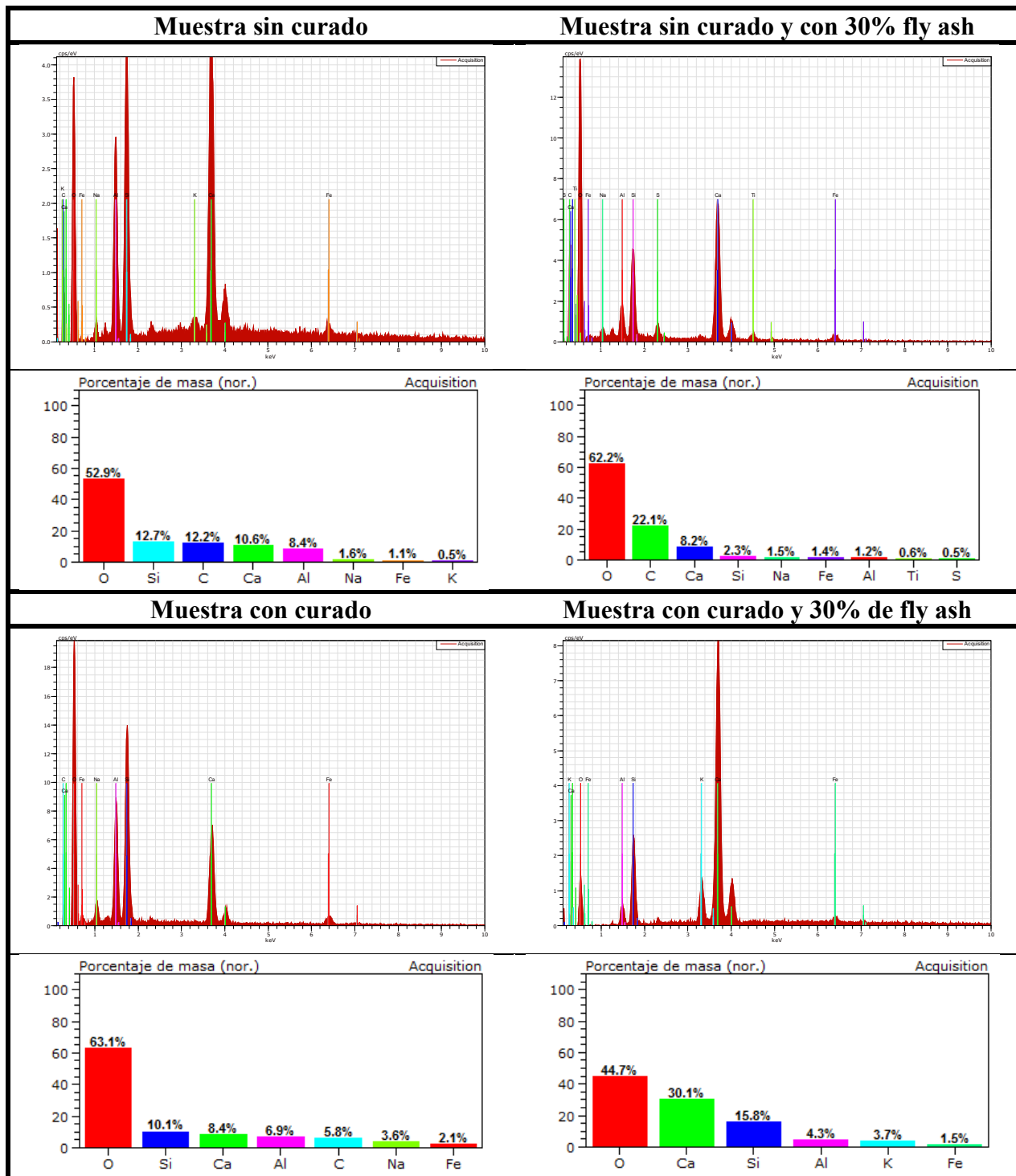


Figura 7. Análisis EDS de muestras de 350 kg/cm<sup>2</sup>.

Por otro lado, en el análisis EDS de las muestras de 150 kg/cm<sup>2</sup> (figura 8) se observa que en la muestra sin curado que hay una mayor concentración de oxígeno y calcio en porcentaje de masa. El resto de los componentes, silicio, carbono, hierro, magnesio y aluminio son menores en la muestra con curado.

Al igual que en las muestras de 350 kg/cm<sup>2</sup> las muestras a las que se les añadió fly ash desarrollan una reacción puzolánica que modifica las proporciones de cada uno de los elementos presentes como resultado de una modificación en la hidratación del cemento.

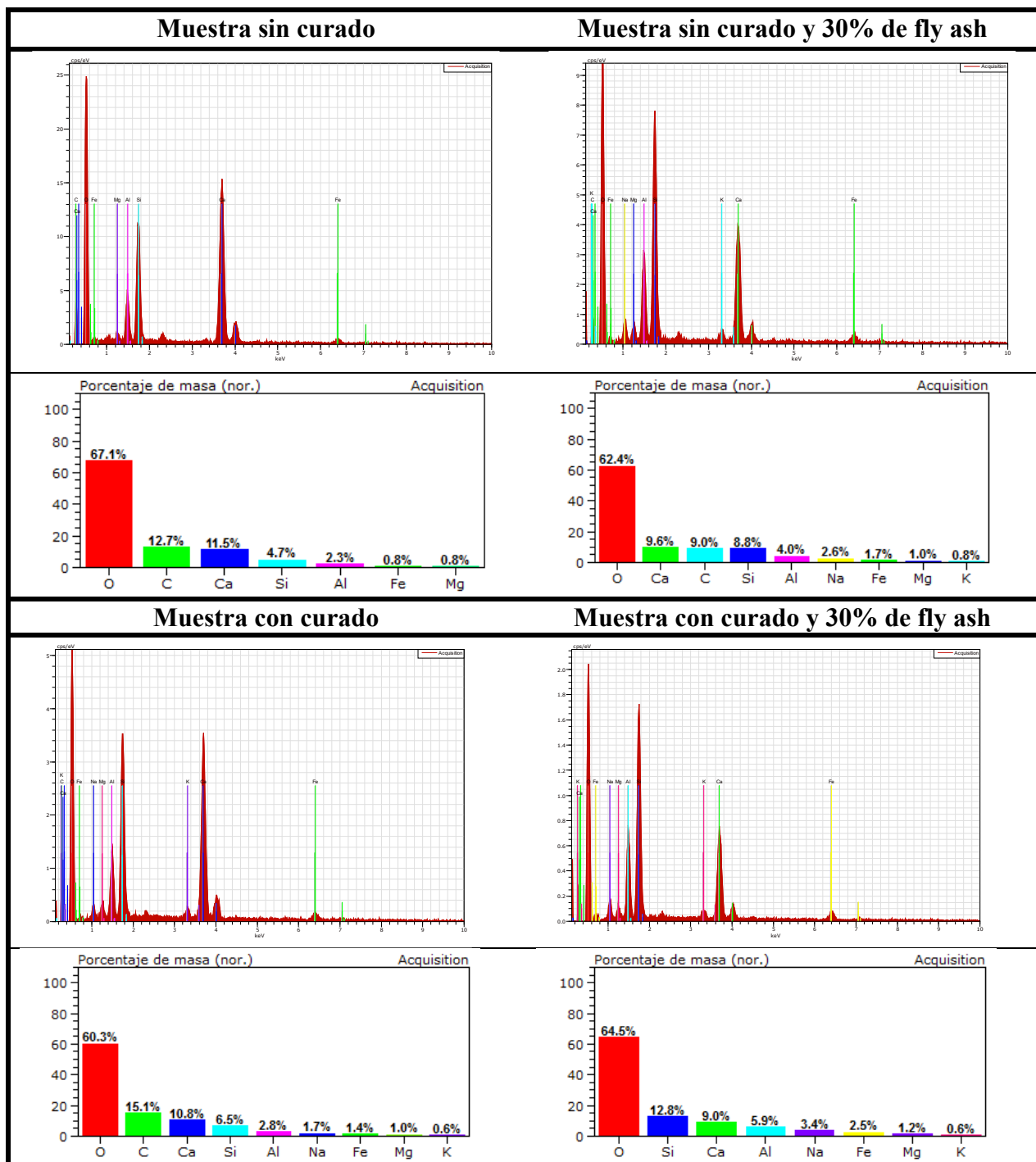


Figura 8. Análisis EDS de muestras de 150kg/cm<sup>2</sup>

#### 4. CONCLUSIONES

La transición a una economía circular es una meta esencial para mantenernos dentro de los límites mundiales establecidos. El modificar las prácticas relacionadas a la elaboración de cemento y concreto es clave para esto, debido al gran uso de estos materiales de forma global. El uso de materiales cementantes alternativos permite la reducción del uso de cemento en las mezclas de concreto, y por lo tanto una reducción en el consumo energético y de materias primas que se requieren para la producción regular de cemento y concreto.

En este trabajo se exploró la relación entre distintas proporciones de fly-ash en dos diseños de mezcla distintas de concreto y las reacciones relacionadas con el uso de fly-ash en la hidratación del cemento. Debido al CSH y al CAH producido por la reacción del hidróxido de sodio con el material puzolánico generado por la hidratación del cemento, podemos decir que hay un aumento en la densidad del material que aumenta la resistencia y la durabilidad de las muestras analizadas. La formación de la etringita se aceleró en la muestra sin contenido de fly-ash, mientras que en un porcentaje de 20%, se formó a los tres meses, cabe resaltar que las muestras principalmente dañadas por la formación de etringita son las muestras con un curado de 6 meses en una pileta de agua a una temperatura de  $24^{\circ}\text{C} \pm 2$ . Podemos concluir que el agua al reaccionar con los aluminatos de calcio y el hidróxido de sodio acelera la formación de la etringita, ya que, en las probetas sin curado, a temperatura ambiente, no hay muchos daños perceptibles.

En todas las muestras puede verse el favorecimiento en la resistencia para las mezclas en las que se incorporó fly-ash. La resistencia después de 12 meses en el diseño con curado paso de  $305.45 \text{ kg/cm}^2$  a  $385.71 \text{ kg/cm}^2$  y  $397.15 \text{ kg/cm}^2$  para la mezcla de  $f'c 150 \text{ kg/cm}^2$  con un volumen de fly-ash de 0%, 20% y 30% respectivamente. Mientras que en el diseño sin curado estos valores fueron de  $207.31 \text{ kg/cm}^2$  a  $254.89 \text{ kg/cm}^2$  y  $273.85 \text{ kg/cm}^2$ . A pesar del aumento en la resistencia, las muestras desarrollaron etringita como resultado de la invasión por sulfato de sodio (puede verse en las fracturas), esto se puede atribuir a la baja proporción de cemento.

En la mezcla con curado de  $f'c 350 \text{ kg/cm}^2$  se pasó de  $418.64 \text{ kg/cm}^2$  a aproximadamente  $454 \text{ kg/cm}^2$  en las mezclas con fly-ash después de 12 meses. Debido a la poca diferencia entre los valores de presión soportados en mezclas con volúmenes de 30 y 50% de fly-ash, no vale la pena tener que agregar 20% extra de ceniza volante por un aumento de menos de  $0.10 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia después de 12 meses en el diseño sin curado paso de  $446.01 \text{ kg/cm}^2$  a  $539.61 \text{ kg/cm}^2$  y  $535.77 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que se concluye que una adición mayor al 30% en volumen de fly-ash no solamente no es recomendado, sino que es contraproducente.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al M.I. Bruno Martínez Moreno, Especialista CITEC, Holcim México Operaciones por su apoyo durante este proyecto y a Distribuidora y Comercializadora DCC por la facilitación de los distintos materiales utilizados.

## 6. REFERENCIAS

- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). *A review on emission analysis in cement industries*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Andrew, R. M. (2018). *Global CO2 emissions from cement production*. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Camacho Bernal, J., Mahmoud Abdelkader, S., Reyes Pozo, E., Monteagudo Viera, S. (2013). *Estudio de la influencia de los medios con presencia de sulfatos en hormigones con cementos sulforresistentes y adiciones minerales: Parte 2. Hormigones expuestos a sulfato magnésico (MgSO4)*. Scielo, Revista de la Construcción (12 (3)). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2013000300004](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000300004)
- Elahi, M. M. A., Shearer, C. R., Naser Rashid Reza, A., Saha, A. K., Khan, M. N. N., Hossain, M. M., & Sarker, P. K. (2021). *Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review*. *Construction and Building Materials*, 281, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>



- Esteves, L. P. (2011). *On the hydration of water-entrained cement–silica systems: Combined SEM, XRD and thermal analysis in cement pastes*. *Thermochimica Acta*, 518(1), 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.02.003>
- Gokce, H. S., & Simsek, O. (2021). *Aggressive Environment Performance of Low Energy Cements Containing Fly Ash*. *Gazi University Journal of Science*, 34(1), 19–29. <https://doi.org/10.35378/gujs.731497>
- Golewski, G. L. (2020). *Energy Savings Associated with the Use of Fly Ash and Nanoadditives in the Cement Composition*. *Energies* (19961073), 13(9), 2184. <https://doi.org/10.3390/en13092184>
- Huaquisto Cáceres, S., Belizario Quispe, G., & Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú. (2018). *Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento*. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 255–234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- IMCYC. (2006). *Elaboración de cilindros de concreto en el campo*. Colección Concrete In Practice (3). Recuperado el 28/09/2022 de <http://www.imcyc.com/ct2006/marzo06/PROBLEMAS.pdf>
- Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2005). *Concrete: Structures, Properties and Materials* (3a ed.). McGraw-Hill.
- Marcin, M., Dvořák, K., Pašek, L., Ďuriška, I., Šebešáková, L., & Lišúch, J. (2021). *Comparison of mechanical properties of geopolymers from different raw materials with the addition of waste glass*. *Acta Montanistica Slovaca*, 26(2), 252–261. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i2.06>
- Sitarz, M., Castro-Gomes, J., & Hager, I. (2022). *Strength and Microstructure Characteristics of Blended Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag Geopolymer Mortars with Na and K Silicate Solution*. *Materials* (1996-1944), 15(1), 211. <https://doi.org/10.3390/ma15010211>
- Sosoi, G., Abid, C., Barbuta, M., Burlacu, A., Balan, M. C., Branoaea, M., Vizitiu, R. S., & Rigollet, F. (2022). *Experimental Investigation on Mechanical and Thermal Properties of Concrete Using Waste Materials as an Aggregate Substitution*. *Materials* (1996-1944), 15(5), 1728. <https://doi.org/10.3390/ma15051728>

xvi

PATROCINADO POR:

**GRAFENO**



**HOLCIM**



**PLATINO**



**ORO**



**PLATA**



**SCT**

SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES

**BRONCE**



**UADY**  
UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DE YUCATÁN



**Anáhuac**  
Mayab



**Universidad  
Marista**  
MÉRIDA



xvii



**Colegio de Ingenieros  
Civiles de Yucatán A.C.**

Desde 1953



AUSPICIADO POR:

