



Presentación



MEMORIAS
DEL
VII CONGRESO
NACIONAL ALCONPAT
MÉXICO

PACHUCA DE SOTO, HGO DEL 6 AL 9
DE NOVIEMBRE DEL 2016



Comité Organizador

Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Presidente del VII Congreso ALCONPAT México

Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

olguinc@uaeh.edu.mx jolguin77@gmail.com Tel. 771 717 2000 Ext. 2501, 2502, 4001

Dr. Luis Daimir López León

Vicepresidente del VII Congreso ALCONPAT México

Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

wisdaimir@gmail.com Tel. 771 717 2000 Ext. 2501, 4001

Mtro. Sergio Blas Ramírez Reyna

Secretario del VII Congreso ALCONPAT México

Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Tel. 771 717 2000 Ext. 4005

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Comité Organizador VII Congreso ALCONPAT México

Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

lililga.lm@gmail.com Tel. 771 717 2000 Ext. 2501, 4001

Maricela González Arenas

Auxiliar Técnico - Administrativo del VII Congreso ALCONPAT México

Alumno del Programa Educativo Licenciatura en Ingeniería Civil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

mriceaingcivil@gmail.com Tel. 771 717 2000 Ext. 2501

Pérez Hernández Brandon Rubén

Auxiliar Técnico - Administrativo del VII Congreso ALCONPAT México

Alumno del Programa Educativo Licenciatura en Ingeniería Civil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

ruben80ph@hotmail.com Tel. 771 717 2000 Ext. 2501, 2502

García Licon Tadea Betzayra

Auxiliar Técnico - Administrativo del VII Congreso ALCONPAT México

Alumno del Programa Educativo Licenciatura en Ingeniería Civil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

likinret@gmail.com ga263856@uaeh.edu.mx Tel. 771 717 2000 Ext. 2501, 2502

Comité Científico

Dr. Alejandro Durán Herrera
alejandro.duranhr@uanl.edu.mx

Dr. César Juárez Alvarado
cesar.juarezal@uanl.edu.mx

Dra. Citlali Gaona Tiburcio
citlali.gaonatbr@uanl.edu.mx

Dra. Elía Mercedes Alonso Guzmán
eliamercedesalonso@gmail.com

Dr. Erick Maldonado Bandala
erimaldonado@uv.mx

Dr. Fabian Ruvalcaba Ayala
fruvalcaba@hotmail.com

Dr. Facundo Almeraya Calderón
facundo.almerayacl@uanl.edu

Dr. Francisco Javier Olguín Coca
olguinc@uaeh.edu.mx

Dr. Francisco Javier Soria López
fjsl_62@hotmail.com

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx

Dr. Javier González López
rhodio@hotmail.com

Dr. José Iván Escalante García
ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
jmmr.rangel@gmail.com

Dr. Luis Daimir López León
wisdaimir@gmail.com

Dr. Miguel Ángel Baltazar Zamora
miguelbz_75@yahoo.com

Dr. Oswaldo Burciaga Díaz
oswaldo.burciaga@gmail.com

Dr. Pedro Montes García
pmontes@ipn.mx

Dr. Pedro Valdez Tamez
pedro.valdeztz@uanl.edu.mx

Dr. Ricardo Magallanes Rivera
ricardo.magallanesrv@uanl.edu.mx

Dr. Ricardo Orozco Cruz
rorozco@uv.mx

Dr. Tezozomoc Pérez López
tezperez@uacam.mx

Objetivo

Promover la integración profesional de estudiantes, académicos, investigadores y profesionistas relacionados con el estudio, investigación y práctica profesional del Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (empresas, Universidades, centros de investigación, asociaciones civiles, etc.) y áreas afines; impulsando un amplio intercambio técnico, científico y humano en la búsqueda de un mayor perfeccionamiento profesional que beneficie el desarrollo de las comunidades a los que sus integrantes pertenecen.

Durante el Congreso se promueve la difusión y el conocimiento de los estudios, trabajos e investigaciones de los asistentes mediante ponencias magistrales, mesas de discusión y exposiciones de trabajos de investigación de cada una de las disciplinas asociadas a las diferentes temáticas del Congreso.

Adicionalmente, se constituye en un foro en donde se fomentan los contactos personales y el intercambio de ideas y conocimiento y con ello la mutua colaboración y el avance científico en el área de interés.

ALCONPAT México es una asociación de profesionales dedicados a la industria de la construcción en todas sus áreas que conjuntamente coadyuvan a resolver problemas que se presentan en las estructuras desde la planeación, diseño y proyecto hasta la ejecución, construcción, mantenimiento y reparación de las mismas, promoviendo la actualización profesional y la educación como herramientas fundamentales para salvaguardar la calidad e integridad del servicio de sus profesionales.

Misión

Desde su creación ALCONPAT México ha mantenido de manera constante la organización de un Congreso Nacional cada dos años, de manera permanente e itinerante. Las cuatro últimas sedes han sido Chihuahua (2008), Xalapa (2010), Los Mochis (2012), Nuevo León (2014). Siendo una convocatoria de índole Nacional, se cuenta con expositores de reconocido prestigio Nacional e Internacionalmente, quienes son líderes en los diferentes campos del conocimiento del Congreso. Esto permite la atracción de diversos especialistas, en particular estudiantes de posgrado, nacionales y extranjeros.

Visión

Ser la Asociación de especialistas en control de calidad y patología de la industria de la construcción con mayor representatividad gremial y prestigio profesional reconocido internacionalmente, buscando siempre el beneficio social y el aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y económicos para la construcción de estructuras sustentables y amigables con el medio ambiente.

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo les da la bienvenida al VII congreso ALCONPAT México llevándose a cabo del 6 al 9 de noviembre del 2016, con el objetivo de tener un foro para investigadores científicos, académicos, estudiantes y profesionistas, con el fin de presentar los avances realizados en el área de la Patología, reconstrucción, materiales, ensayos no destructivos y Semi destructivos y diferentes ramas que engloban a la asociación ALCONPAT

Sean bienvenidos al VII congreso Nacional ALCONPAT México

Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland en la compactación y resistencia a la compresión de un material tipo subrasante.

O. Ojeda¹, J. Mendoza², M. Baltazar Zamora³, R. Villegas⁴

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N.L, México.

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N.L, México.

³Facultad de Ingeniería Civil – Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

⁴Ingenio Mahuixtlán S.A de C.V, Mahuixtlán Municipio de Coatepec, Veracruz, México.

Palabras clave: resistencia a la compresión, bagazo de caña, Subrasante

Autor de contacto: Omar. F. Ojeda Farías (omar_2355@hotmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

En obras de vías terrestres el suelo es considerado el material de construcción más abundante en el mundo siendo un recurso indispensable para la integración de estructuras terreas (Lambe & Whitman, 1999). Dicho material debe cumplir con especificaciones normalizadas y poder ser utilizado en la construcción; Si un suelo no cumple dichas especificaciones se recurren a métodos de estabilización identificando la propiedad a mejorar. Uno de los métodos más comunes utilizado por los ingenieros civiles es el de adicionar agentes químicos a los materiales térreos y mejorar sus características de resistencia y estabilidad, disminuyendo costos y siendo amigables con el medio ambiente, en especial si se adicionan residuos de desecho como agentes estabilizantes (Rodríguez, Rondón, Vélez & Aguirre ,2006). Diversas investigaciones evalúan agentes químicos para estabilizar suelos, la cal es uno de los agentes que en porcentajes de adición bajos disminuye la plasticidad (Venkatarama & Prasanna, 2011; Moaved, Haratian & Izadi, 2011) y el cemento portland empleado para incrementar la resistencia y capacidad portante en suelos granulares (Chen & Wanget, 2005). Se han empleado también productos asfálticos, cloruro de sodio y de calcio y materiales alternativos al cemento portland como la escoria de fundición o de alto horno principalmente en carpetas asfálticas y la ceniza volante en combinación con el cemento portland y la cal, (Dermatas & Meng, 2003; Lav, A., Lav, M. & Goktepe, 2005) además de adiciones poliméricas que permiten incrementar la impermeabilidad, resistencia y vida útil de un pavimento (Liu et al., 2010) El cemento portland (CP) es uno de los agentes más utilizados en la construcción cuya producción se encuentra por arriba de las seis billones de toneladas por año (FICEM, 2013) y cuyo proceso demanda altos requerimientos energéticos y genera altas emisiones de gases contaminantes (Escalante, 2002). Por otro lado el crecimiento de la producción agrícola genera residuos que elevan los costos de manejo y son causantes de efectos negativos medioambientales al no contarse con un plan de tratamiento y disposición final (Behak & Peres, 2008), uno de estos residuos es el bagazo de la caña de azúcar, estimándose más de 15, 000 toneladas por zafra (CONADESUCA, 2014). Dicho producto al combustionar en las calderas de los ingenios se transforma en un subproducto denominado ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) demostrándose en diversas investigaciones su elevado contenido de óxidos de sílice (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3) que lo hace un material con posible efecto puzolánico al combinarse con el hidróxido de calcio liberado por el cemento y mejorando determinadas propiedades en concretos y suelos (Martirena et al., 2000; Chusilp, Jaturapitakkul, & Kiattikomol, 2009; Chagas, 2009; Moraes, 2015). En este trabajo se analiza la influencia de la CBCA como un sustituto parcial del CP, evaluando las propiedades de compactación y resistencia a la compresión de un suelo empleado en pavimentos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales empleados en esta investigación fueron suelo limo arenoso, ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y cemento portland CPC 30R. El suelo fue muestreado en un banco de material de la región de Xalapa, Ver., obteniéndose sus propiedades índices tales como límites de consistencia, análisis granulométrico, humedad natural entre otros, considerándolo como material a ser empleado en capa subrasante. La CBCA fue muestreada del ingenio azucarero ubicado en la región de Mahuixtlan, Ver. México, a la cual se le efectuó una molienda a 1500 rpm por un periodo de una hora y recuperando el material pasante de la malla No 200 (0.075mm). Su

composición química y propiedades de la CBCA han sido obtenidos mediante fluorescencia de rayos X (FRX), además se realizaron estudios mineralógicos mediante difracción de rayos X (DRX) en busca de fases cristalinas y análisis morfológicos con ayuda de la microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre la ceniza molida. Se efectuaron ensayos de compactación y resistencia a la compresión en mezclas estabilizadas con porcentajes de 3%, 5% y 7% de cemento con respecto al suelo seco, elaborándose mezclas de control y sustituciones parciales de cemento por ceniza en porcentajes de 25%, 50% y 100 %. Las mezclas de suelo con cemento y CBCA se han llevado a cabo en seco homogenizando con la mano, posteriormente se incorporó el agua gradualmente con el fin de distribuirla en toda la superficie, dejando reposar un tiempo de 5 min después del mezclado y con esto permitir la absorción del agua. En los ensayos de compactación fueron determinados el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima de compactación para cada mezcla, siendo los parámetros importantes en el control de calidad en estructuras terreas, lo anterior se llevó a cabo siguiendo el procedimiento ASTM D 558. En los ensayos de resistencia a la compresión primero se fabricaron especímenes de suelo-cemento de 101.16 mm de diámetro y 116.40 mm de altura a un grado de compactación del 100%, efectuando un proceso de curado de 7 días, como lo establece el procedimiento ASTM D 559. Para el ensayo a compresión se saturaron los especímenes durante 5 horas esto para lograr su estado más crítico, posteriormente se ensayaron en una prensa de compresión a velocidad de 140 kPa/s llevándolos a la falla y registrando la carga, como lo describe el procedimiento ASTM D 1633.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran las propiedades índice y resistencia del suelo empleado en esta investigación. El suelo es clasificado como arena limosa con finos no plástico (SM) de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), de acuerdo con los resultados se observa un material con nula plasticidad y mayor predominio de arena. Por otro lado, el valor relativo de soporte de 24.5% indica un material adecuado para ser empleado en capa subrasante.

Tabla 1. Propiedades índice y de resistencia del suelo en estudio

Propiedades	Resultados
Humedad natural (%)	22.38
Pasa la malla 3" (%)	100
Pasa la malla No 4 (%)	89.50
Pasa la malla No 200 (%)	20.70
Límite líquido (%)	31.2
Límite plástico (%)	N/P
Índice plástico (%)	N/P
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1311
Humedad óptima (%)	21.7
Gravedad específica	2.67
Valor relativo de soporte (%)	24.5
Expansión (%)	0.00

Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland en la compactación y resistencia a la compresión de un material tipo subrasante.

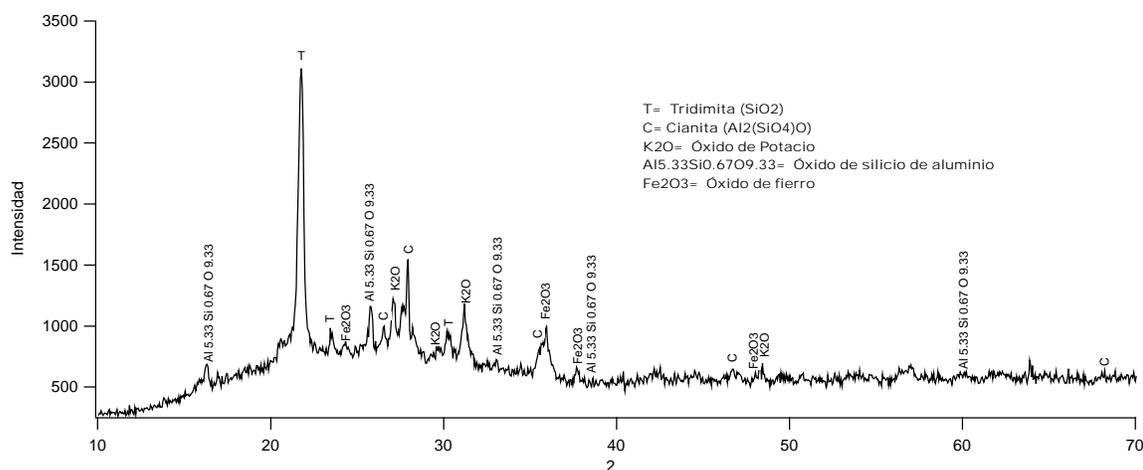


Figura 1. Patrón de DRX de la CBCA en estudio.

La Tabla 2 muestra la composición química de la CBCA, se observa que la suma de los óxidos principales $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es de 73.069 %, valor que está por arriba del 70% que establece la norma ASTM C 618 para puzolanas clase N y F. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por diversos autores que han reportado composiciones químicas en diversas cenizas de bagazo de caña de azúcar (Singh, N., Singh, V. & Rai, 2000; Ganesan, Rajagopal & Thangavel, 2007; Cordeiro, Toledo, Tavares & Fairbairn, 2008).

La Figura 1 muestra los resultados de difracción de rayos X obtenido de la CBCA, el difractograma sugiere material amorfo en el halo localizado en la región 2 θ de 10-40°; Otros autores han localizado el material vítreo en una zona similar (Arenas, 2016; Cordeiro, Toledo & Fairbairn, 2009; Torres, Gaitán, Espinoza & Escalante, 2014).

Los componentes cristalinos principales encontrados fueron: Tridimita el cuál es un polimorfo del SiO_2 cristalizado en el sistema monoclinico; Cianita $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$, mineral de la familia de los silicatos; Óxido de potasio K_2O ; Óxido de silicio de aluminio $\text{Al}_{5.33}\text{Si}_{0.67}\text{O}_{9.33}$ y Óxido de fierro Fe_2O_3 .

Tabla 2. Composición química de la CBCA

Componente	Concentración
SiO_2	62.667
Al_2O_3	5.208
Fe_2O_3	5.194
TiO_2	0.647
CaO	4.875
MgO	2.194
SO_3	0.309
K_2O	13.93
Na_2O	0.569
P_2O_5	3.361

La fotomicrografía de la CBCA en estudio es mostrada en la Figura 2, se aprecia su morfología irregular con partículas angulosas y una estructura porosa que también ha sido reportada por otros autores (Frías, Villar & Savastano, 2011).

Los resultados de compactación se muestran en la Figura 3, en ella se presenta la relación existente entre el peso volumétrico seco máximo y el porcentaje de CP adicionado como estabilizante y las sustituciones parciales de CP por CBCA. Se puede observar que en las mezclas patrón las cuales contienen únicamente CP los pesos volumétricos no variaron significativamente, lo cual indica que el CP no ejerce efectos físico-químicos durante el proceso de compactación, permitiendo la misma liberación de aire y agua que el suelo natural sin adiciones. Por otro lado, en las sustituciones de 25% y 100% de CP por CBCA se observó una mejora en la densificación del material ya que se ven incrementados los valores de peso volumétrico. Esto puede ser atribuido al arreglo granulométrico que se dio al incorporar partículas de CBCA a la matriz del suelo, llenando los vacíos entre partículas de suelo que no pueden ser eliminados con la energía de compactación inducida, generándose un efecto de filler de la CBCA sobre el suelo estabilizado. También se observó que en sustituciones de 50% no hubo incrementos en los pesos volumétricos con más de 3% de adiciones, por el contrario, estos disminuyeron hasta en un 4%, dicho efecto puede ser el resultado del exceso de partículas en la matriz de suelo, que ocasionan inadecuada distribución de esfuerzos de compactación sobre el material y ejerciendo un efecto de rebote del pisón compactador durante la inducción de energía mecánica.

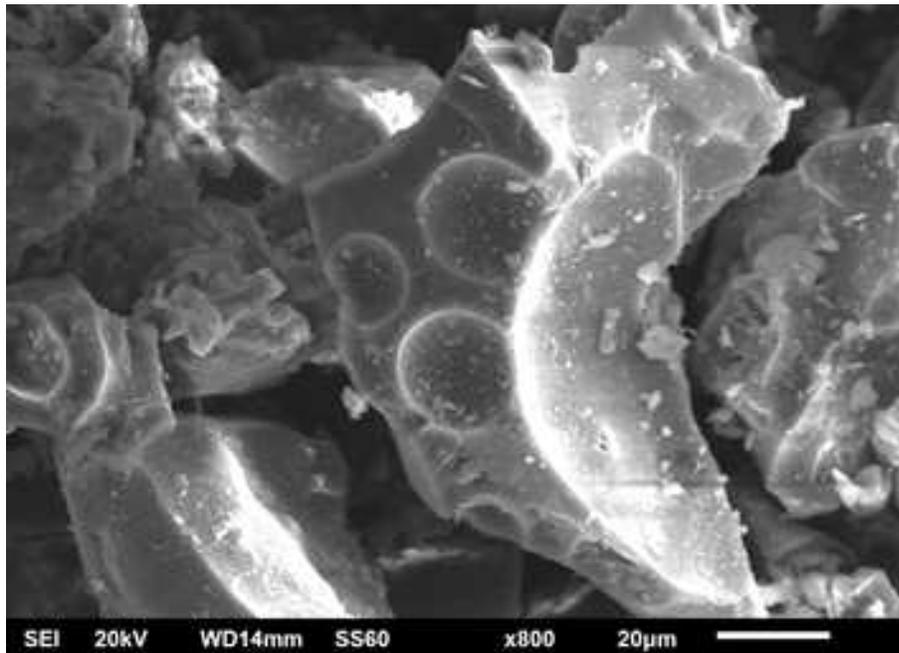


Figura 2. Microfotografía de la CBCA.

En la figura 4 se muestran los resultados correspondientes a las humedades óptimas de compactación. En el caso de las mezclas de control con adición de CP hubo disminuciones en la humedad en uno por ciento, esto debido a la absorción del agua por el cemento durante el tiempo. Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland en la compactación y resistencia a la compresión de un material tipo subrasante.

de ejecución de la prueba. En las sustituciones parciales de CP por CBCA se aprecian notables incrementos en la humedad de compactación, demandando más agua al incorporar la ceniza debido su absorción, incrementándose hasta en un 2% en las mezclas con 50% de sustitución. Cabe mencionar que las mezclas con 100% de sustitución no tuvieron variaciones importantes en la humedad observándose que la CBCA por sí sola no demanda mucha agua para su adecuado mezclado con el suelo caso contrario a las mezclas con CP. En la Figura 5 se muestran los resultados de resistencia a compresión simple de los especímenes suelo cemento a edades de 7 días. En las mezclas de control, como se esperaba, se observa el incremento de la resistencia a medida que se incorpora mayor cantidad de CP al suelo; Por otro parte al sustituir 25% de CP por CBCA no aparecen pérdidas de resistencia, encontrándose valores muy similares a los de la mezcla patrón, atribuyéndose dicho comportamiento a un mejor acomodo de partículas dentro de la masa de suelo y un posible efecto puzolánico de la CBCA con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. En cuanto a sustituciones de 50% no se observaron mejoras en la resistencia quedando los valores por debajo de las mezclas patrón. Por otro lado, las mezclas que no contenían CP y a las cuales se les añadió únicamente CBCA, no mostraron resistencia alguna, corroborando que la CBCA por sí sola no tiene propiedades cementantes que pudieran influir en el suelo.

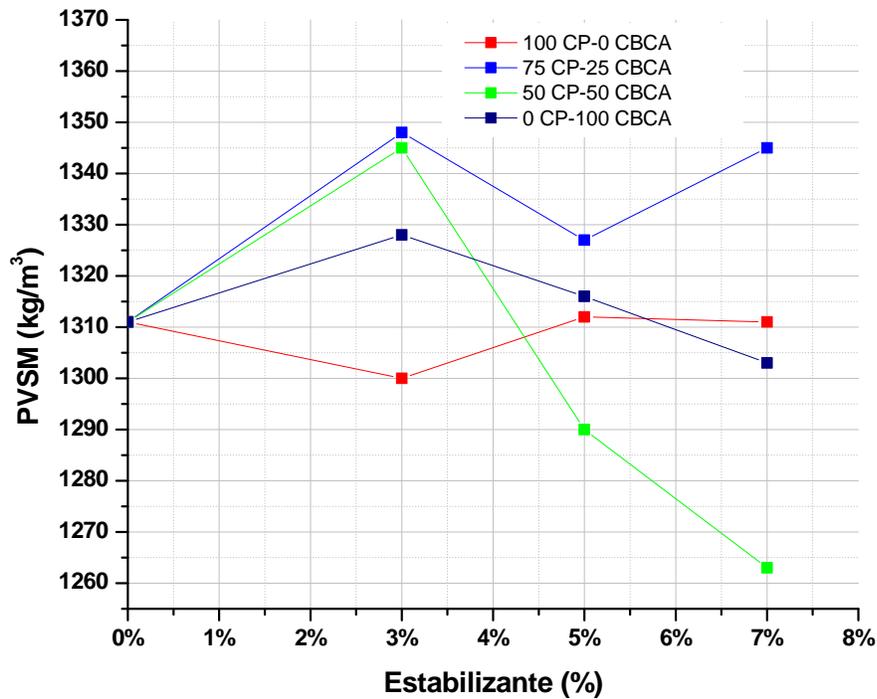


Figura 3. Relación del peso volumétrico seco máximo y el porcentaje de estabilizante empleado con sus diversas sustituciones parciales.

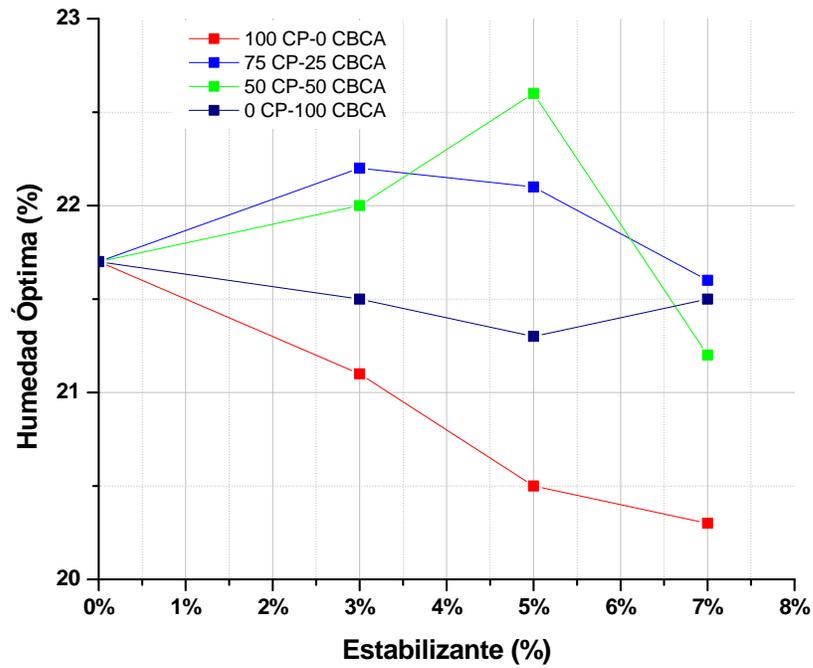
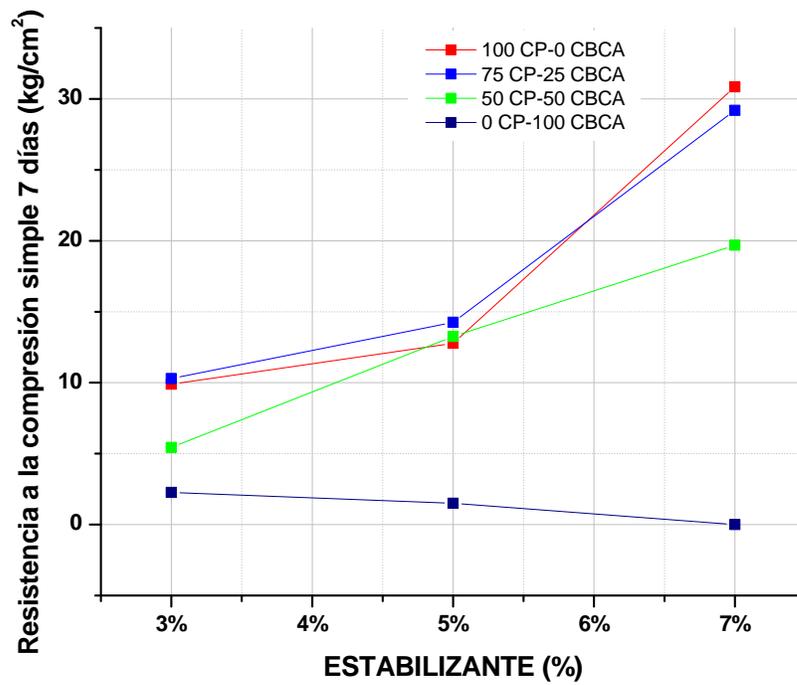


Figura 4. Relación de la humedad óptima y el porcentaje de estabilizante empleado con sus diversas sustituciones parciales.



Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland en la compactación y resistencia a la compresión de un material tipo subrasante.

Figura 5. Relación de la Resistencia a la compresión simple a 7 días y el porcentaje de sustitución empleado con sus diversas sustituciones parciales.

4. CONCLUSIONES

El 25% de sustitución parcial de CP por CBCA mostró el mejor desempeño tanto en las características de compactación como en la resistencia a la compresión simple, estableciéndose como porcentaje óptimo de sustitución parcial.

La CBCA empleada en esta investigación puede ser clasificada como material puzolánico debido a su contenido de óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) por arriba del 70% y la apreciable cantidad de material amorfo ubicado en el halo del difractograma.

Las mejoras en la compactación del suelo son principalmente atribuidas al efecto filler de la CBCA dentro de la masa de suelo, llenando los vacíos existentes entre partículas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONACYT por la beca doctoral otorgada y el proyecto de ciencia básica No 155363.

6. REFERENCIAS

- 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, V. 105, pp. 68-81.
- Behak L., Peres Núñez W., (2008), “*Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación*”, Ingeniería de Construcción, V. 1, No. 23, pp. 34-41.
- Chagas Cordeiro G., Toledo Filho R. D., Tavares, L. M., & Rego Fairbairn, E.M., (2009), “*Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete*”, Cement and concrete research, V. 39, pp. 110-115.
- Chen H. & Wanget Q., (2005), “*The behavior of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement*”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, V. 4, No. 65, pp. 114-120.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. & Kiattikomol, K., (2009), “*Utilization of bagasse ash a pozzolanic material in concrete*”, Construction and Building Materials. V. 23, pp. 3352-3358.
- CONADESUCA (2014). Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar, zafras 2007/08-2013/14, (México, D.F: SAGARPA).
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L.M., & Fairbairn, E.M.R., (2008), “*Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*”, Cement and Concrete Composites, V. 30, pp. 401-418.

- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M.R., (2009), “*Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash*”, Construction and Building Materials, V. 23, pp. 3301-3303.
- Dermatas D. & Meng X., (2003), “*Utilization of Fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soil*”, Engineering Geology, V. 1, No. 70, pp. 377-394.
- Escalante García J. I., (2002), “*Materiales alternativos al cemento portland*”, Avance y perspectiva, V. 1, No. 21, pp. 79-88.
- Federación Interamericana del Cemento (FICEM), (2013), “*Informe estadístico 2013*”.
- Frías, M. Villar, E., Savastano, H., (2011), “*Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture*”, Cement and concrete composites, V. 33, pp. 490-496.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., (2007), “*Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*”, Cement and concrete composites, V. 29, pp. 515-524.
- Lambe T. W. & Whitman R. V., (1999), “*Capítulo I*”, Mecánica de Suelos, (México: Limusa).
- Lav, A. Lav, M. & Goktepe A., (2005), “*Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material*”, Special Issue, the 2005 World of Coal ash conference, Fuel, V. 16, No. 85, pp. 2359-2370.
- Liu, J., Shia, B., Jian, H., Huag, H., Wang G. & Kamai, T., (2010), “*Research on the stabilization treatment of clay slop topsoil by organic polymer soil stabilizer*”, Engineering Geology, V. 1, No. 117, pp. 114-120.
- Martirena Hernández, J. F., Betancourt Rodríguez, S. Middendorf, B., Rubio, A., Martínez Fernández, L., Machado López, I., González López, R., (2000), “*Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primera parte)*, Materiales de Construcción, V. 50, No. 260, pp. 71-78.
- Moaved, R., Haratian, M. & Izadi, E., (2011), “*Improvement of volume change characteristics of saline clays soil*”, Journal of Applied Sciences, V. 1, nNo 11, pp. 76-85.
- Moraes, J.C.B, Akasaki, J. L., Melges, J.L.P, Monzó, J., Borrachero, M.V., Soriano, L., Payá, J. & Tashima, M.M., (2015), “*Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*”, Construction and Building Materials, V. 94, pp. 670-677.
- Rodríguez Rincón E., Rondón Quintana H. A., Vélez Pinzón D. M. & Aguirre Aguirre L. C., (2006), “*Influencia de la inclusión de desecho de PVC sobre el CBR de un material granular tipo Sub base*”, Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, V. 5, No. 9, pp. 21-30.
- Singh, N. B., Singh V.D., Rai, Sarita, (2000), “*Hydration of bagasse ash-blended Portland cement*”, Cement and Concrete Research, V. 20, pp. 1485-1488.
- Tórres Rivas, B. J., Gaitán Arévalo J. R., Espinoza Pérez, L. J., Escalante García, J. I., (2014), “*Valoración de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland*”, Nexo revista científica, V. 27, No. 02, pp. 82-89.
- Venkatarama B. V. & Prasanna P., (2011), “*Cement stabilized rammed earth. Part A: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilized soils*”, Materials and Structures, V. 6, No. 44, pp. 681-693.

Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland en la compactación y resistencia a la compresión de un material tipo subrasante.

Estudio electroquímico del acero de refuerzo embebido en morteros con fibra de coco.

F. Estupiñán L.¹, C. Gaona T.¹, J. Cabral M.¹, P. Zambrano R.¹, M.A. Baltazar², F. J. Olguin³, F. Almeraya C.¹.

¹Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, FIME, UANL, Nuevo León, México.

²Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, México.

³Grupo de Investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, UAEMH, Pachuca, México.

RESUMEN

El deterioro de estructuras de concreto reforzado a causa de la corrosión es una de las principales preocupaciones en las construcciones a nivel mundial, no sólo económicamente sino también por cuestiones de seguridad. Se elaboraron ocho especímenes cúbicos de mortero utilizando CPO (Cemento Portland Ordinario), una relación agua/cemento de 0.60 y cascarilla de coco en diferentes porcentajes (0%, 1%, 2% y 3%); se realizaron la medición de potenciales de corrosión y medición de la velocidad de corrosión mediante la técnica de LPR. Se encontró que los especímenes de coco proveen una ventaja en resistencia a la corrosión en comparación a los especímenes que no se adiciona dicha fibra. Esta protección incrementa conforme se incrementa el porcentaje de fibra.

Autor de contacto: Francisco Estupiñán L. (festupinan.ciiaa@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

La norma NACE/ASTM G193 – 12b define el proceso de corrosión como el deterioro de un material, usualmente un metal, que resulta de la reacción química o electroquímica con su medio ambiente. La corrosión del acero de refuerzo produce el deterioro severo del acero y del hormigón mismo. Cuando los productos de corrosión alcanzan el hormigón, se producen delaminaciones en el hormigón y se reduce la habilidad de la estructura para transferir las cargas. A la vez, se pierde la protección que el hormigón le provee al acero. En ambas situaciones, los resultados pueden comprometer la seguridad de la estructura.

La corrosión de los refuerzos metálicos inmersos en estructura de concreto consiste en la oxidación destructiva del acero por el medio que lo rodea, especialmente por contaminantes como el cloro, el CO_2 y los sulfatos, entre otros.

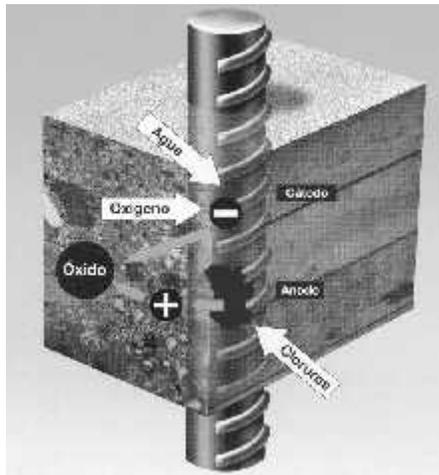


Figura 1. Corrosión del refuerzo metálico en el concreto.

Por muchos años, la reparación de esta clase de deterioro consistía simplemente en el reemplazo del hormigón perdido. Esta clase de reparación solamente proveía un remedio temporal pues no controlaba la actividad corrosiva existente. A un pH de 13.5, la interacción entre el acero y los iones de hidróxidos de la solución presente en los poros del concreto, produce la formación de una capa de óxido férrico (Fe_2O_3) sobre el acero pasivándolo. Los iones cloruro pueden entrar en el concreto durante el mezclado, o después del curado, de fuentes externas como el agua de mar y sales de deshielo. Una vez que los iones cloruro alcanzan al acero, tienden a romper la capa protectora. El tiempo que toman los iones cloruro para alcanzar el acero de refuerzo depende del mecanismo de intrusión, la concentración externa de los cloruros y la microestructura del concreto.

Desde la década de los '60 se ha experimentado con los concretos reforzados con fibra, que empleaban fibra de acero, fibra de vidrio, polipropileno y algunas otras fibras sintéticas. Sin embargo, debido a los altos costos y abastecimiento limitado de dichas fibras, a estos, se les puede considerar generalmente inapropiados para países en desarrollo.

Dependiendo de los recursos disponibles en diferentes lugares, se ha probado un amplio rango de fibras naturales. Estas esencialmente son fibras orgánicas, ya que el único ejemplo práctico de fibra inorgánica natural es el asbesto. Las fibras orgánicas son de origen vegetal (a base de celulosa) o de origen animal (a base de proteínas). Las fibras vegetales pueden dividirse en cuatro grupos:

Fibras de líber o tronco (ejemplo: yute, lino, cáñamo).

Fibras de hojas (ejemplo: sisal, henequén, abacá).

Fibras de pelusas de frutas (estopa de coco).

Fibras de madera (ejemplo: bambú, juncos, bagazo).

Se le atribuyen dos fines importantes: disminuir el peso de las estructuras, y proporcionar un grado aceptable de resistencia. Las fibras de coco específicamente pueden clasificarse en 3 tipos: una más larga y fina (fibra de esteras o hilo); una más tosca (fibra de cerda), y una fibra más corta (fibra para colchones).

Estudios anteriores muestran que los concretos con reforzamiento mediante fibras de coco mejoran la tenacidad de la matriz.

Por lo anterior, el objetivo del trabajo es evaluar morteros con adiciones a diferentes porcentajes de cascarilla de coco y evaluar su efecto frente a la corrosión mediante técnicas electroquímicas.

2. METODOLOGÍA

Los especímenes se elaboraron de acuerdo a la norma ASTM C305-07. Se elaboraron ocho especímenes cúbicos de mortero utilizando CPO (Cemento Portland Ordinario), una relación agua/cemento de 0.60 y cascarilla de coco en diferentes porcentajes (0%, 1%, 2% y 3%) (Figura 2). En los especímenes de mortero se embebieron segmentos de alambroón con el objetivo de simular la varilla, de los cuales quedaron expuestos 2cm entre cintas de teflón que obstruían la capilaridad. Los especímenes se curaron durante 4 días mediante el método de inmersión en agua.



Figura 2. Mezcla de los componentes del mortero.

Posterior al curado, los especímenes fueron expuestos en agua corriente y solución de NaCl al 3.5% preparado in situ. Para determinar el mecanismo y la velocidad de corrosión, a cada uno de los especímenes se le realizaron técnicas electroquímicas, tanto cinéticas como termodinámicas. Diariamente se evaluaron los potenciales de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C876 con un volmetro de alta impedancia y un electrodo de referencia (Cu/CuSO₄). Se realizaron la prueba electroquímica de LPR (Linear Polarization Resistance) (ASTM G 59) con un potencióstato/galvanostato de la marca VERSAstat.

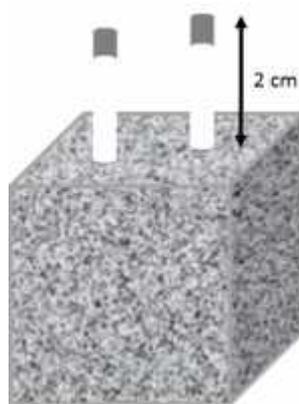


Figura 3. Representación de los especímenes de prueba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la figura 4, se aprecian los especímenes de mortero con adiciones de fibra de coco durante el desmoldeo.



Figura 4. Desmoldeo de los especímenes de mortero con fibras de coco.

La medición de los potenciales de corrosión, la cual es una técnica probabilística, se puede apreciar en la figura 5.



Figura 5. Medición de potenciales de corrosión en los especímenes de mortero.

En la tabla 1, se presentan los criterios para la determinación de la probabilidad de corrosión en base al potencial de corrosión.

Tabla 1. Criterios de evaluación para potencial de corrosión.

Potencial E_{corr} (mV)	Riesgo de daño
<-200	10% de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
>-350	90% de probabilidad de corrosión

En las figuras 6 y 7, se presentan los gráficos de las mediciones de potenciales de corrosión en la solución de agua y de cloruro de sodio al 3.5% respectivamente.

Se observa que con la cascarilla de coco al 1% y 2% en morteros sumergidos en H₂O se presenta cierta incertidumbre de la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo utilizado, mientras que en los morteros sumergidos en NaCl al 3.5% fue el uso del 3% de cascarilla de coco el que resultó más favorable respecto a los otros porcentajes.

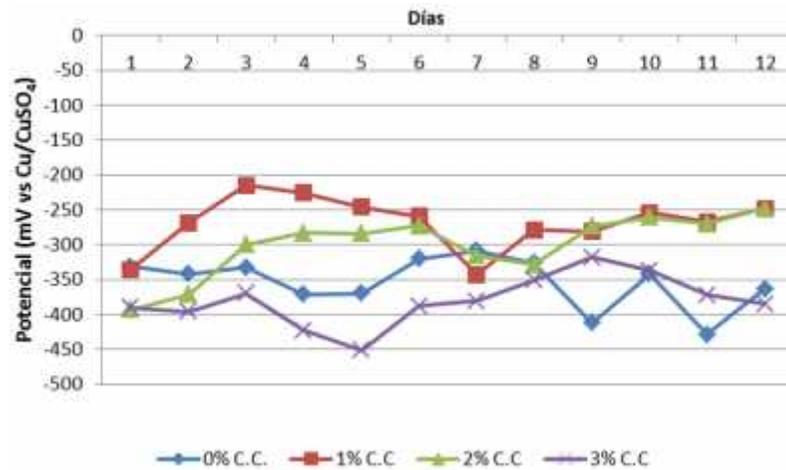


Figura 6. Potenciales de corrosión de morteros en H₂O.

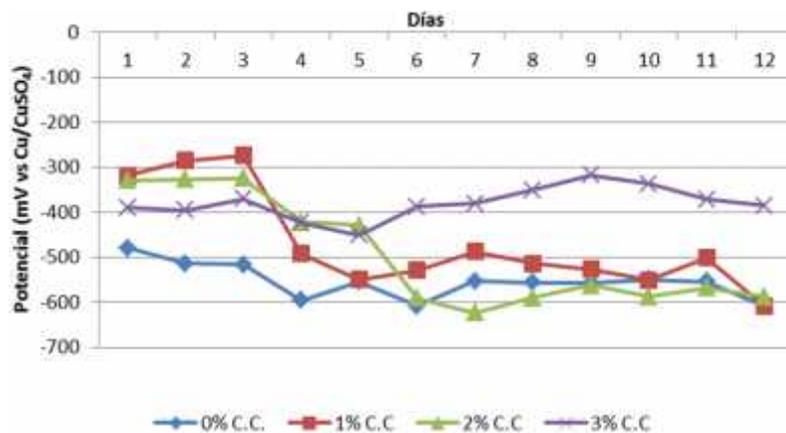


Figura 7. Potenciales de corrosión de morteros en NaCl al 3.5%.

De acuerdo a las pruebas de LPR (Linear Polarization Resistance) en las figuras 8 y 9, se observa que en los morteros sumergidos en H₂O, aquellos cuyo porcentaje de coco es 2% son los que presentarían menor velocidad de corrosión. En cambio, de los morteros en NaCl son los que contienen 3% de coco los que presentarían menor tendencia a la corrosión, aunque también es de considerar que los morteros cuyo porcentaje de coco fue de 1% muestran un decremento.

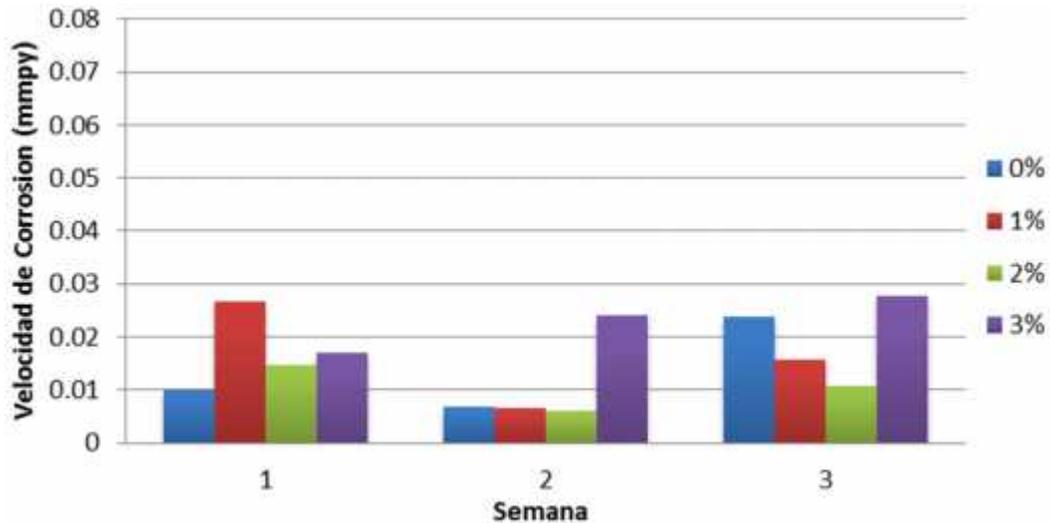


Figura 8. Velocidad de corrosión de morteros en H₂O.

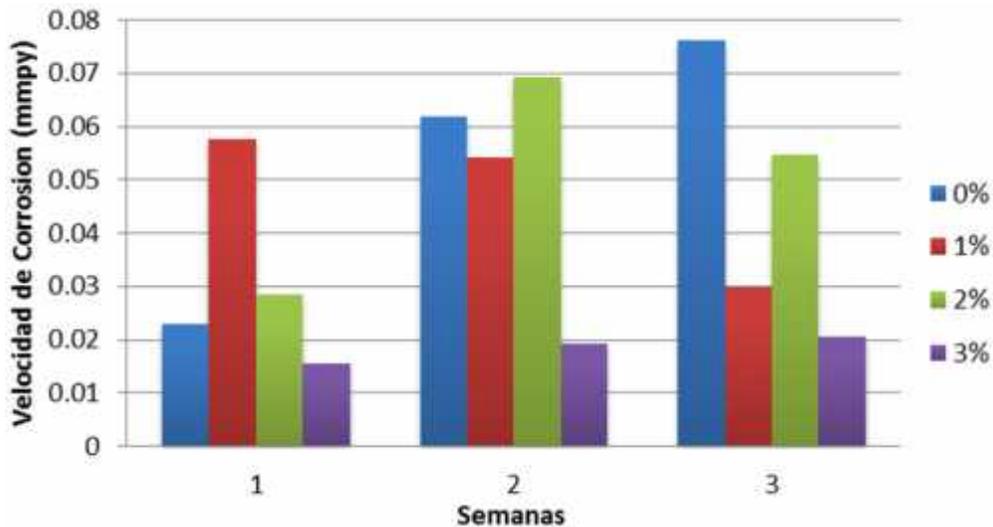


Figura 9. Velocidad de corrosión de morteros en NaCl al 3.5%.

4. CONCLUSIONES

La fibra de coco provee a los especímenes de mortero una ventaja en resistencia a la corrosión en comparación a los especímenes que no se adiciona dicha fibra. Esta protección incrementa conforme se incrementa el porcentaje de fibra.

Los potenciales de corrosión en la solución de agua tienden a potenciales que representan cierta incertidumbre a la corrosión por parte de los especímenes con adición del 1 y 2% de fibra de coco y una tendencia a la corrosión del 10 % en los especímenes sin contenido de fibra y del 3%.

En la solución salina, el espécimen con un porcentaje de 3% es el que mejor desempeño presenta en cuestión de potencial de corrosión al presentar una cierta incertidumbre frente a la corrosión. Los demás especímenes se encuentran en un 90% de probabilidad de corrosión. Los especímenes que contienen un 3% de fibra de coco presenta un mejor comportamiento frente a la velocidad de corrosión en la solución salina.

5. REFERENCIAS

- ASTM 876-09, A.C., (2009), “*Standard Test Method for Corrosión Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*”, in ASTM International, (West Conshohocken, PA.).
- ASTM 59-97, A.G., (2009), “*Standard Test for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*”, in ASTM International., (West Conshohocken, PA.).
- G193, N.A., (2012), Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosión, NACE/ASTM.
- Lopez, F.E., (2007), “*Inspección, monitoreo y evaluación de corrosión del puente “Río Fuerte”*”, in Deterioro de Materiales. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.: Chihuahua, Chihuahua, Mexico. p. 148.
- Hartt, W.H., Rapa, M., (1998), “*Condition Assessment of Jackets Upon Pilings for Florida Bridge Structures*”, Florida Atlantic University Florida, EUA.
- C. L. Page, P.L., P. R. W., (1991), “*Vassie, Investigations of reinforcement corrosión. 1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete*”, Materials and Structures, V. 24, No. 4, pp. 243-252.
- Neville, A., (1995), “*Chloride attack of reinforced concrete: an overview*”, Materials and Structures, V. 28, No. 2, p. 8.
- Andrade, C., (1993), “*Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements*”, Cement and Concrete Research, V. 23, No. 3, p. 18.
- Roland Stulz, K.M., (1981), “*Materiales de construcción apropiados*”, SKAT, Editor. SKAT & IT Publications: Switzerland. p. 442.
- O, Q.G.S.L.G.S.L., (2006), “*Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto*”, Ingeniería & Desarrollo, Universidad del Norte, V. 20, p. 16.
- Stonestrong, (2012), “*Propiedades del concreto reforzado con fibra de estopa de coco*”, Construcción y Tecnología en concreto (Colombia).

Influencia del uso de nanopartículas base silicio durante el curado externo en la durabilidad de materiales base cemento portland.

D. Cruz-Moreno¹, G. Fajardo¹, A. Cruz-López¹, P. Valdez¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

RESUMEN

Se estudió el efecto de la introducción de nanopartículas base silicio (NBS) preparadas por el método sol-gel ruta básica, como una opción para disminuir la permeabilidad en materiales base cemento portland. La introducción de NBS se realizó durante el curado externo, utilizando para esto especímenes de mortero fabricados con una relación a/c de 0.65, y una suspensión preparada al [NBS]=0.1% con respecto al volumen del agua de curado. Posteriormente, las muestras siguieron un periodo de inmersión en agua potable con el fin de promover la reacción de la NBS en el interior de morteros. Durante este período, se realizaron mediciones de resistividad eléctrica hasta detectar un cambio significativo. Posteriormente, los especímenes fueron expuestos a una atmósfera con 10% de CO₂ a 30°C y 60% HR durante 14 días, presentando una disminución en el proceso de la carbonatación. Lo anterior coincide con los análisis de fisiorción de nitrógeno que prueban el bloqueo de la porosidad presente hasta en un 95%, modificando la microestructura y cerrando el paso a los agentes agresivos.

Palabras clave: Nanopartículas base silicio, porosidad, curado, carbonatación, durabilidad.

Autor de contacto: Gerardo Fajardo. (gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se generan gastos anuales entre 18 a 21 mil millones de USD en rehabilitaciones o reparaciones en las estructuras de concreto reforzado (ECR) debido a la corrosión del acero de refuerzo. Más del 50% de estas ECR presenta problemas de deterioro a causa de la alta permeabilidad o baja calidad del concreto. La permeabilidad de las ECR, favorece al mecanismo de transporte de agentes agresivos como al dióxido de carbono (CO_2), ion cloruro (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}) (Shaikh et al., 2015), siendo éstos, la principal causa de deterioro en las ECR. Sin embargo, debemos recordar que propiedades importantes, tales como la resistencia, la permeabilidad y la durabilidad, están ligadas directamente con la porosidad en el concreto (Fajardo et al. 2015; Hou et al. 2015, 2016; Kupwade-patil et al. 2016). No obstante, es la estructura y forma de los poros la que afecta a la permeabilidad; depende de muchos factores tales como: la relación agua/cemento, volumen de poro, distribución de tamaño de poro, las interconexiones de poros capilares y la interfaz de pasta de cemento. Sin embargo, la porosidad está condicionada por el tipo y la cantidad de cemento empleado, el nivel de compactación y transporte, el tiempo y tipo de curado además de la relación agua/cemento (Zahedi et al., 2015).

El curado es una de las principales etapas de los sistemas cementantes y por ende del sistema constructivo de las ECR, contribuye en el logro de muchas de sus propiedades que influyen en la durabilidad. El curado es el nombre que se le brinda a los mecanismos empleados para impulsar la hidratación del cemento; llevando un control de la temperatura y en el movimiento de humedad, a partir de la superficie hacia el interior del concreto. Esta técnica no es nueva, pero permite la hidratación, de tal forma que maximiza la obtención de las propiedades que se pueden desarrollar en una matriz base cemento portland (Kong et al. 2016; Kupwade-patil et al. 2016; Wyrzykowski et al. 2016). Sin embargo, un proceso inadecuado de curado (o la ausencia) del concreto pueden dar lugar a una porosidad elevada, especialmente en la superficie externa del concreto.

La calidad del concreto como un recubrimiento del acero es un factor crítico que gobierna la durabilidad de las ECR (Cai et al. 2016; Hou et al. 2015, 2016), esto debido a que cualquier mecanismo de deterioro a menudo comienza por la superficie. En un estudio previo (Fajardo et al. 2015) se analizó el ingreso de nanopartículas mediante migración en morteros endurecidos y se comprobó el bloqueo de los poros, provocando una disminución de la permeabilidad. Otros métodos han sido desarrollados a partir de la introducción de nanopartículas hacia el interior de materiales base cemento portland aplicada a edades tempranas (Hou et al. 2015; Jalal et al. 2012; Ji 2005). Estas técnicas han comprobado los efectos benéficos de la interacción de las nanopartículas con ciertas fases de la matriz de los materiales cementantes. No obstante, presentan desventajas asociadas principalmente a la complejidad de la aplicación en obras o elementos reales. Por lo tanto, el presente trabajo estudia la influencia de la introducción de nanopartículas base silicio (NBS) en una solución acuosa durante el proceso de curado externo, lo anterior con el objetivo de mejorar las propiedades que incrementen la durabilidad.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales.

Para este estudio se empleó Cemento Portland Ordinario (CPO 40), con una composición química similar a un Cemento Tipo I de acuerdo a las normas NMX-C-414-ONNCCE y ASTM C150 respectivamente. Además, se optó por usar como agregado, arena estándar (sílica de

Ottawa) que cumple con la norma ASTM C 778. En el caso del agua para el mezclado, se empleó agua desionizada para la elaboración de los especímenes de mortero, cumple la norma NMX-C-122-ONNCCE y se evitar la intrusión de iones Cl^- a la mezcla.

2.2 Fabricación de especímenes de mortero.

Se diseñaron especímenes cilíndricos de mortero con un diámetro de 50 mm y 150 mm de longitud. Los especímenes se fabricaron con una relación agua/cemento de 0.65 como se indica en la tabla 1, esto con el fin de mantener una porosidad característica de un concreto convencional. El mezclado de los morteros se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 305 y ASTM C 109. Los especímenes después de ser colados, se mantuvieron a una temperatura de 20°C durante 24 h como se establece en la norma ASTM C171, para su posterior preparación.

Tabla 1. Proporciones de la mezcla para una relación $a/c=0.65$ (método PCA).

Material	kg/m ³
Cemento	300
Arena	1850
Agua	195
Aire	1%

2.3 Obtención de las NBS.

Para la obtención de NBS amorfas y de tamaños que oscilan entre 8 a 50 nm, se siguió la ruta de sol-gel a 70°C empleando el procedimiento descrito por Fajardo et al. (Fajardo et al. 2015)

2.4 Aplicación del tratamiento de NBS a través de un curado externo.

Los especímenes fueron desmoldados una vez cumplidas las 24 h de su fabricación. Posteriormente, se realizaron cortes transversales en los extremos (a 25 mm) de cada espécimen cilíndrico de mortero, lo anterior para evitar los efectos de frontera producidos por la preparación y el colado. Luego se realizaron los cortes transversales de 50 mm de longitud, como se indica en la figura 1.

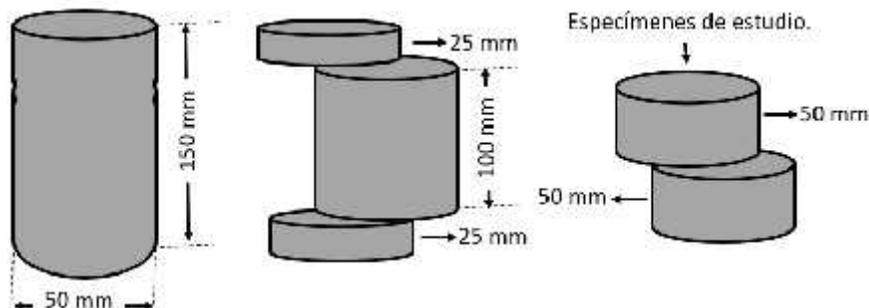


Figura 1. Obtención de las secciones transversales del espécimen de mortero para la aplicación del tratamiento con NBS.

Influencia del uso de nanopartículas base silicio durante el curado externo en la durabilidad de materiales base cemento portland.

La aplicación de la solución con NBS se llevó a cabo durante el proceso del curado externo. Se eligieron las secciones resultantes de 50 mm de espesor, a las cuales se le colocó una barrera perimetral para poder colocar el tirante de agua de 20 mm y llevar a cabo el curado externo durante 72 h (véase figura 2).

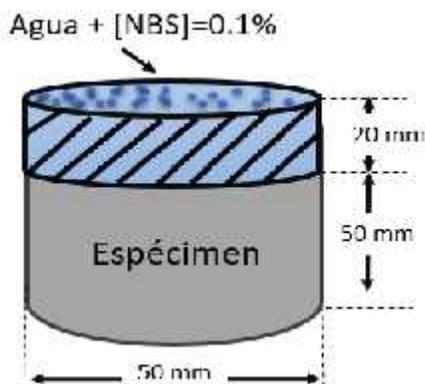


Figura 2. Aplicación del tratamiento con solución acuosa de NBS durante el proceso de curado externo.

Se preparó una solución empleando NBS al 0.1% con respecto del volumen de agua utilizada en el curado externo. La aplicación de la solución se llevó a cabo de forma superficial. También se utilizaron muestras de referencia (CNT) donde solo se empleó agua potable para el curado.

2.5 Caracterización de las muestras de mortero de CNT y tratadas con NBS.

Para la caracterización de las muestras de mortero tratadas con NBS durante el curado, se dividió cada muestra en dos zonas de 25 mm cada una (véase figura 3). La zona 1 (Z1) siendo la más próxima a la superficie donde se aplicó el curado y con NBS, mientras que la zona 2 (Z2), es la zona más alejada a la superficie del tratamiento. Las secciones obtenidas fueron colocadas en inmersión en agua para generar un estado crítico de saturación. Posteriormente, las muestras fueron monitoreadas constantemente durante 112 días para determinar el efecto generado por las NBS.



Figura 3. Obtención de secciones de las muestras de mortero para su evaluación.

Las propiedades fisicoquímicas de los morteros CNT y tratados (P-Z1 y P-Z2) fueron determinadas a través de:

Ensayos de fisiorción de nitrógeno en un equipo Micromeritics modelo TriStar II, a partir de pastillas obtenidas de las Zonas 1 y 2, a las cuales se les determinó el área específica, diámetro de

poro y volumen de poro. Para ello, se tomaron 3 pastillas con un peso de 0.5 g, las cuales fueron introducidas por separado en una celda para ser desgasificada a 300°C por 4 h. Después se dejó enfriar la muestra, y se colocó en el equipo a vacío donde se llevó a cabo la prueba a -198°C.

La resistividad eléctrica fue determinada utilizando una configuración de celda compuesta por tres electrodos (electrodo de trabajo, electrodo auxiliar y electrodo de Calomel) controlados por un potencióstato/galvanostato VoltaLab PGZ-301 conectado a una computadora. Para ello, se empleó un intervalo de frecuencia de 1 Hz a 100 kHz a través de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. Los datos fueron procesados utilizando el software VoltaLab R31 V.003 con el fin de obtener la resistividad mortero.

2.6 Condiciones de exposición de CO₂.

Una vez que las medidas de resistividad evidenciaron un cambio en la microestructura de las muestras de mortero (un incremento en la resistividad eléctrica), éstas fueron retiradas de la inmersión para seguir una exposición a un ambiente rico en CO₂. Las muestras se colocaron en una cámara ambiental a 30°C con una humedad relativa de 60 ± 5% y una concentración de 10% de CO₂ durante 14 días, garantizando las condiciones óptimas para que se genere el proceso de carbonatación.

Con el objetivo de promover un avance de carbonatación longitudinal, las muestras de mortero, fueron recubiertas lateralmente con pintura epóxica. Para determinar la profundidad de carbonatación, se empleó un indicador de fenolftaleína en la superficie de las muestras expuestas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistividad eléctrica en morteros.

En la figura 4, se presentan los resultados obtenidos de la resistividad eléctrica en las muestras de mortero correspondientes a la zona 1 (Z1) y Zona 2 (Z2). Así mismo, se presentan los resultados de las muestras sin aplicación de las NBS, denominadas CNT y el umbral de resistividad eléctrica (URE) es indicado con una línea horizontal punteada. Cabe mencionar que el tiempo expresado en la figura, representa el tiempo de inmersión que va desde 1 a 112 días después de haber sido sometidas al curado con NBS durante 72 h.

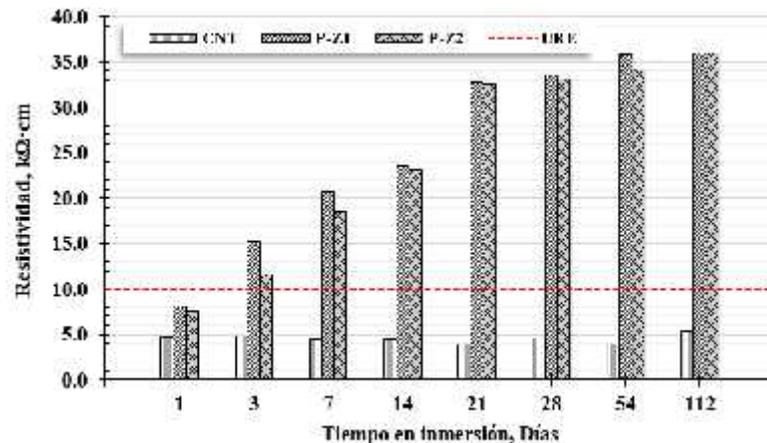


Figura 4. Evolución de la resistividad eléctrica de la CNT y P (Zona 1 y Zona 2) tratadas con NBS durante el tiempo de inmersión.

Influencia del uso de nanopartículas base silicio durante el curado externo en la durabilidad de materiales base cemento portland.

En general, se observó un incremento en la resistividad eléctrica en las muestras tratadas con NBS (P-Z1 y P-Z2) con respecto de la muestra CNT. Las muestras P-Z1 y P-Z2 lograron sobrepasar el URE a partir del día 3 de inmersión con una resistividad eléctrica que oscila entre 12 - 15 k \cdot cm, mientras que la muestra CNT presentó una resistividad eléctrica de 4.9 k \cdot cm. Así mismo, se puede observar un comportamiento ascendente durante los primeros 21 días, logrando un incremento en la resistividad eléctrica que oscila entre 32 - 36 k \cdot cm en las muestras tratadas P-Z1 y P-Z2, mientras que la muestra CNT permaneció por debajo de los 5 k \cdot cm.

En el mismo sentido, se encontró una disminución en el periodo de reacción entre la NBS y el Ca(OH)_2 comparado con otros trabajos similares, lo que permitió a la matriz cementante ubicarse como un mortero con efecto despreciable ante el ataque de agentes agresivos (Hornbostel et al., 2013). Se infiere que el tratamiento con NBS durante el proceso de curado externo podría ser más efectivo que otras técnicas relativamente más complejas de introducción de nanopartículas (Cárdenas et al., 2013; Fajardo et al. 2015; Sánchez et al., 2014).

3.2 Fisisorción de N_2 en morteros.

En la figura 5, se observa la distribución y tamaño de poro de las muestras de mortero CNT y las tratadas (P-Z1 y P-Z2) a partir de los 14 días del tratamiento con NBS.

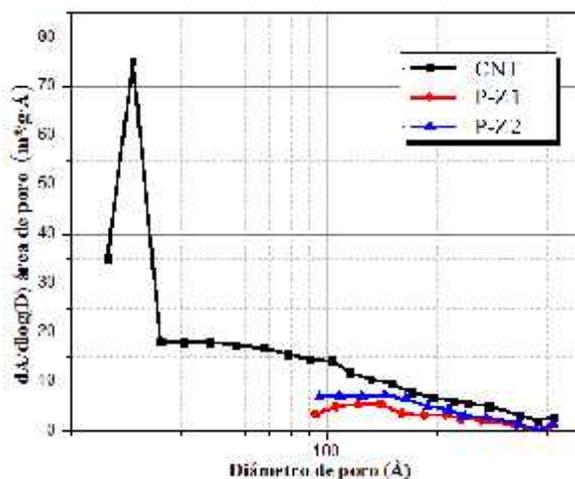


Figura 5. Distribución del tamaño de poro en la muestra CNT y tratadas (P-Z1 y P-Z2) con NBS obtenidas después de 14 días de inmersión.

Se observa en la figura 5 que la porosidad de las muestras de mortero CNT y tratadas (P-Z1 y P-Z2), poseen una porosidad en el intervalo de 25 - 450 Å (2.5 a 45 nm), con un comportamiento bimodal; destacando la zona de mesoporos (<40 nm). No obstante, podemos observar que las muestras tratadas con NBS lograron disminuir su porosidad, cubriendo la mayor cantidad de mesoporos, dejando al descubierto la porosidad > 90 Å (9 nm), disminuyendo principalmente los poros interconectados y poros de gel. Esto, debido a la interacción de las NBS con el Ca(OH)_2 y los Silicatos de Calcio Hidratados presentes en la interfaz de los poros, disminuyendo por consiguiente la adsorción (Cai et al. 2016; Zhang et al., 2011).

La figura 6 muestra las isotermas de adsorción de nitrógeno en las muestras de CNT y tratadas (P-Z1 y P-Z2), donde se observa la presencia de isotermas de tipo II y IV (de acuerdo a la

IUPAC) referidas a las características de los materiales mesoporosos y macroporosos de tipo de cuello de botella o irregulares.

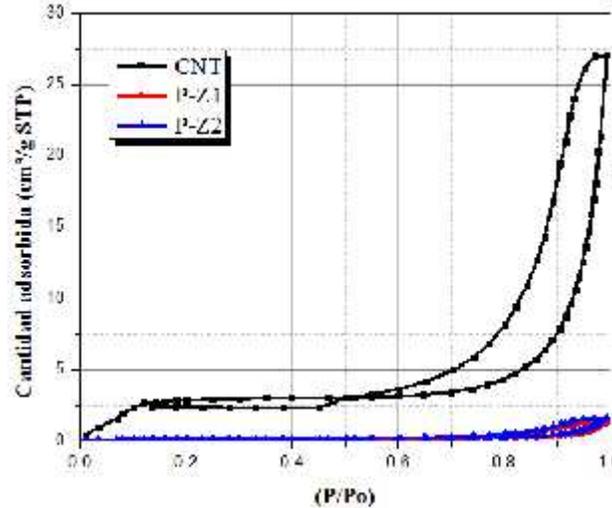


Figura 6. Isotermas de adsorción de las muestras CNT y tratados (P-Z1 y P-Z2) con NBS obtenidas después de 14 días de inmersión.

Analizando los resultados y al compararlos con las muestras de CNT se demuestra una disminución en el volumen de adsorción de N₂ alrededor del 92% en las muestras tratadas con NBS en la P-Z2 durante los primeros 14 días de inmersión. En las muestras tratadas con NBS P-Z1 se constata una mayor disminución en la cantidad de nitrógeno adsorbido con el incremento en el tiempo de inmersión, alcanzando hasta un 95% a los 14 días con respecto a la muestra CNT. Por lo tanto, se confirma que, bajo las condiciones experimentales, el uso de partículas de NBS en solución acuosa durante el proceso de curado externo se logra ingresar hasta los poros más cerrados concordando con los resultados obtenidos por Hou, siendo éstos responsables de la permeabilidad en los materiales base cemento portland (Cai et al. 2016; Hou et al. 2013, Hou et al., 2015).

3.3 Carbonatación en morteros.

En la figura 7 se presenta el avance en la carbonatación de las muestras de mortero con y sin tratamiento con NBS.

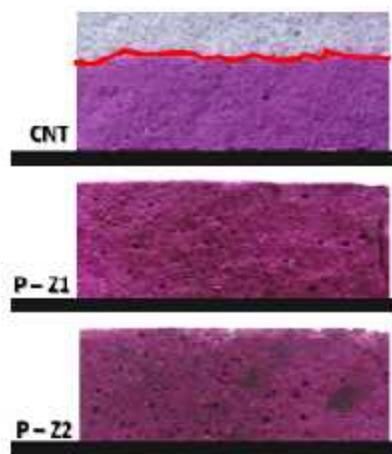


Figura 7. Imágenes del avance de carbonatación en las muestras tratadas con NBS, evidenciado por el indicador de fenolftaleína en muestras CNT, P-Z1 y P-Z2.

Se observa una clara disminución de la profundidad de carbonatación en las muestras de mortero tratadas para ambas zonas con respecto a la muestra CNT. Por lo tanto, podemos decir que el efecto generado en los morteros es un efecto barrera, que disminuye la permeabilidad y la porosidad < 9 nm (microporos y mesoporos capilares) lo cual es importante para incrementar la durabilidad de materiales base cemento portland.

4. CONCLUSIONES

La aplicación NBS durante el curado externo en solución acuosa, de acuerdo a las condiciones experimentales utilizadas aquí, permite concluir que:

- El transporte de humedad durante el proceso de curado favorece el ingreso de las NBS.
- La resistividad del mortero tratado con NBS incremento hasta 7 veces por encima de la muestra CNT a partir de sus primeros 21 días de inmersión en agua.
- La disminución de la adsorción de N_2 se atribuyó a la reducción de la interconexión de la porosidad y por consiguiente la reducción de la permeabilidad, evitando así la introducción de CO_2 , y con ello la disminución de la carbonatación.

Se comprueba que la aplicación de las NBS durante el proceso de curado externo, puede resultar prometedora en el incremento de la durabilidad en las ECR.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a PROVERICYT, PAICYT y SEP-CONACYT por el apoyo financiero de los proyectos, IT573-10 IT720- 11 y CB-2012-01/177839. Dulce Cruz-Moreno agradece al CONACYT por la beca No. 414932 otorgada para su formación doctoral.

6. REFERENCIAS

Cai, Yamei Hou, Pengkun, Duan, Ce, Zhang, Rui, Zhou, Zonghui, Cheng, Xin, Shah, Surendra., (2016), *"The Use of Tetraethyl Orthosilicate Silane (TEOS) for Surface-Treatment of Hardened"*

- Cement-Based Materials: A Comparison Study with Normal Treatment Agents*”, Construction and Building Materials V. 117, pp. 144–51.
- 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, V. 76, pp. 158–67.
- Hornbostel, Karla, Claus K. Larsen, and Mette R. Geiker, (2013), “*Relationship between Concrete Resistivity and Corrosion Rate - A Literature Review*”, Cement and Concrete Composites, V. 39, pp. 60–72.
- Hou, Pengkun et al., (2013), “*Modification Effects of Colloidal nanoSiO₂ on Cement Hydration and Its Gel Property*”, Composites Part B: Engineering, V. 45, No. (1), pp. 440–48.
- Hou, P., Zhang, R., Cai, Y., Cheng, X., Shah, S.P., (2015), “*Characteristics of Surface-Treatment of Nano-SiO₂ on the Transport Properties of Hardened Cement Pastes with Different Water-to-Cement Ratios*”, Cement and Concrete Composites V. 55, pp. 26–33.
- Hou, P., Zhang, R., Cai, Y., Cheng, X., Shah, S.P., (2016), “*In Situ Ca(OH)₂ Consumption of TEOS on the Surface of Hardened Cement-Based Materials and Its Improving Effects on the Ca-Leaching and Sulfate-Attack Resistivity*”, Construction and Building Materials V. 113, pp. 890–96.
- Jalal, Mostafa, Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A. R., (2012), “*Mechanical, Rheological, Durability and Microstructural Properties of High Performance Self-Compacting Concrete Containing SiO₂ Micro and Nanoparticles*”, Materials and Design 34, pp. 389–400.
- Ji, T. (2005). “*Preliminary Study on the Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano-SiO₂*”, Cement and Concrete Research V. 35, No. 10, pp. 1943–47.
- Kong, Yaning, Wang, P., Liu, S., Gao, Z., (2016), “*Hydration and Microstructure of Cement-Based Materials under Microwave Curing*”, Construction and Building Materials V. 114, pp. 831–38.
- Kupwade-patil, Kunal, Al-aibani A.F., Abdulsalam M.F., et al., (2016), “*Microstructure of Cement Paste with Natural Pozzolanic Volcanic Ash and Portland Cement at Different Stages of Curing*”, Construction & Building Materials, V. 113, pp. 423–41.
- Sánchez, M., Alonso, M. C., González, R., (2014), “*Preliminary Attempt of Hardened Mortar Sealing by Colloidal Nanosilica Migration*”, Construction and Building Materials, V. 66, pp. 306–12.
- Shaikh, Ahmed, F. U., Supit, S.W., (2015), “*Chloride Induced Corrosion Durability of High Volume Fly Ash Concretes Containing Nano Particles*”, Construction and Building Materials, V. 99, pp. 208–25.
- Wyrzykowski M., Ghourchian S., Sinthupinyo S., Chitvoranund N., Chintana T., Lura P., (2016), “*Internal Curing of High Performance Mortars with Bottom Ash*”, Cement and Concrete Composites, V. 71, pp. 1–9.
- Zahedi, Mahboubeh, Ramezaniapour, A. A., Ramezaniapour, A. M., (2015), “*Evaluation of the Mechanical Properties and Durability of Cement Mortars Containing Nanosilica and Rice Husk Ash under Chloride Ion Penetration*”, Construction and Building Materials, V. 78, pp. 354–61.

Zhang, Hua, M., Li, H., (2011), "*Pore Structure and Chloride Permeability of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement*", Construction and Building Materials, V. 25, No. 2, pp. 608–16.

Evaluación del uso de desechos industriales en la elaboración de ladrillos rojos recocidos.

O. T. Maza Ignacio¹, V. G. Jiménez Quero¹, M. Ortiz Guzmán¹

¹ Instituto Politécnico Nacional (IPN) CIIDIR Oaxaca

Palabras clave: resistencia a la compresión, bagazo de caña, Subrasante

Autor de contacto: O. T. Maza Ignacio (olimaza24@hotmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

Algunos procesos industriales generan grandes cantidades de desechos que por sus características pueden emplearse como materia prima en la elaboración de nuevos productos y de esta manera lograr una disposición final adecuada.

Las altas temperaturas de cocción de los ladrillos empleados en la industria de la construcción propician el flujo de masa necesario en la transformación de residuos a productos nuevos (MUÑOZ, MORALES, MENDÍVIL & MUÑOZ, 2014). Por otra parte, la amplia composición química de las arcillas empleadas en la elaboración de este material las hacen óptimas receptoras de desechos industriales (TEIXEIRA, SOUZA, TADEU & VILCHE, 2008). El objetivo de este proyecto fue evaluar el desempeño de cuatro residuos industriales que sustituyeron parcialmente a la arcilla en una matriz arcillosa empleada en la elaboración de ladrillos cocidos, por medio de pruebas de plasticidad, absorción y resistencia para determinar la viabilidad de su uso en la industria de la construcción.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales empleados se obtuvieron de la siguiente manera: la arcilla (AR) se extrajo de un banco ubicado en la zona conocida como “Cañada Corazón”, en la 3ª sección de San Pablo Huitzo, Etna, Oaxaca, México; fue secada en horno por 24 horas a 105°C, molida en molino de bolas y tamizada por la malla No. 100. La ceniza de bagazo de caña (CBC), fue colectada de un tiradero a cielo abierto propiedad del Ingenio Azucarero “Constancia” localizado en la comunidad de Tezonapa, Veracruz, México; fue tamizada por la malla No. 200. La ceniza de madera de pino (CM) se obtuvo de un horno ladrillero a cielo abierto ubicado en la zona conocida como “Cañada Corazón”, en la 3ª sección de San Pablo Huitzo, Etna, Oaxaca, México; se tamizó por la malla No. 100. La ceniza volante (CV) y el humo de sílice (HS) se adquirieron comercialmente. Se evaluaron cinco matrices arcillosas: una matriz control con 100% AR (nombrada ARC) y cuatro más sustituyendo 40% de AR por un desecho industrial, nombradas de acuerdo a sus componentes: AR-CV, AR-HS, AR-CBC, y AR-CM.

Las materias primas se caracterizaron por medio de un análisis de composición química, estudios de DRX (con difractor Bruker AXS D8 advance) y MEB (con microscopio HITACHI, modelo SU3500).

Las cinco matrices se caracterizaron en estado plástico determinando los límites de Atterberg con base en la norma ASTM D4318 – 10' (Fig. 1).





Fig. 1 Determinación de los límites de Atterberg a) Límite líquido, b) Límite plástico, c) Contracción lineal.

Con las matrices arcillosas se elaboraron probetas prismáticas de 135x70x25 mm como se muestra en la Fig. 2, fueron cocidas a 900°C y 1000°C durante tres horas y media en un horno de tiro directo alimentado por gas L.P. Con la matriz AR-CM no se elaboraron probetas ya que el rendimiento de la ceniza de madera después de su tamizado fue muy bajo.

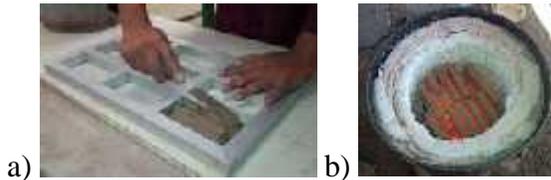


Fig. 2 a) Elaboración y b) Cocción de probetas.

El módulo de ruptura (MR) se obtuvo a través de pruebas de resistencia a la flexión realizadas con base en la norma NMX-C-191- ONNCCE 2015, se empleó una prensa multicarga con capacidad para 5 toneladas marca Gotest Instrument Corp. Modelo S5830, y un anillo de carga con indicador de cuadrante con capacidad de 2 toneladas (Fig. 3).



Fig. 3 Prueba de resistencia a la flexión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra que la composición química de los desechos es semejante a la de la arcilla. Los principales compuestos son SiO₂, Al₂O₃, CaO y Fe₂O₃. En las arcillas la alúmina y sílice conforman a la caolinita, un mineral arcilloso que favorece la plasticidad de las arcillas.

Tabla 1. Composición química de arcilla y desechos industriales.

E/C: Elemento o Compuesto
 PI: Pérdidas por Ignición a 1000°C

/C	R	V	S	BC	M
l_2O_3	8.25	0.01	.18	4.61	.88
aO	.89	.00	.72	.36	9.54
e total	.75	-	.05	.38	.21
eO	.89	-	.02	-	0.1
e_2O_3	.94	.42	.05	.04	.15
z_2O	.95	.96	.87	.29	.94
gO	.10	.63	.36	.43	.59
nO	.06	.10	.01	.18	.83
a_2O	.42	.19	.12	.57	.04
z_2O_5	.40	.38	.13	.85	.18
iO_2	1.19	4.12	2.74	6.37	2.53
iO_2	.94	.12	-	.96	.99
I	.67	.60	.84	0.53	4.74

Alrededor de los 950°C la caolinita se descompone para formar mulita, que es una fase mineral de alta dureza. Los óxidos de aluminio y silicio que componen las cenizas incrementan la disponibilidad de estos materiales y favorecen la formación de mulita durante la cocción. La arcilla y las cenizas contienen óxidos de Fe, Na y K que en el proceso de sinterización actúan como fundentes, modificando la estructura de las arcillas a bajas temperaturas y favoreciendo la formación de fase líquida para cerrar poros (SOUZA, TEIXEIRA, SANTOS, COSTA & LONGO, 2011). Las principales fases minerales observadas por DRX en la AR, HS y CV fueron cuarzo y maghemita, mientras que en la CBC y CM se observó cuarzo y cristobalita. El cuarzo ha mostrado ser un material de relleno que reduce la plasticidad de las arcillas pero al mismo tiempo otorga estabilidad volumétrica a los cuerpos cerámicos.

En la Fig. 4 se muestran las micrografías obtenidas por MEB. La arcilla muestra partículas de forma irregular; la forma esférica de las partículas de CV y HS podría tener influencia en el mezclado al reducir la fricción entre partículas de arcilla mejorando su trabajabilidad, mientras que la forma angular de la CBC y CM podrían ser motivo de una menor trabajabilidad en la mezcla.

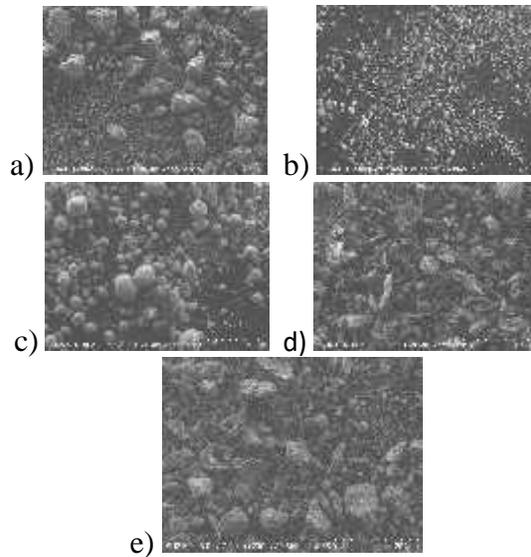


Fig. 4 Micrografías de materiales en polvo a) AR, b) CV, c) HS, d) CBC y e) CM.

La plasticidad de un suelo es la propiedad por la cual es capaz de resistir deformaciones sin variación volumétrica apreciable y sin agrietarse. Con diferentes contenidos de agua, un suelo puede pasar por diferentes fases, el límite plástico es la frontera que marca la diferencia entre el estado semilíquido y el estado plástico de un material. Como se observa en la Fig. 5, la adición de los residuos en la matriz arcillosa incrementó la cantidad de agua necesaria para alcanzar el límite plástico. Una mayor demanda de agua en la matriz AR-HS podría deberse a la finesa de sus partículas que genera mayor área superficial y a su vez requiere mayor volumen de agua para su recubrimiento. Por su parte, el incremento de agua en las matrices AR-CM y AR-CBC podría atribuirse a la forma angular de las partículas de la CM y CBC que reducen su trabajabilidad, así como a su alta pérdida de peso por ignición que sugiere la presencia de carbón, que es un material poroso y absorbente.

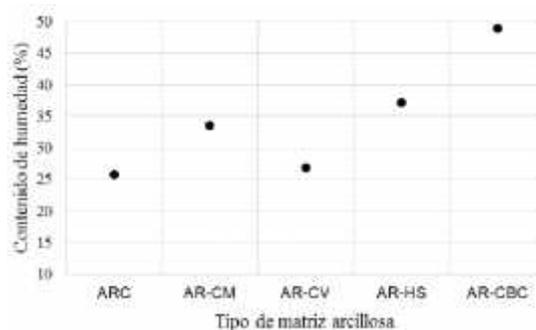


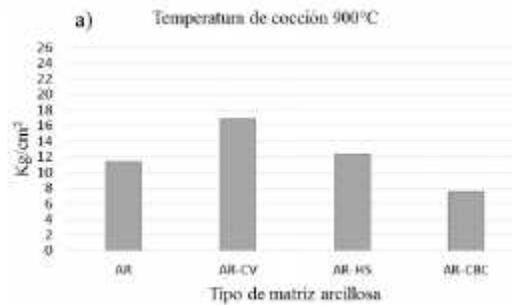
Fig. 5 Límite líquido de las matrices arcillosas.

La Tabla 2 muestra que las probetas cocidas adicionadas con CV presentaron la menor contracción lineal. Estos resultados podrían relacionarse con el límite líquido de cada matriz, la cantidad de agua solicitada para su mezclado puede interpretarse como la reducción de volumen que cada mezcla presentará por la pérdida de agua durante su secado y cocción. La contracción también podría relacionarse con el contenido de cuarzo en los materiales pues aporta resistencia a la deformación durante la cocción (DANA, DAS & KUMAR, 2004).

Tabla 2. Resultados de contracción lineal de probetas cocidas.

Mat	CL (%)	
	900 °C	100 °C
AR	3.	4.0
C	69	0
AR-CV	2.	2.4
CV	37	0
AR-HS	7.	6.3
HS	21	8
AR-CBC	4.	4.4
CBC	21	4

En cuanto a los resultados de MR, en la Fig. 6 se observa que el incremento de temperatura favorece sólo a los ladrillos elaborados con las matrices ARC y AR-CV, mientras que sucede lo opuesto con los ladrillos de las mezclas AR-HS y AR-CBC. La resistencia de los ladrillos está en función de su densidad, y está a su vez depende de la cantidad de fase líquida presente durante el proceso de sinterización que contribuye al cierre de poros. De esta manera, la cantidad de fundentes presentes en cada material puede influir en la resistencia de los ladrillos. En el caso de la matriz adicionada con CBC, su baja resistencia también podría atribuirse a su alta pérdida de peso por ignición, lo que da como resultado una mayor cantidad de poros en los ladrillos después de la cocción (MARI, 1998).



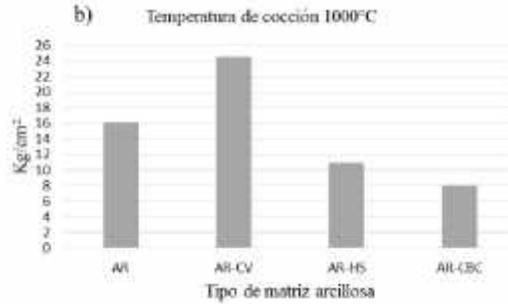


Fig. 6 Módulo de ruptura de ladrillos cocidos a a) 900°C y b) 1000°C.

4. CONCLUSIONES

La sustitución en peso de arcilla por CV en un 40% es viable para elaborar ladrillos ya que presentan una baja contracción lineal y superan la resistencia a la flexión de los ladrillos control en un 32.16% cuando son cocidos a 900°C y en un 34.33% cuando son cocidos a 1000°C..

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional (IPN), al CIIDIR Unidad Oaxaca y a la COFAA el apoyo otorgado para la realización del proyecto y la difusión del mismo.

6. REFERENCIAS

ASTM D4318 – 10’ Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials.

Kausik Dana, Sukhen Das, Swapan Kumar Das, (2004). Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin–quartz–feldspar system. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, pp. 3169–3175.

Mari, E. A. (1998). “Capítulo 3: Procesos cerámicos”. *Los materiales cerámicos*, (Argentina: Alsina), 1ª Edición., pp. 53 –103.

Muñoz Velasco P., Morales Ortíz M. P., Mendivil Giró M. A., Muñoz Velasco L. (2014). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 97-107.

NMX-C-191- ONNCCE 2015. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.

Souza A. E., Teixeira S.R., Santos G.T.A., Costa F.B., Longo E. (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 92, pp. 2774-2780.

Teixeira Silvio Rainho, de Souza Agda Eunice, de Almeida Santos Gleyson Tadeu, Vilche Peña Angel Fidel (2008). Sugarcane Bagasse Ash as a Potential Quartz Replacement in Red Ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, 91-6, pp. 1883-1887

Efecto de Corrosión en Concreto Reforzado Elaborado con Desecho Minero (jal)

V. Volpi^{1,2}, L.López¹, A. López³, M. Gonzalez¹, V. Moreno², F. Olguín¹

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca- Tulancingo Km 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184, México.

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Boulevard Valsequillo s/n, San Manuel, Puebla de Zaragoza, Puebla. C.P. 72550, México.

³Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Avenida del Charro 450 Norte, Colonia Partido Romero, Cd. Juárez, Chihuahua. C.P. 32310, México.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se estudia una alternativa de reutilización de materiales de desecho industrial en concreto reforzado buscando determinar parámetros experimentales de resistencia a la corrosión de los distintos sistemas de concreto en estudio, (con 5%, 10% y 15% de material de reciclaje en reemplazo del cemento portland) en comparación a un concreto reforzado convencional. Los potenciales de media celda muestran que los especímenes con material de desecho minero no sufren un cambio significativo en comparación al sistema de concreto convencional en función del tiempo de monitoreo. En la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica los resultados indican que los sistemas con material de desecho minero presentan una ligera disminución en los valores de resistencia a la corrosión y las impedancias totales no muestran un cambio significativo en comparación al de un concreto convencional hasta el 10% de dosificación.

Palabras clave: Concreto, Desecho minero, Corrosión, Impedancia.

Autor de contacto: Luis Daimir López León. (luis_lopez@uaeh.edu.mx.)

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la preocupación por la conservación del medio ambiente ha incrementado bastante, uno de los objetivos principales se ha centrado en la mitigación de los impactos negativos que provocan los desechos industriales en el ambiente. Las estrategias planteadas incluyen la reutilización de estos desechos de una manera eficiente.

En Pachuca, Hidalgo, la minería ha generado a través de casi 500 años acumulaciones de jales (residuo minero) que sobrepasan los 100 millones de toneladas en toda la ciudad. Años atrás no existía ninguna normatividad para su manejo y deposición, fue hasta el año 2004, cuando se aprobó (NOM-141-SEMARNAT, 2003) la cual se regularon los procedimientos y se dio mayor importancia al impacto ambiental que los desechos generaban.

Actualmente, los residuos mineros de la ciudad no tienen ningún uso, por el contrario, el abandono y desentendimiento de los mismos los ha convertido en parte del paisaje natural. Sin embargo, sus características físicas y químicas no son favorables para el ambiente ni para la salud de los pobladores. El tamaño de las partículas al ser tan fino impregna el aire y produce grandes remolinos de tierra. Aunado a ello, las necesidades de infraestructura y equipamiento de una sociedad en crecimiento requieren de mayores espacios, mismos que ahora ocupan estas presas de jal.

Debido a lo anterior, la necesidad de aprovechar este recurso tan abundante y al mismo tiempo mitigar su impacto negativo en el ambiente ha dado apertura a nuevas soluciones. La implementación de jal en la industria de la construcción, específicamente en el concreto armado para elementos estructurales de baja resistencia respondería a un uso eficiente del recurso con grandes ventajas para la sociedad.

La industria de la construcción en México y en el mundo se ha apoyado por muchas generaciones en la utilización de concreto armado como elemento fundamental de las estructuras. Los costos de construcción son relativamente bajos y sus características han asegurado larga vida a las edificaciones. Sin embargo, se ha dejado de lado el mantenimiento de las estructuras.

Uno de los fenómenos que puede dañar gravemente la vida útil de los inmuebles, así como las características funcionales del concreto tales como adherencia y resistencia mecánica, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto comprometiendo la integridad estructural es el efecto de la corrosión. Por ello, el análisis de los efectos de corrosión en las estructuras es de vital importancia pues genera pérdidas millonarias en todo el mundo (Akita; Fujiwara; Ozaka, 1997)

En este trabajo se busca aprovechar los residuos industriales de la minería (jales), como sustitución del elemento cementante en diferentes porcentajes en los sistemas concreto-acero. Se pretende su implementación para estructuras de baja resistencia, así como asegurar su funcionalidad ante el fenómeno de la corrosión comparados con sistemas de concreto armado convencionales y confirmar el beneficio de su utilización en la industria de la construcción.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Medio Corrosivo

Los especímenes de concreto fueron expuestos a un medio corrosivo sintético (5% NaCl) utilizando una cámara de aspersión salina con 30 días de exposición (ASTM B117, 2007).



Figura 1. Cámara de aspersión salina.

2.2 Material de desecho utilizado

En este trabajo se utilizó jal de Escombrera Presa Sur, ubicada en el distrito Pachuca-Real del Monte, Hidalgo, Mexico. El estudio de caracterización revela los compuestos mayoritarios de oxido de silicio, oxido de aluminio y el oxido de hierro (Tabla 1), especies minerales identificadas (Zongjin, 2011) en los difractogramas obtenidos por Difracción de Rayos X (Figura 2).

Tabla 1. Composición química promedio de la escombrera.

Elemento	%	Elemento	%
SiO ₂	70.01	P ₂ O ₅	0.08
TiO ₂	0.30	K ₂ O	3.98
Al ₂ O ₃	12.82	CaO	3.34
Fe ₂ O ₃	3.80	Na ₂ O	2.50
MnO	0.70	Ag	38 g Ag /Ton
MgO	1.01	Au	0.25 g Au / Ton

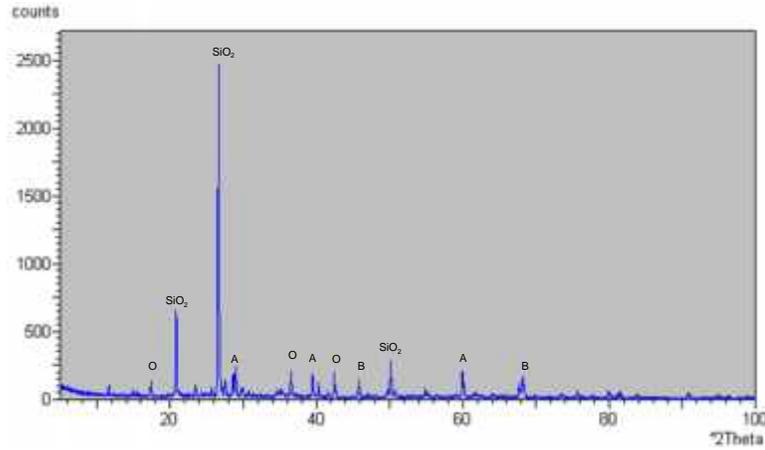
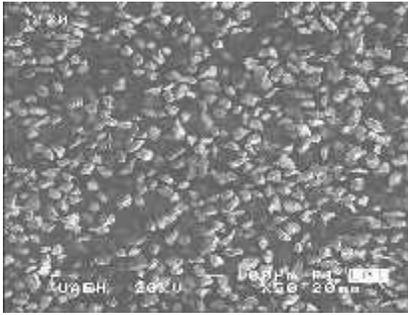


Figura 2. Difractograma de rayos X de las escombrera presa sur.

En la figura 3, se puede apreciar una imagen general de las escombreras las cuales se analizaron SEM - EDS, en donde se puede observar la presencia de elementos mayoritarios de silicio, aluminio, potasio, hierro, así como elementos minoritarios azufre, magnesio, manganeso y como elementos traza cobre, zinc como se aprecia en la figura 3b.

a)



b)

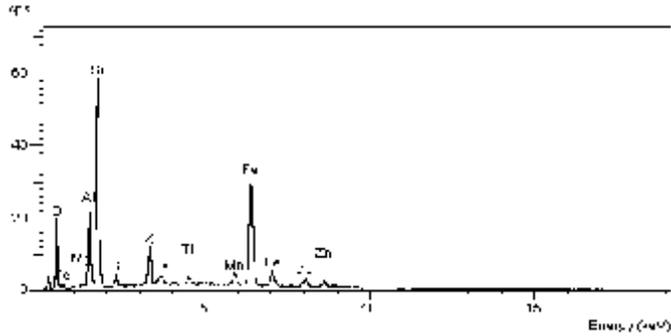


Figura 3. Microfotografías de las escombreras a) Imagen general, 50X, SEM, b) resultado del microanálisis general SEM-EDS.

2.3 Diseño del espécimen

Se elaboraron especímenes de concreto reforzado como se muestra en la figura 4, cuyas dimensiones tienen la finalidad de garantizar el mismo espesor de recubrimiento para todo el acero de refuerzo (especímenes de 15 *15 cm), y para tener facilidad de manejo al colocarlos en la cimbra, para su curado y monitoreo.

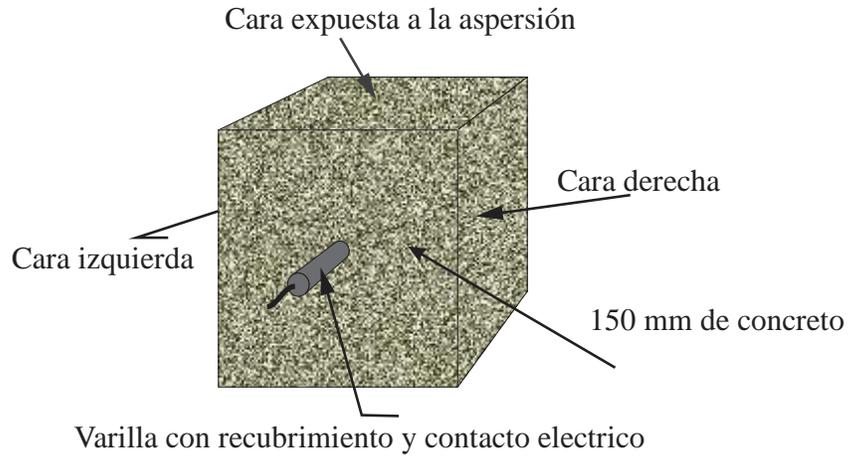


Figura 4. Dimensiones de los especímenes

2.4 Parámetros experimentales

Para las técnicas electroquímicas se usó una celda típica de tres electrodos, con un electrodo de cobre-sulfato de cobre como referencia y una barra de grafito como contra electrodo. (ver figura 5).

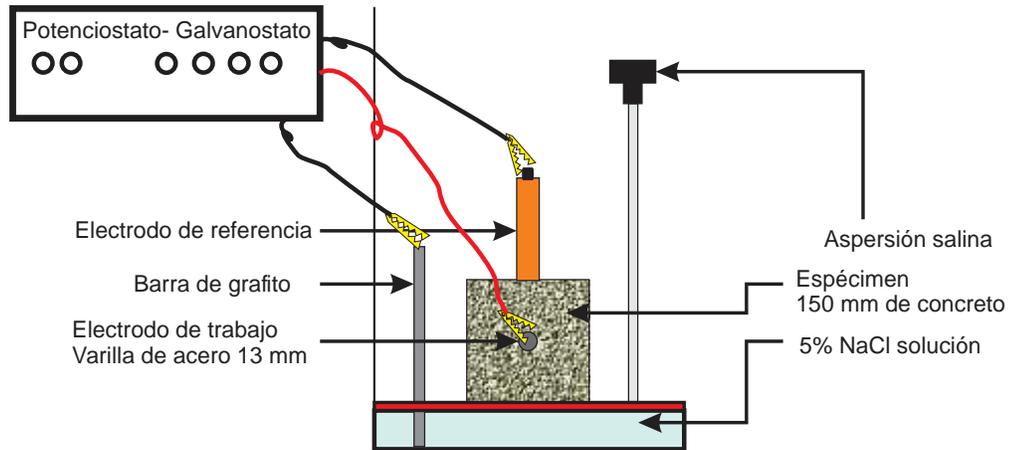


Figura 5. Esquema representativo para la conexión de la celda para monitoreo

Como electrodos de trabajo se utilizaron las varillas de acero al carbono AISI 1018 previamente tratadas. La composición química del acero se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Composición del acero al carbono AISI 1018

Especificación	Composición química (% máximo)			
	C	Mn	P	S
AISI 1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.030	0.035

Una vez armada la celda electroquímica se conectó a un potenciostato-galvanostato Autolab PG STAT 30 y se aplicaron las técnicas a través del software proporcionado por la misma compañía.

3.7.2. Parámetros Experimentales

Para impedancia se utilizaron los siguientes parámetros experimentales (tabla 3).

Tabla 3. Parámetros experimentales utilizados en las técnicas electroquímicas.

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
Tiempo de inmersión del electrodo 10 min
Amplitud de 10mV
Intervalo de frecuencias de 0.01 Hz a 10,000 Hz

3. RESULTADOS

3.1 Impedancia Electroquímica

Con el fin de establecer, de manera más sencilla, el número de etapas involucradas y el tipo de proceso de corrosión, se realizaron pruebas con la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. Esta técnica, se usa aprovechando las características de la misma de poder separar las contribuciones de diferentes fenómenos, de acuerdo al tiempo de relajación de cada una de ellas (K.Y. Ann; H.W. Song, 2007).

Las mediciones se llevaron a cabo con una amplitud de 10 mV, tomando como referencia el potencial de corrosión y en el intervalo de frecuencias de 10 mHz a 10 kHz. Para ello se utilizó un Analizador de Respuestas en Frecuencia (FRA, por sus siglas en inglés) acoplado a un Potenciostato-Galvanostato Autolab Mod. PGSTAT30.

3.1.1 Impedancia electroquímica 7 días de exposición

La figura 6 muestra diagramas de Nyquist de los resultados de la técnica de espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) para los sistemas en estudio a los 7 días de exposición a la aspersión salina. Los espectros muestran un comportamiento semejante para los sistemas 0%, 5% y 10% de jal como reemplazo de cemento, ya que la superficie del acero se modifica para el sistema de 15% de jal mostrando valores menores de impedancia real e imaginaria en comparación a los demás sistemas. También, se observa que los procesos difusivos son muy importantes, mostrando semicírculos abiertos con tendencia lineal hacia bajas frecuencias. Lo anterior puede ser atribuido, en primera instancia a la transferencia de carga y

posteriormente a la difusión ya sea de los productos de corrosión hacia la solución o de las especies corrosivas hacia la superficie.

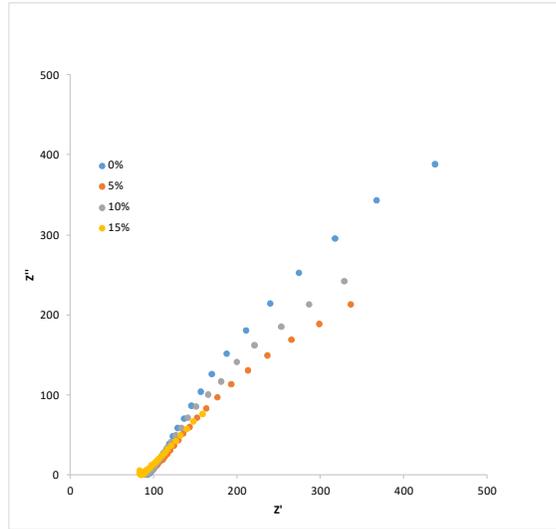


Figura 6. Diagramas de Nyquist para el sistema concreto-acero al carbono AISI 1018 en función de la concentración de jal a 7 días de exposición.

3.1.2 Impedancia electroquímica 14 días de exposición

En la figura 7 se presentan diagramas de Nyquist obtenidos al estudiar el comportamiento electroquímico del sistema concreto-acero con un tiempo de exposición de 14 días y en función de la concentración de jal. Los espectros muestran un semicírculo abierto y a bajas frecuencias una tendencia lineal, lo que ha sido atribuido a procesos difusivos que están ocurriendo en el sistema. En el sistema de 15% de jal el espectro es distinto en comparación a los demás sistemas estudiados mostrando menor resistencia a la corrosión.

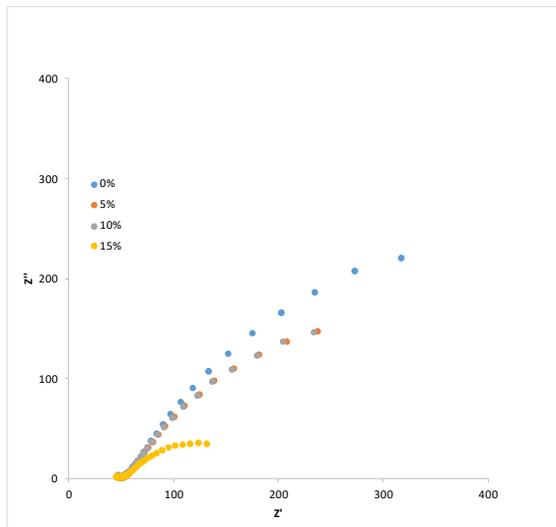


Figura 7. Diagramas de Nyquist para el sistema concreto-acero al carbono AISI 1018 en función de la concentración de jal a 14 días de exposición.

3.1.3 Impedancia electroquímica 21 días de exposición

La figura 8 muestra diagramas de Nyquist obtenidos a un tiempo de 21 días de exposición en la cámara de aspersión. En la gráfica, se observa que la componente real e imaginaria de la impedancia disminuye, para el sistema de 15% de jal. Por otra parte, los sistemas con 0%, 5% y 10% muestran valores de resistencia muy similares indicando una mayor uniformidad en el proceso de corrosión.

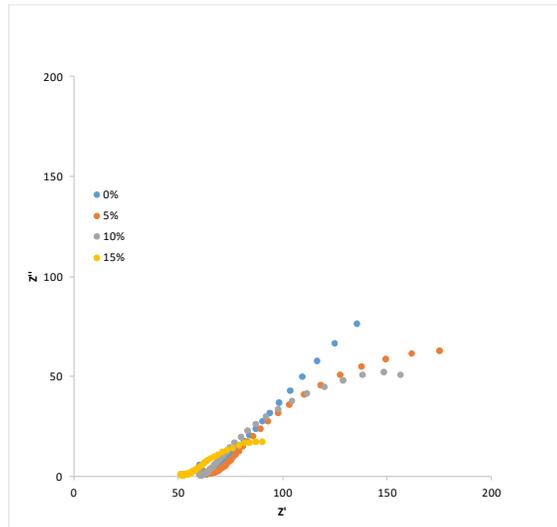


Figura 8. Diagramas de Nyquist para el sistema concreto-acerado al carbono AISI 1018 en función de la concentración de jal a 21 días de exposición.

3.1.4 Impedancia electroquímica 28 días de exposición

La figura 9 muestra los diagramas de Nyquist, como resultado de las mediciones de espectroscopia de impedancia electroquímica para los sistemas en estudio y en función del tiempo de exposición al medio corrosivo (28 días). En ellas se muestran en general, semicírculos abiertos con una ligera tendencia lineal a bajas frecuencias de una tendencia lineal hacia frecuencias más bajas. Esto se puede atribuir principalmente a la transferencia de carga y posterior a la difusión de especies corrosivas en la superficie, se observa una disminución en los valores reales e imaginarios de impedancia al incrementar el porcentaje de jal como cementante 15% ya que para los sistemas con 5% a 10% de jal no muestran un cambio significativo en comparación al concreto convencional (0% jal).

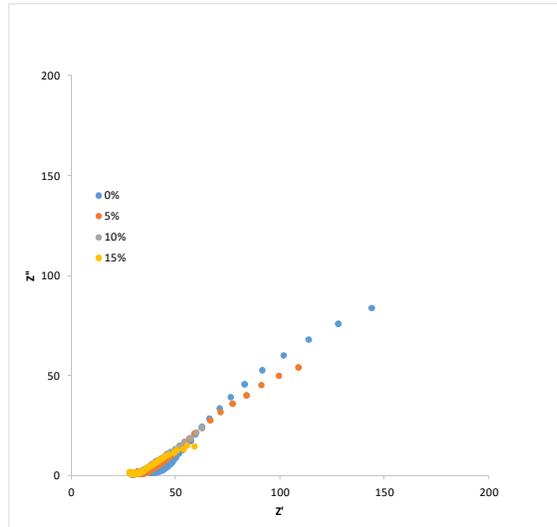


Figura 9. Diagramas de Nyquist para el sistema concreto-acero al carbono AISI 1018 en función de la concentración de jal a 28 días de exposición.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de potenciales de media celda no muestran un cambio significativo en comparación al de un concreto convencional hasta el 10% de dosificación de residuo de mina en el concreto.

El uso de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica muestra que la interacción del jal como cementante no modifica el proceso de corrosión, ya que se observa que el uso de residuo minero hasta un 10% no favorece la llegada de los agentes corrosivos a la superficie de la varilla de refuerzo en el concreto comparado a un sistema convencional mostrando valores de R_p muy similares para los distintos sistemas.

La interacción de cloruros con el metal, se ve aumentada al usar 15% en la dosificación de jal como cementante modificando considerablemente la velocidad de corrosión del sistema.

Aunque una conclusión puede resumir los aspectos fundamentales del artículo, es recomendable redactar unas conclusiones finales en el artículo.

En caso de que usted haga conclusiones, no utilice el resumen como la conclusión. Una conclusión podría elaborarse haciendo referencia a la importancia del trabajo o sugiriendo sus aplicaciones y generalizaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

A la UAEH y BUAP por el uso de instalaciones y equipos.

6. REFERENCIAS

Akita, H., Fujiwara, T., Ozaka, T., (1997), A practical procedure for the analysis of moisture transfer within concrete due to drying, Mag. Concr. Res. V. 49 pp. 129–137.

Ann, K., Song, W., (2007), Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, Corros. Sci. V.49 pp. 4113–4133.

ASTM B117, (2007), Standar practice for operating salt spray (Fog) Apparatus.

L. Zongjin (2011), Advanced Concrete Technology, John Wiley&Sons, New Jersey, pp. 79.

NOM-141-SEMARNAT, (2003)

Estudio técnico de paneles elaborados con concreto ligero reciclado para la construcción de viviendas unifamiliares modulares.

F. A. Alonso Farrera¹, L. M. Reynosa Morales¹, J. E. Castellanos Castellanos¹, M. Nazar¹ y J. J. Cruz¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas

Autor de contacto: F. A. Alonso Farrera. (alfa@unach.mx)

1. INTRODUCCIÓN

En México existe un tipo de vivienda llamada de interés social, que está consignada a estos grupos de personas con escasos recursos económicos. Estas viviendas de interés social son construidas en serie; tienen un área aproximada que varía de 30 hasta los 80 metros cuadrados, con diseños estructurales y arquitectónicos parecidos entre sí, basados en las condiciones mínimas del reglamento de construcción vigente en la zona (Trujillo et al., 2010).

Una vivienda, casa prefabricada o modular son aquellas viviendas construidas en un entorno industrializado, las cuales tienen ensambladas la mayor parte de sus elementos y solo necesita ser ubicada en un espacio para su correcta organización, estas viviendas pueden tener una o varias secciones (Jiménez, 2012).

Actualmente, los problemas ambientales ocupan la agenda internacional, entre los que destacan la contaminación del agua y degradación del suelo; y siendo el poliestireno expandido (EPS) uno de los materiales que se producen en grandes cantidades, lo que lo convierte en un material con un potencial altamente aprovechable, especialmente para la industria de la construcción, sin embargo, no hay gran campo de acción para éste como un agregado verdaderamente funcional para concretos estructurales, que soporten grandes cargas, debido en gran medida a sus pobres propiedades mecánicas y existen aún menos estudios que nos hablen de cómo utilizar los desechos producidos por EPS (López, 2013).

Desde su aparición, el concreto ligero se ha obtenido mediante diversas metodologías, entre las cuales se puede mencionar el uso de espumas ligeras o el remplazo total y parcial de los áridos convencionales por áridos de baja densidad (Liu N. y Chen, 2014).

Es evidente que el uso del EPS en la construcción no es nuevo, sin embargo lo que se pretende con este proyecto es implementar el EPS reciclado en sustitución del agregado grueso y con ello proporcione una mayor ligereza a los paneles para muros de carga y divisorios en viviendas y al mismo tiempo reducir los desechos que el EPS produce; existen diversos artículos donde se describen como se ha intentado hacer esto, con resultados no muy satisfactorios desde el punto de vista de la resistencia.

El objetivo del proyecto es reciclar EPS y con ello reducir las desventajas, debidas al exceso de peso, y fabricar paneles ligeros ecológicos (Figura 1) para emplearse en viviendas modulares (figura 2).



Figura 1. Esquema del Panel de concreto Ligero



Figura 2. Prototipo de Vivienda Modular

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Debido al carácter ecológico que este proyecto abarca, se parte desde este enfoque mediante la recolección del material a reciclar en cualquier presentación o forma, en este caso, poliestireno expandido. Posterior a la recaudación de EPS, este fue sometido a un proceso de remoción de material ajeno al que interesa, alejando así cualquier materia que pueda influenciar en el desempeño y características del concreto aparte de las deseadas por el efecto mismo del EPS. Finalmente el EPS es licuado para obtener las partículas que se necesitan en la fabricación del concreto ligero (Figura 3).



Figura 3. Proceso de obtención de las perlititas de EPS reciclado

Para la realización de las dosificaciones se toma como base la de un concreto con resistencia de 150 kg/cm^2 de acuerdo a lo establecido por el IMCYC (2011) realizando los ajustes pertinentes, como es el caso de la sustitución del agregado grueso por el de EPS reciclado.

Se procedió a elaborar cilindros de concreto ligero de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) en específico la NMX-C-159-ONNCCE-2004, que es la de “Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio”, los cuales fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días respectivamente (Figura 4), apegándose a los procesos de la norma, NMX-C- 109-

ONNCCE-2010, “Cabeceo de especímenes cilíndricos” y la NMX-C-083 ONNCCE-2002 “Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto”.(IMCYC, 2011)



Figura 4. Cilindros de concreto Ligero ensayados a 7, 14 y 28 días

Después de conocer la resistencia de diseño se procedió a la elaboración de paneles ligeros de acuerdo a una propuesta arquitectónica de vivienda modular, elaborando paneles con dimensiones 0.60 x 1.20 x 0.08 metros, reforzadas con malla de gallinero (Figura 5), los cuales fueron ensayados mediante la aplicación de cargas cíclicas, para conocer su resistencia a la flexión (Figura 6).

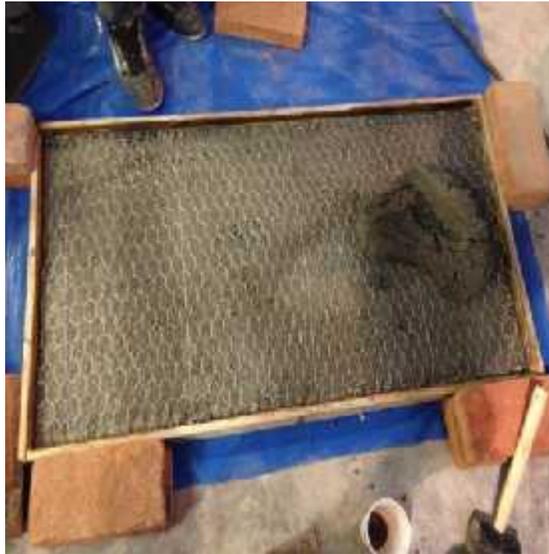


Figura 5. Elaboración de paneles



Figura 6. Ensayo de paneles aplicando cargas cíclicas

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los especímenes de concreto ligero fueron ensayados en el laboratorio de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a las normas establecidas por el ONNCCE, obteniéndose los siguientes resultados: El promedio de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto ligero fue de 120 kg/cm^2 , el cual es un buen resultado si lo comparamos con el peso volumétrico obtenido que fue de 1650 Kg/m^3 en relación con el del concreto convencional que es de 2200 kg/m^3 . En cuanto a los paneles de concreto ligero el resultado obtenido ante ciclos de carga y descarga de carga viva fue en promedio de 400 kg/m^2 , lo cual es mayor a los 170 kg/m^2 que marca para sistemas de losa de entrepiso, el reglamento de construcción de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas demuestran que el uso de material reciclado para aligerar el concreto cumple con lo establecido por las normas mexicanas, por lo que puede emplearse para elaborar concreto ligero con buena resistencia a la compresión a bajo peso volumétrico. Así también, se puede concluir que los paneles ligeros pueden ser empleados como sistemas de bovedilla para la implementación de losas aligeradas, con capacidades de carga superiores a elementos convencionales que se usan en este tipo de sistemas de piso, garantizando la seguridad establecida en las normas a un costo bajo y con un peso volumétrico ligero.

La construcción de viviendas modulares usando paneles ligeros es una solución ecológica debido a que se recicla uno de los materiales que menos se reciclan en Tuxtla, así también al ser elementos ligeros disminuyen la carga transmitida al suelo disminuyendo el tamaño de la cimentación y también se tiene una vivienda sismoresistente.

.

.

5. REFERENCIAS

Liu N., & Chen, B. (2014). Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Science Direct* , 227 - 232.

Jiménez, G. (2012). Viviendas prefabricadas modulares con el Sistema Steel Framing para el área metropolitana de la Ciudad de México. México, D.F.: UNAM.

Trujillo, L., Orduña, A., & Licea, R. (2010). Análisis experimental de un sistema constructivo innovador para vivienda económica en zonas sísmicas. *Sismica*.

López, M. (2013). Evaluación de los procesos de corrosión en concretos aligerados con EPS expuestos en medios simulados y reales. Xalapa, Veracruz.

IMCYC (2011). Posibilidades del concreto. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 13. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto *ment*”, *Cement and Concrete*, V. 41, pp.750–763.

Comportamiento del acero de refuerzo embebido en cementos híbridos alcalinos.

M. I. Escamilla Moya¹, A. López Miguel², M. Rendón Belmonte², A. Torres Acosta²

¹Instituto Tecnológico Superior de Irapuato extensión San José Iturbide, Irapuato, México.

²Instituto Mexicano del Transporte.

Autor de contacto: A. Torres Acosta. (atorres@imt.mx)

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que la corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas de la prematura degradación de las estructuras de concreto reforzado, razón que ha impulsado a la exploración de diferentes líneas de investigación en busca de la mejora de las propiedades de durabilidad de las estructuras y que favorezcan la disminución de la emisión de CO₂. Una alternativa altamente considerada es la potencialización del uso de cementos híbridos (CH) (Shi et. al. 2011; García et. al., 2013) que son cementos con bajos contenidos en Clinker, elevados contenidos de adiciones minerales y empleo de activador alcalino que puede ser líquido o sólido. Fernández et. al., estudiaron el comportamiento del acero estructural embebido en morteros de cemento Pórtland (CPO) y de cenizas volantes activadas, reportan que los aceros presentan un comportamiento similar al observado en morteros base CPO (Fernández et. al., 2010). Existen trabajos donde se adoptan diferentes técnicas de activación de mezclas cemento Pórtland/cenizas volantes y muestran que la presencia de cenizas volantes en estos casos puede mejorar la resistencia del acero a la corrosión (Bastidas et. al, 2008). Saraswathy concluye que el acero embebido en las mezclas de CPO conteniendo ceniza volante activada mejoran la resistencia a la corrosión hasta un máximo de 25 veces (Saraswathy et. al, 2006). Otros investigadores reportan que morteros de cenizas volantes activadas pasivan a los refuerzos de manera similar a los morteros de cemento Pórtland (Miranda et. al., 2005). Sin embargo, a la fecha los estudios son poco, considerando importante enriquecer la información para lograr una mejor comprensión del comportamiento del acero en cementos híbridos alcalinos. En esta investigación, se estudió el acero de refuerzo embebido en cementos base ceniza volante e hidratados con disolución alcalina, considerando que podrían ser una opción para la conservación del acero de refuerzo, limitando la corrosión del acero por la alta alcalinidad y posición en el diagrama de Pourbaix (Pourbaix, 1974).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se evaluaron varillas de acero al carbono de 10.5 cm de largo y 0.31 cm de diámetro (evaluadas en su estado de recepción) en tres cementos: 1) CPO 40 (100% cemento portland ordinario clase 40), 2) 80-20 (80% ceniza volante y 20% de CPO 40) y 3) 70-30 (70% ceniza volante y 30% de CPO 40) hidratado con agua de grifo el primer cemento y disolución alcalina (pH ~11.3) los restantes. La fabricación de las muestras de pasta de cemento de dimensiones 5.5x8x2 cm se realizó conforme a la Norma ASTM C305. Por cada cemento se obtuvieron dos muestras, cada una con dos varillas embebidas. Previo a la fabricación de las pastas de cemento, se aislaron con epóxico y cinta aislante 2.5 cm de cada varilla de refuerzo para evitar posibles micro celdas, además de embeber una barra de grafito que se utilizó como electrodo de referencia (ER) para obtener la densidad de corrosión (i_{corr}). Como contra electrodo (CE) se utilizó una malla de acero inoxidable colocada en el perímetro de la muestra de manera conjunta con una esponja húmeda, ver Figura 1. Para la medición de potenciales de corrosión, se utilizó un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄. Todas las mediciones se realizaron en condición ambiente y en el caso de los potenciales de corrosión fueron referidos vs electrodo Cu/CuSO₄. Posterior a su fabricación se mantuvieron en período de curado por 28 días (ambiente húmedo) y posterior a este tiempo se mantuvieron en condición sin humedad hasta alcanzar la pasivación del acero de refuerzo. Una

vez logrado este estado fueron sometidas a ciclos de mojado con agua de mar natural y secado. Las mediciones que se reportan son potencial (E_{corr}) y densidad de corriente de corrosión (I_{corr}).

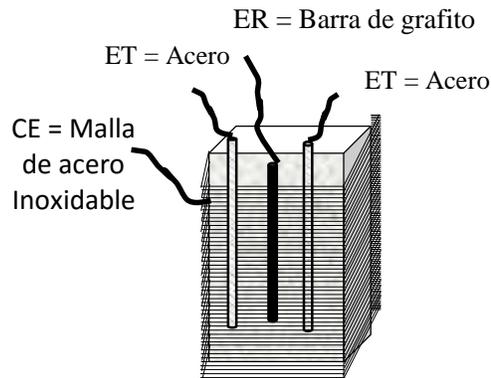
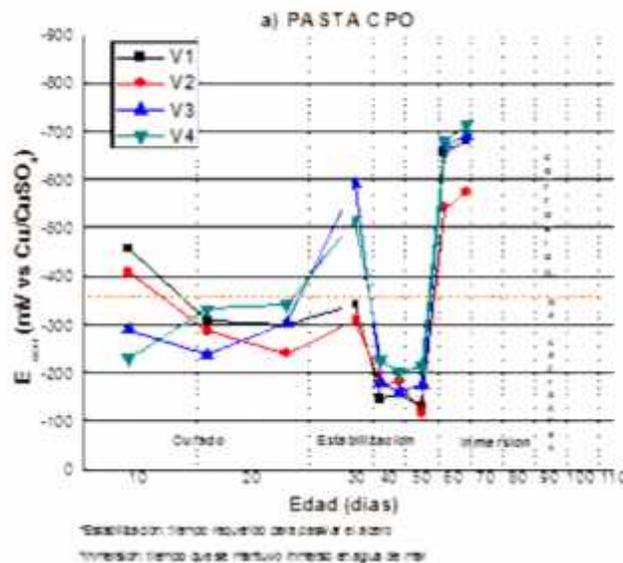


Figura 1. Celda electroquímica de evaluación de pastas de cementos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Potencial de corrosión (E_{corr})

Las Figuras 2: a b y c, muestran los valores de potencial de corrosión (E_{corr}) del acero de refuerzo en los tres cementos: CPO, 70-30 y 80-20 durante el período de curado (28 días), período de estabilización del potencial para alcanzar valores de pasividad o no corrosión del acero (condición sin humedad y aislada del ambiente) y condición de inmersión en agua de mar natural. Por el avance de la investigación, a la fecha solo se reporta a la primera inmersión de las muestras, pero las condiciones de inmersión y secado continuarán.



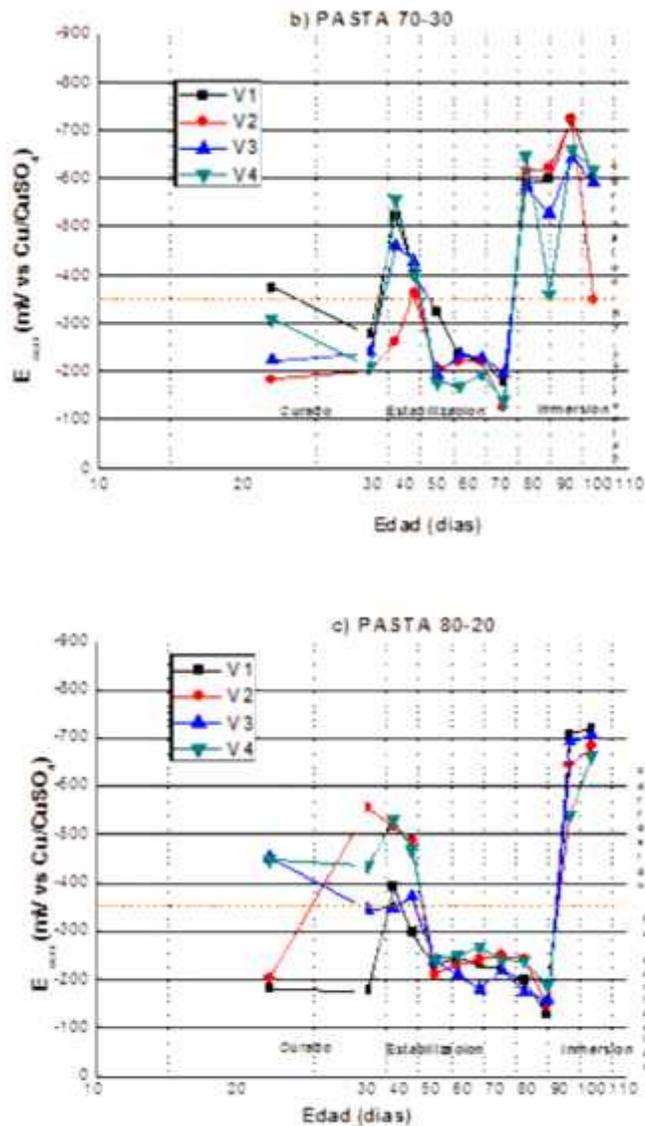


Figura 2. Resultados de potencial de corrosión (E_{corr}) del acero de refuerzo embebido en pastas de cemento a) CPO, b) 70-30 y c) 80-20.

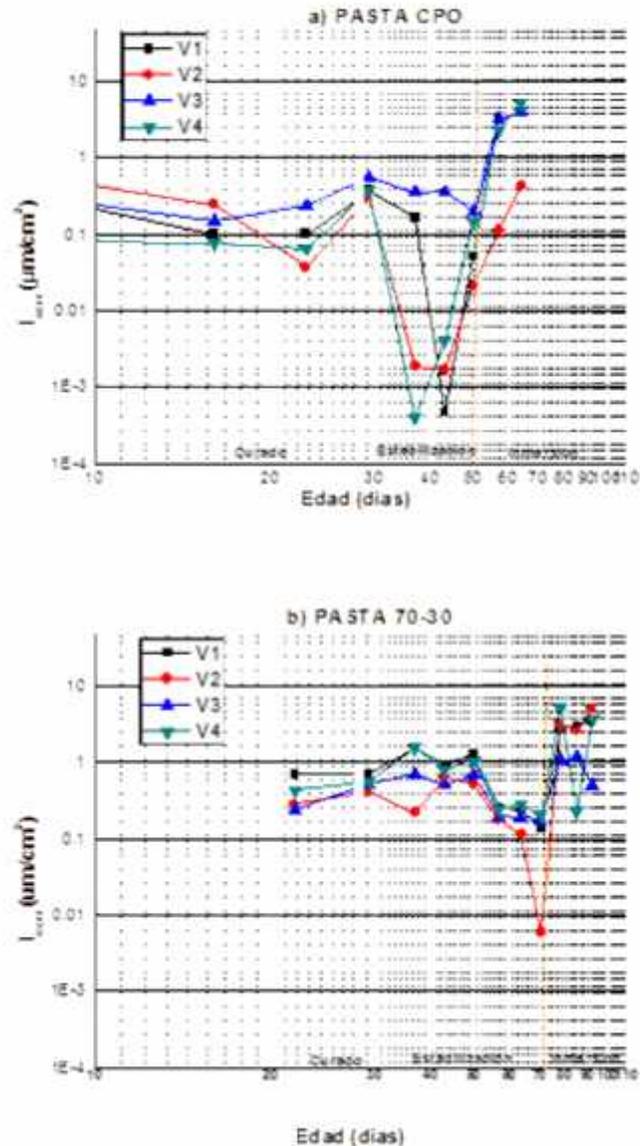
La Figura 2a muestra que los potenciales de corrosión del acero embebido en cemento CPO después de 9 días de finalizar el período de curado oscilaron en el orden de -250 mV vs Cu/CuSO₄ mientras los cementos 70-30 y 80-20 después de 22 días se observaron valores de este orden (Figuras 2b y 2c). Se consideran valores de -250 mV vs Cu/CuSO₄ porque la Norma ASTM C876 indica pasivación del acero en este valor.

Una vez que todas las varillas mostraron valores de potencial de pasivación, se sumergieron en agua de mar natural, ocasionando desplazamiento de potencial de valores del orden de -200 mV a valores más negativos de -500 mV vs Cu/CuSO₄, valores que de acuerdo a la Norma ASTM C876 indica corrosión del acero.

3.2 Densidad de corrosión (i_{corr})

Las Figuras 3: a, b y c muestran los valores de densidad de corrosión (i_{corr}) del acero de refuerzo embebido en los tres cementos: CPO, 70-30 y 80-20 durante el período de curado, período de estabilización e inmersión en agua de mar. Se observa que aun cuando las varillas (4 por cemento) estuvieron embebidas en el mismo cemento (CPO, 70-30 y 80-20) los valores difirieron entre ellas, desde el inicio del monitoreo se notó que su valor de i_{corr} era diferente.

Considerando lo anterior, el análisis de i_{corr} se realizó por varilla.



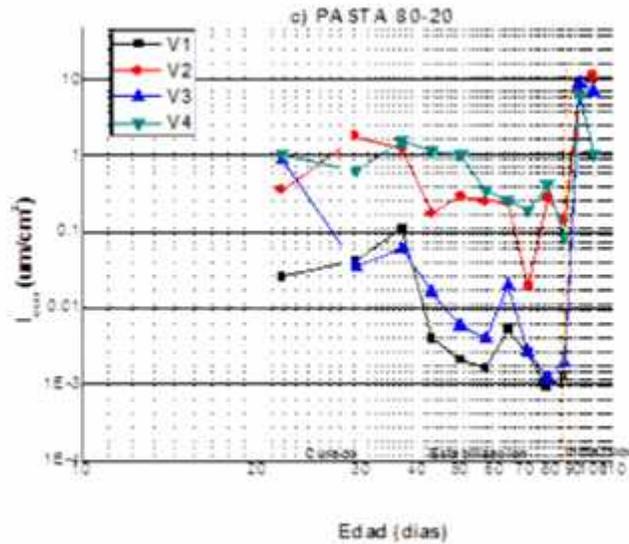


Figura 3. Resultados de densidad de corrosión (i_{corr}) del acero de refuerzo embebido en pastas de cemento a) CPO, b) 70-30 y c) 80-20.

La varilla 1 (V1) embebida en CPO previo a la inmersión en agua de mar mostró valores de i_{corr} del orden de 0.05 y durante el período de inmersión incrementó a $3.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 3.85$); la V2 varió de 0.02 a $0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 0.38$), V3 de 0.2 a $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 3.8$) y V4 de 0.1 a $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 4.9$).

En el caso de las varillas embebidas en cemento 70-30 el comportamiento fue el siguiente: V1 varió de 0.13 a $3.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 3.37$), V2 de 0.05 a $4.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 4.85$), V3 de 0.18 a $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 0.32$) y V4 de 0.19 a $3.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 3.51$).

Por último para el cemento 80-20, la V1 incrementó de 0.001 a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 9.9$), V2 de 0.14 a $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 10.8$), V3 de 0.001 a $7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 6.9$) y V4 de 0.08 a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{corr}= 0.92$). Los incrementos estimados de i_{corr} descritos se muestran en la Figura 4.

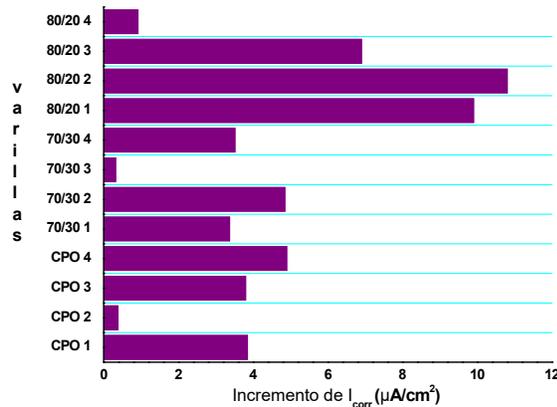


Figura 4. Resultados de incremento de densidad de corrosión (i_{corr}) de cada varilla embebida en pastas de cemento CPO, 70-30 y 80-20.

A partir de la Figura 4, se valora que las varillas que tuvieron mayor incremento de densidad de corrosión al tiempo evaluado corresponden a las varillas embebidas en el cemento 80-20. De manera adicional se calculó el promedio del incremento de la i_{corr} obtenida para cemento y se dedujo que el cemento 80-20 tuvo un $i_{\text{corr promedio}} = 6.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, seguido de CPO con $i_{\text{corr promedio}} = 3.23 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y finalmente 70-30 con $i_{\text{corr promedio}} = 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las mediciones aún son pocas, es necesario continuar con el monitoreo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a la fecha, indican que las varillas de acero embebidas cemento 80-20 presentan mayor nivel de corrosión respecto a los cementos CPO y 70-30, quienes presentan un comportamiento comparable entre sí. Sin embargo, es necesario continuar con el estudio para determinar de manera contundente el comportamiento del acero embebido en estos cementos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Mexicano del Transporte y a la Universidad Marista de Querétaro por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Bastidas, D. M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., González, J.A., (2008), “*A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars*”, Corrosion Science V. 50, No. 4, pp. 1058–1065.
- Fernández-Jiménez, A., Miranda, J. M, González, J. A., Palomo, A., (2010), “*Steel passive state stability in activated fly ash mortars*”, Materiales de Construcción, V. 60, No. 300, pp. 51-65.
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., (2013), “*Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends*”, Cement and Concrete, V. 52, pp. 112–122.
- Miranda, J. M., Fernández-Jiménez, A., González, J. A., Palomo, A., (2005), “*Corrosion resistance in activated fly-ash mortars*”, Cement and Concrete, V. 35, pp.1210–1217.
- Pourbaix, M., (1974), “*Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*”. (Houston, Texas: National Association of corrosion Engineers), p. 312.
- Saraswathy, V., Song, H. W., (2006), “*Electrochemical Studies on the corrosion performance of steel embedded in activated fly ash blended concrete*”, Electrochemical Acta, V. 51, pp. 4601-4611.
- Shi, C., Fernández Jiménez, A., Palomo, A., (2011), “*New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland Cement*”, Cement and Concrete, V. 41, pp.750–763.

Calibración de un modelo numérico del ensaye a compresión diagonal en muretes de mampostería utilizando algoritmos genéticos.

J.H. Castorena-González¹, P. Cervantes-Leal¹, J.M. Leal-Graciano², J.I. Velázquez-Dimas², J.J. Pérez-Gavilán³

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa,

²Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa.

³Instituto de Ingeniería, UNAM.

Autor de contacto: J.H. Castorena-González (jhcg@uas.edu.mx)

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mampostería (piezas de tabique o block unidos con mezcla de mortero) continúa siendo utilizada como material de construcción, sobre todo por su economía. En edificios de mediana y gran altura se utiliza en conjunto con marcos de concreto reforzado, ya sea confinado o como muro de relleno [1,2]. La diferencia entre un muro confinado y uno de relleno es que, en los marcos confinados el muro se construye primero y luego el marco, logrando con ello una mejor unión entre mampostería y marco, en cambio en los muros de relleno, éstos son construidos una vez que ya está disponible el marco de concreto reforzado, Figura 1.

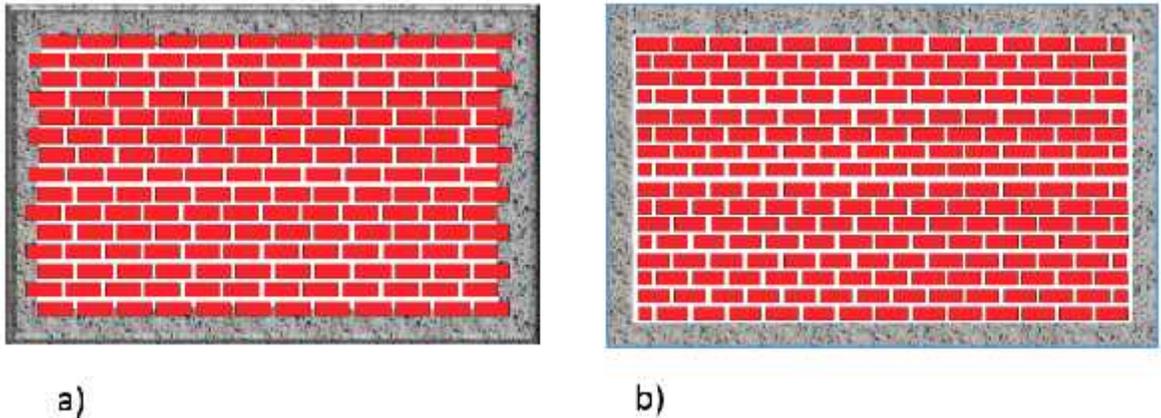


Fig. 1. a) Mampostería confinada, b) mampostería de relleno.

Cuando la mampostería es utilizada como muro de relleno incrementa la rigidez ante carga lateral de los marcos reforzados, efecto que no se considera en el análisis y diseño de los marcos debido, entre otros factores, a la complejidad en la determinación de las propiedades mecánicas del muro. La determinación experimental de estas propiedades mecánicas puede realizarse en varias formas: i) ensayos sobre los componentes individuales (piezas, mortero), ii) Pruebas sobre especímenes pequeños ensamblados por pieza-mortero, conocidos como pilas, y iii) ensayos sobre paneles o muretes; Figura 2. Por otro lado, para predecir la rigidez y resistencia de este tipo de marcos existen varios modelos: *micro-modelos*, donde se consideran la geometría y propiedades mecánicas de cada uno de los materiales componentes del sistema, y los *macro-modelos*, que predicen el comportamiento del sistema como un todo [3]. El caso del micro-modelo se considera como métodos de análisis muy complejo y por lo regular se llevan a cabo utilizando el método de elementos finitos, la ventaja es que se pueden estudiar a detalle todos los posibles modos de falla. En el presente trabajo se utiliza un micro-modelo para ensayos a compresión diagonal en muretes de mampostería a base de piezas de block. Para las piezas se considera que el criterio de falla es el de Drucker-Prager, y para modelar el mortero se considera una falla Bilineal, ambos materiales son implementados en el software de elementos finitos ANSYS, y cuyas constantes se obtendrán a partir de algoritmos genéticos. Los resultados que se obtengan son comparados con resultados de ensayos experimentales.

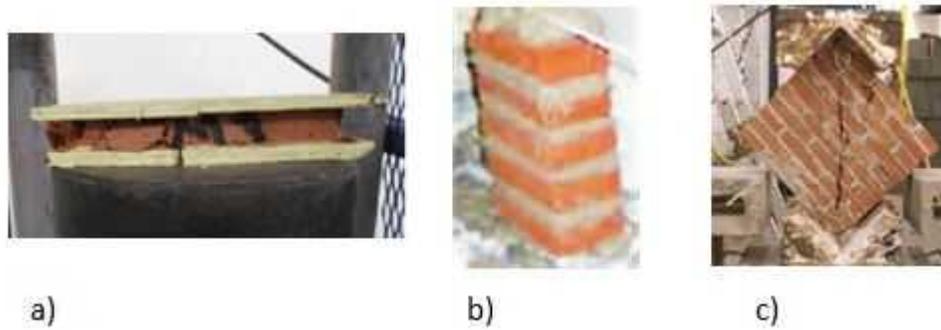


Fig. 2. a) Pieza individual a compresión, b) Pila y c) murete a compresión diagonal.

METODOLOGÍA

2.1 Modelo de Elementos Finitos:

Para el modelo numérico se utilizan elementos tridimensionales SOLID45 definidos por ocho nudos, con tres grados de libertad en cada nudo: traslación en las direcciones x, y y z . La malla de elementos finitos se muestra en la Figura 3-a). Para cada panel de mampostería se utilizan 1156 elementos, de los cuales 960 son para las piezas y 196 para modelar la junta de mortero. De acuerdo al tipo de material seleccionado para el modelado un tamaño apropiado para los elementos es de dos veces la dimensión de la junta en las piezas, ya que una malla más fina conduce a un elemento finito débil y por consiguiente a una falla prematura, cuyo análisis no reflejaría la capacidad real de la estructura. Respecto a los materiales utilizados, en el caso del mortero se utiliza un modelo de plasticidad bilineal, que considera endurecimiento por deformación, y se muestra en la Figura 3-b). Los valores de las constantes C_j , E_m y E_{tm} se obtendrán de la calibración según los valores de ciertos parámetros (α y β) al aplicar algoritmos genéticos.

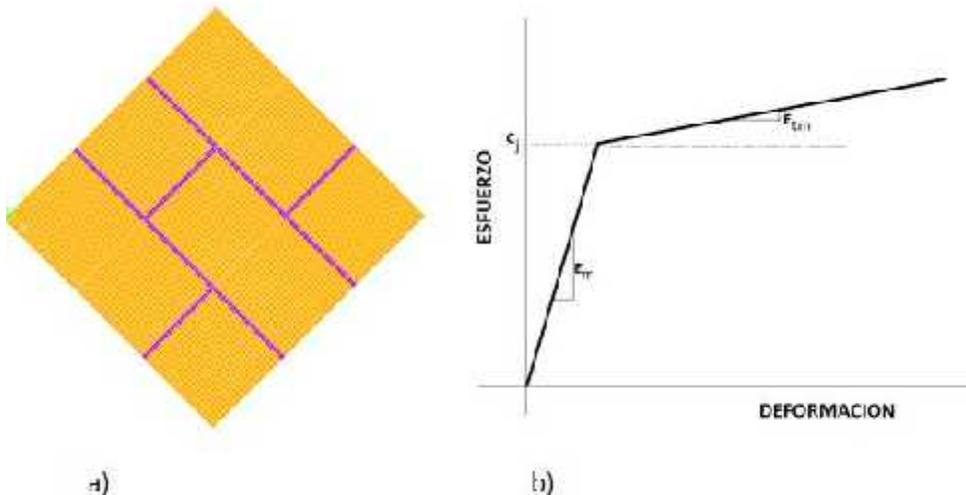


Fig. 3. a) Mallado de elementos finitos, b) modelo bilineal para el mortero.

Para el caso de las piezas se utiliza el criterio de Drucker-Prager, el cual incorpora endurecimiento por deformación isotrópica y con ello representar en cierta medida el

comportamiento dúctil de materiales frágiles, como el concreto reforzado por ejemplo. Los fundamentos teóricos para este criterio se pueden encontrar en la literatura [4].

Para el presente trabajo, se mostrará su aplicabilidad en la mampostería, evaluando por medio de Elementos Finitos con el software ANSYS. Los datos necesarios para representar a Drucker-Prager son: cohesión (unidades de esfuerzo), ángulo de fricción (grados) y dilatancia.

2.2 Algoritmos Genéticos:

(AG's): Un algoritmo genético es un proceso de optimización inspirado en la teoría de evolución de Darwin. Desde los años 90's, los AG's han sido aplicados al campo de la ingeniería estructural [5,6,7]. Este método no garantiza la solución óptima del problema, sin embargo hace posible la identificación de un conjunto de soluciones óptimas cercanas a la solución real. En este trabajo se utiliza la forma más simple de los AG's para calibrar los parámetros que representan una curva típica esfuerzo-distorsión de un murete a compresión diagonal, Figura 4.

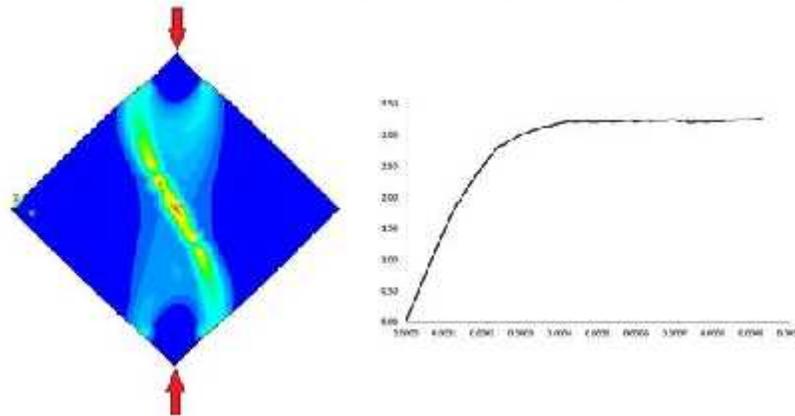


Fig. 4. a) Patrón de grietas en muretes a compresión diagonal y curva típica cortante-distorsión. El modelo teórico con el que se puede representar la curva cortante-distorsión es el dado en la ecuación (1).

$$V = V_m \left(\frac{\gamma}{\gamma_u} \right)^\alpha e^{\beta \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_u} \right)} \quad (1)$$

V representa el esfuerzo cortante calculado, V_m es el esfuerzo cortante máximo, γ es la distorsión angular, γ_u representa la distorsión angular última. Los parámetros α y β son constantes con las cuales se ajustará la curva teórica a la experimental. γ_u y V_m se obtienen de la curva experimental (ensaye a compresión diagonal), mientras que α y β son obtenidos con AG's. Todo procedimiento de AG's utilizan los mismos pasos: definición de la población, codificación, población inicial, reproducción, cruzamiento, mutación y generación de nuevas poblaciones. En la definición de la población y su codificación, cada uno de los parámetros α y β de la curva teórica será un número binario (por ejemplo 1101) y que va a representar un gen. El valor real de dichos parámetros será obtenido mediante la ecuación (2):

$$Z = x_{min} + \frac{D(x_{max} - x_{min})}{2^M - 1} \quad (2)$$

De la ecuación (2), x_{min} y x_{max} son los valores límite mínimo y máximo considerados en el intervalo para el parámetro Z . D es el valor decimal del termino binario para Z y M es la longitud de bits del gen. Para el presente estudio, se iniciará con un valor mínimo de 0.1 y un máximo de 0.9 para α y β , mientras que M tendrá un valor de 5, esto es, el número binario (0 0 0 0 0) corresponderá al límite inferior y (1 1 1 1 1) al límite superior. En AG's un individuo se forma por la unión de varios genes (en este caso dos genes: α y β), y cada individuo representará un punto en el espacio de estudio. Entonces una población es un grupo de N_i individuos en la i -ésima

generación. La población inicial, N_o , se genera aleatoriamente en los intervalos de estudio, entonces se procede a la selección, reproducción y mutación de los mejores individuos; esto es, los individuos con valores menores de error. Para llevar a cabo lo anterior, es necesario entonces definir una función de error que pueda ser utilizada para la selección, y se muestra en la ecuación (3).

En esta ecuación cada δ_j es un error relativo de alguna característica seleccionada de la curva experimental cortante-distorsión del murete ensayado, y que en este trabajo son tres: módulo de elasticidad (pendiente de la curva experimental en el origen), energía disipada (área bajo la curva) y el cortante máximo, V_m . El error relativo δ_j se obtiene de la ecuación (4).

$$F. E. = \frac{\sum_{j=1}^3 \delta_j}{3} \quad (3)$$

$$\delta_j = \frac{(\delta_{exp} - \delta_{teo})^2}{\delta_{exp}^2} \quad (4)$$

Así, dependiendo del error, sólo los $N_i/2$ individuos (padres) se conservan para generar la próxima población. Para la reproducción y cruzamiento los padres se duplican y se seleccionan parejas aleatoriamente para generar nuevos pares de descendientes (hijos) intercambiando parte de los genes de un padre con los genes de otro. Los puntos de cruzamiento se seleccionan aleatoriamente. Algunos de los descendientes pueden ser mutados al intercambiar el bit de un gen. La probabilidad de mutación seleccionada en este trabajo fue de 0.01. A esta nueva población generada se le determina de nuevo el error, repitiéndose el proceso hasta cierto límite de generaciones, que en nuestro caso fue de 150 generaciones, con poblaciones de 50 individuos.

2.3 Ensayes experimentales:

Para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de rigidez se construyeron 10 muretes de un mismo productor de piezas de block de 12 x 20 x 40 cm y mortero tipo III. Cada murete estuvo conformado en su base por pieza y media y su construcción se realizó según los procedimientos recomendados en las NTCMRCDF [8] y en el anteproyecto APROYEC-NMX.C44-ONNCCE-2010. En la Figura 5 se muestran los resultados de las curvas cortante-distorsión angular para cada uno de los muretes, las cuales fueron utilizadas para calibrar el modelo numérico propuesto en este trabajo. Nótese la diferencia entre las curvas, siendo que se trata de los mismos blocks y mortero.

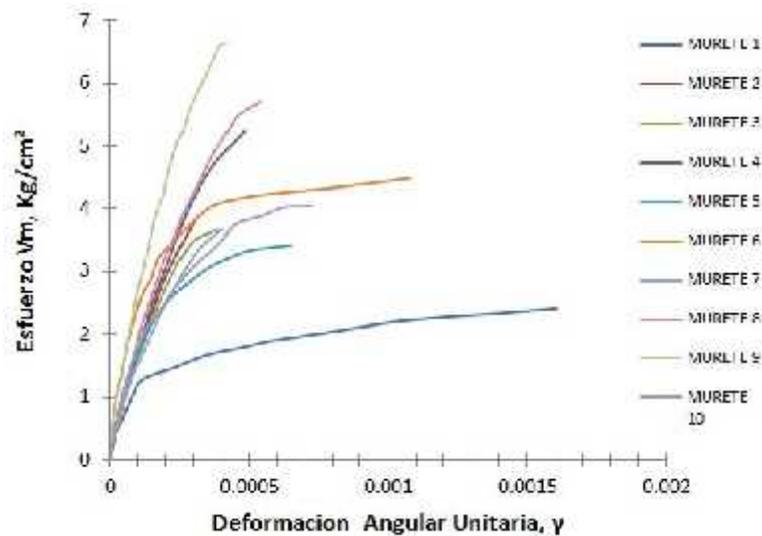


Fig. 5. Curvas esfuerzo cortante-deformación angular típicas de muretes ensayados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Algoritmos Genéticos.

Utilizando valores iniciales de 0.1 y 0.9 para α y β , y la correspondiente a una curva típica esfuerzo cortante-distorsión angular (murete 10), se llevó a cabo el proceso de AG's y se evaluó la variación de la función de error con respecto al número de generaciones. El error más pequeño entre los 50 individuos fue considerado como la mejor solución en cada generación.

En la Figura 6 se muestra la variación de *F.E.* (Ec. 3) con relación al número de generaciones usadas en el análisis. Como se puede observar, un incremento en el número de generación, en este caso 500 generaciones, no afecta el valor de F. E.

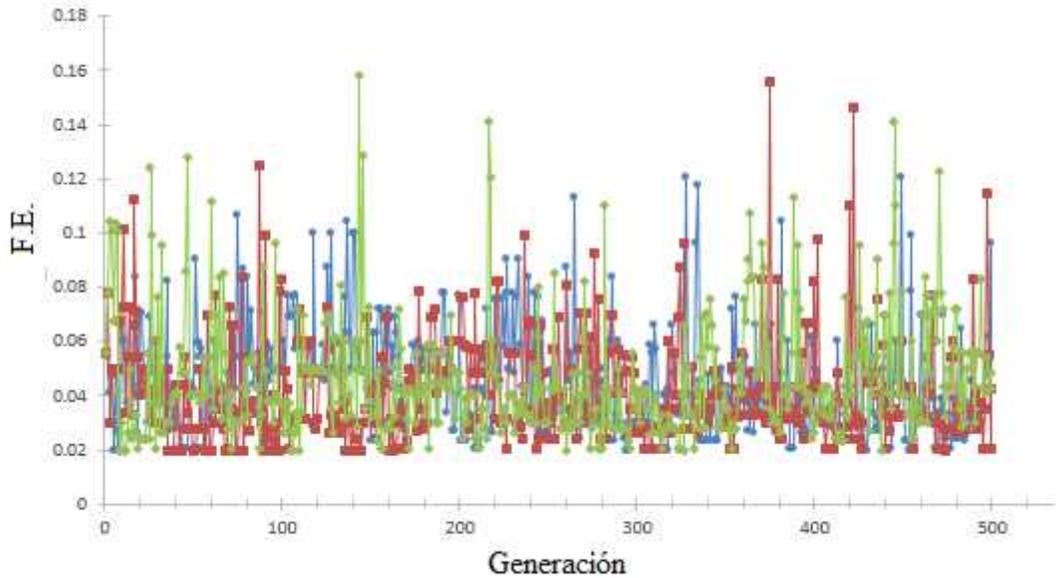


Fig. 6. Variación de F.E. con relación al número de generación.

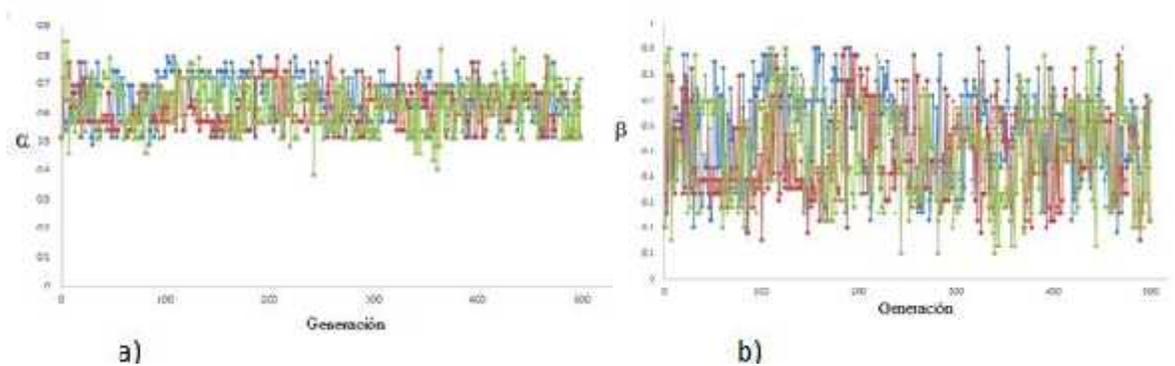


Fig.7 Variación de los parámetros con respecto al número de generación.

De igual manera, se observa en la Figura 7 que los parámetros α y β no varían con el número de generación, pero el valor de α tiende a un valor entre 0.5 y 0.75, mientras que β no varía significativamente, teniendo valores entre 0.25 y 0.85. Con éstos nuevos valores se procede a realizar otro análisis, encontrando que la curva experimental dada queda caracterizada con valores de α entre 0.55 y 0.75, y β entre 0.4 y 0.65, con 150 generaciones y una población de 50 individuos. En la Figura 8 se muestran resultados con valores $\alpha=0.595$ y $\beta=0.464$. Los datos de la curva experimental son $V_m=4.015 \text{ kg/cm}^2$ y $\gamma_u=0.000689$.

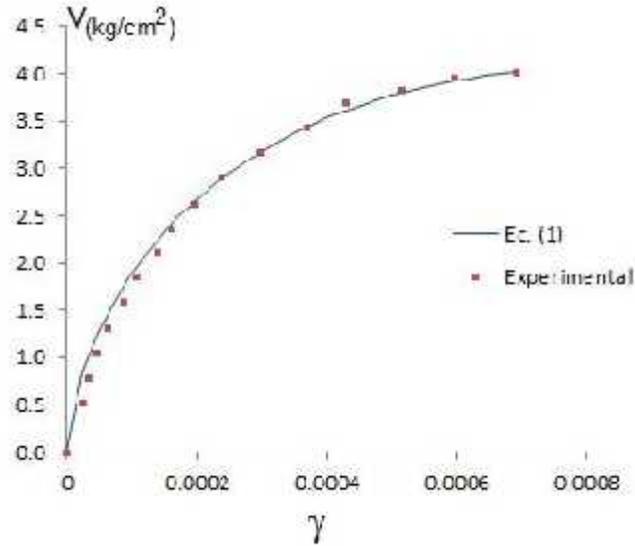


Fig. 8. Comparación de resultados experimentales y numéricos, para $\alpha= 0.595$ y $\beta=0.464$.

3.2 Elementos Finitos:

Una vez obtenidas las constantes α y β , se procede a encontrar la relación entre los parámetros del modelo propuesto (Ec. 3), y las constantes de los materiales que conforman la mampostería: block y mortero; esto es, cohesión (C_t), ángulo de fricción (ϕ) y dilatancia (Drucker-Prager, blocks) y C_j , E_{tm} (Bilineal, mortero). Se realizaron los ensayos numéricos para cada una de las 10 curvas experimentales, y de los cuales fue posible identificar cómo afecta el valor de algunas de las variables en el mecanismo de falla del ensaye a compresión diagonal, como se muestra en la Figura 9.

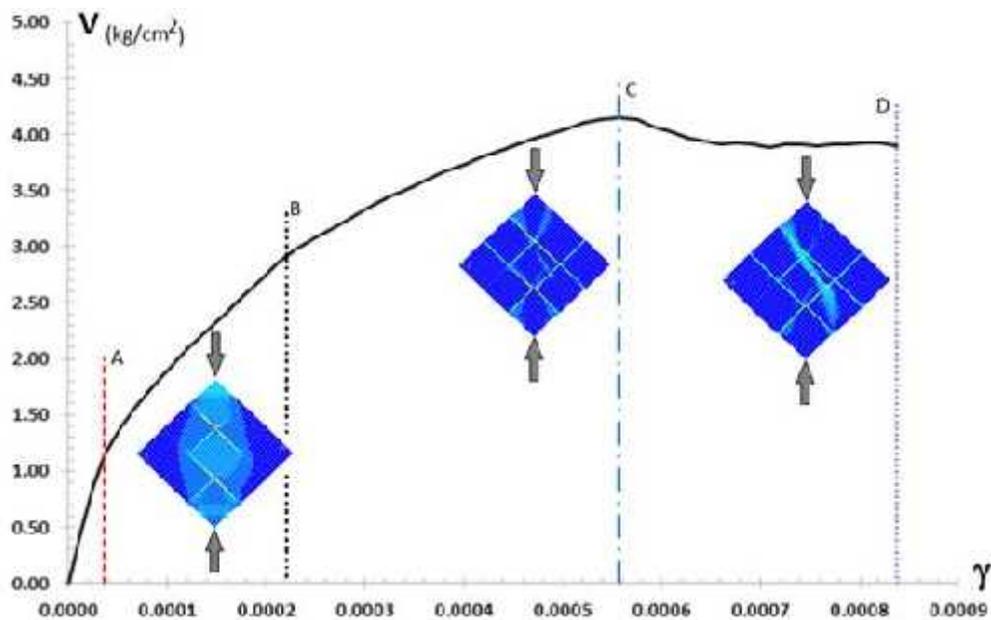


Fig. 9. Patrón de falla en la mampostería durante un ensaye típico a compresión diagonal.

De acuerdo a los resultados con elementos finitos, en la curva cortante-distorsión angular se distinguen dos zonas principales: desde el origen hasta la línea B, gobernada por la resistencia de la junta de mortero, y la zona B-D, que depende del material de la pieza. La zona de comportamiento lineal, desde el origen hasta la línea A, muestra que es el punto en donde la junta de mortero empieza a tener deformaciones plásticas, por lo que la constante que rige este valor es C_j . Para la zona entre las líneas A y B, el parámetro principal es el E_{tm} . La inclinación de la curva en el tramo B-C, depende del valor del ángulo de fricción y para la cohesión (C_t) se considera el cortante máximo que se obtiene de los ensayes.

CONCLUSIONES

Con los resultados encontrados en este trabajo se concluye que la utilización de los Algoritmos Genéticos forma parte de un método adecuado para la calibración de un modelo numérico de ensayes a compresión diagonal en muretes de mampostería, dando curvas cortante-distorsión angular aproximadamente iguales a los encontrados en pruebas de laboratorio. Un buen uso de los AG's para encontrar el rango de valores de los parámetros α y β , podría predecir el comportamiento de la mampostería de una forma más exacta, encontrándose las características que definen el material de las piezas de block y el mortero en las juntas para poder ser considerados en el análisis con elementos finitos, en particular, con el modelo de Drucker-Prager para las piezas y un modelo de plasticidad bilineal para el mortero. De esta forma, se concluye que el esfuerzo cortante máximo de la prueba a compresión diagonal en muretes es el valor de la cohesión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Sinaloa por su apoyo vía PROFAPI2014/045.

REFERENCIAS

- [1]. Alireza Mohyeddin, Helen M. Goldsworthy, Emad F. Gad (2013). FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading. *Engineering Structures* (51), pp. 73-78.
- [2]. C.A. Coello, A.D. Christiansen. (2000). Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms. *Computer and Structures* 75, pp. 647-660.
- [3]. Cavaleri, L., Papia, M., Maculoso, Di Trapani, F., Colajanni, P. (2013). Definition of diagonal Poisson's ratio and elastic modulus for infill masonry walls. *Materials and Structures*. Vol. 47, Issue 1, pp. 239-262.
- [4]. Chen WF. , 1982. *Plasticity in reinforced concrete*. McGraw-Hill Company.

- [5]. NTCM-RCDF-2004 (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.
 - [6]. Ricardo Perera and Ronald Torres, (2006). Structural Damage Detection via Modal Data with Genetic Algorithms. *J. Struct. Eng.* 132, pp. 1491-1501.
 - [7]. Rui Marques, Paulo B. Lourenco, (2014). Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis. *Engineering Structures* (64), pp. 52-67.
 - [8]. V.K. Koumoussis and S.J. Arsenis. (1998). Genetic Algorithms in Optimal Detailed Design of Reinforced Concrete Members. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (13), pp. 43-52.
- , pp.750–763.

Validación de un sistema instrumentado para la medición de resistividad de concreto.

Expositor: K. Chan Blanco¹, Responsable K. Chan Blanco¹, T. Pérez López¹, V. Moo Yam¹, J. Lagunas Jiménez², M. Sosa Baz¹.

¹Centro de Investigación en Corrosión, Av. Agustín Melgar s/n,

²Facultad de Ingeniería, Campus V, Predio s/n x Av. Ing. Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085. Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, Cam., México.

*E-mail Responsable de la investigación: al033390@uacam.mx

RESUMEN (letras de 13 pts. Times New Roman, negritas)

La corrosión del acero de refuerzo depende en gran medida de la resistividad del concreto, la cual está directamente relacionado con el agua contenida en la red de poros. El medio ambiente juega un papel importante en la resistividad, ya que tiene una correspondencia directa con la humedad relativa y la temperatura. En estos términos, el ingreso o salida de agua es favorecida o no por los parámetros ambientales. Este trabajo presenta el desarrollo y validación de un sistema de instrumentación para generar un mapeo de resistividad eléctrica en muestras de concreto usando electrodos embebidos. La comparación de los resultados contra un resistómetro comercial calibrado muestra los alcances del prototipo en cuanto a confiabilidad de lecturas e intervalo de medición.

Palabras clave Corrosión, resistividad de concreto, instrumentación.

Autor de contacto: Tezozomoc Pérez López (tezperez@uacam.mx)

1. INTRODUCCIÓN

La resistividad del concreto es una propiedad dependiente de diversos factores como son la composición y porosidad de la estructura así como de su interacción con el medio entre otros (Garzon, 2014). La medición de resistividad es una técnica no destructiva empleada para evaluar las estructuras de concreto; la cual permite monitorear la estructura de forma continua sin perturbar el material (Hornbostel, 2013). El mapeo de resistividad eléctrica representa una de las técnicas geofísicas ampliamente utilizados para la exploración del suelo, pero en los últimos años ha demostrado ser una herramienta de reconocimiento eficiente para controlar el estado de degradación de las paredes y cimientos de edificios (Abu-Zeid, 2010). En concreto, es un parámetro asociado de manera inversa a la penetración de iones cloruro por lo que es posible aproximar la calidad de la estructura con esta medición (Andrade, 1993; Polder, 1995). Debido a la naturaleza electroquímica del proceso de corrosión, el valor de la resistividad es fundamental una vez despasivada la varilla, puesto que es el medio de conducción eléctrica entre ánodos y cátodo en las micropilas de corrosión (Schiessl, 1988). De igual manera, es un criterio para seleccionar el método de protección catódica, remoción de cloruros y/o realcalinización si su valor tiende a ser uniforme o presenta dispersión (Hunkeler, 1992; Polder. Nuiten, 1992; Polder. Nuiten, 1994).

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Desarrollo de electrodos de medida.

Se desarrolló el modelado de la interfaz de la celda electroquímica de conductividad (Ramírez Muñoz. Casans Berga, 2005) del concreto con los electrodos embebidos. Se analizó su respuesta transitoria y permanente mediante la ecuación diferencial obtenida. En el programa Proteus se construyó la interface y acorde al análisis matemático se analizó la respuesta de la celda al modificar la resistividad de los electrodos. Se construyeron mediante maquinado mecánico, electrodos de grafito por sus características inerte y baja impedancia.

2.2 Desarrollo del sistema de instrumentación.

El sistema de medida se basa en el uso de un multiplexor y demultiplexor para la selección de la celda de medida a la cual se le aplicará el voltaje y se mida la corriente de salida resultante. Así como el uso de un cero resistencia para cuantificar la corriente.

2.2.1 Validación del instrumento de medición.

Para validar el sistema experimental de medición, se empleó el equipo comercial Nilsson 400, recientemente calibrado, el cual se utiliza para hacer mediciones de resistividad en suelo y concreto. Inicialmente se hizo la validación con morteros previamente fabricados con dos electrodos embebidos, expuestos en condiciones humedad y temperatura ambiental. El Resistometro Nilsson requiere de humectación previa del área de contacto para poder hacer las pruebas de resistividad, modificando la resistividad real del mortero. Mientras el prototipo desarrollado no requiere de esta humectación, y se optó por usar resistencias patrón para la validación del equipo. Los valores de resistencias de precisión empleadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resistencias patrón empleadas para la validación del prototipo.

Resistencias ()
1000000
680000
470000
300000
220000
100000
68000
47000
10000

2.3 Prueba de resistividad a diferentes porcentajes de humedad relativa (%HR)

Se construyeron diez probetas de concreto con una relación agua-cemento de 0.5 para evaluar la evolución de la resistividad a lo largo del tiempo. En estas probetas se embebieron los electrodos de grafito a una distancia entre ellos de 1.5 cm. Fueron curadas y posteriormente se secaron en un horno a 105°C durante 24h y se colocaron en cámaras de condiciones controladas, estas fueron acondicionadas para manejar humedades relativas de 25, 35, 45, 55,65 y 75 %HR por cámara.

3. RESULTADOS

El comportamiento modelado de la celda de la interfaz electrodo-concreto se presenta en la Figura 1, donde se puede visualizar un comportamiento transitorio y permanente. En el instante $t=0$ se puede determinar el valor de la resistencia del concreto (RC), y el valor de la resistencia de los electrodos (RE) para $t > 5$, como puede verse en la Fig.1. La impedancia del electrodo de medida tiene mucha influencia en el comportamiento de la respuesta y medición de la resistividad.

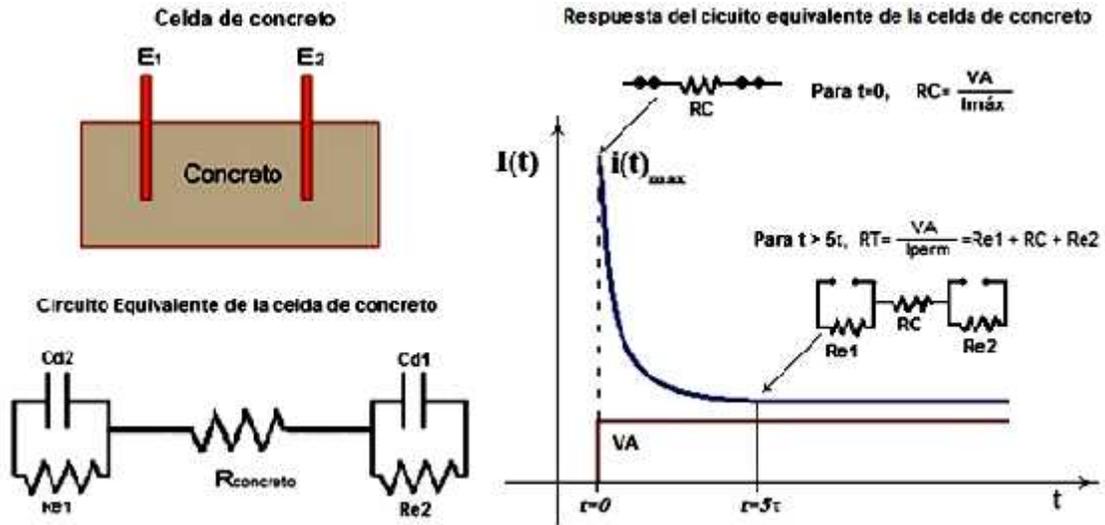


Figura 1.- Modelado de Celda de interfaz electrodos-concreto y su respuesta en DC.

La probeta de concreto construida, las ecuaciones y el circuito de medida se muestran en la Figura 2. Al graficar las señales de medida se comprueba que la resistencia de los electrodos al ser grande tiene influencia en la respuesta transitoria.

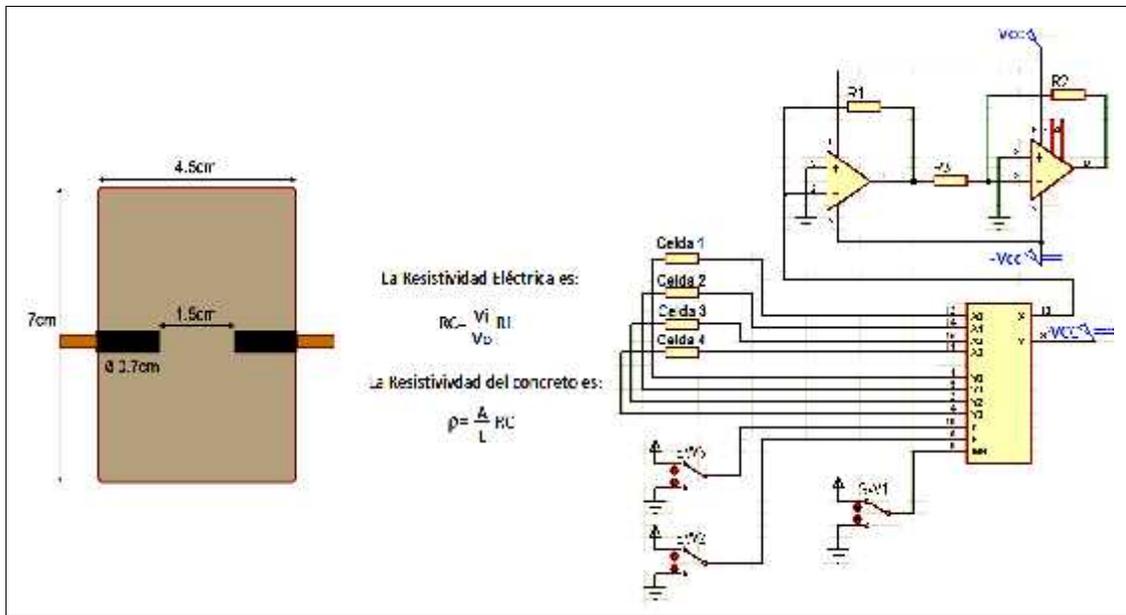


Figura 2.- Distribución de electrodos en la probeta, Fórmula y Circuito de medida.

La validación del sistema de medición de Resistividad desarrollado en este trabajo se realizó mediante el análisis del ajuste lineal entre la respuesta de Resistencia medida con el Resistómetro Nilsson (equipo comercial) o el prototipo desarrollado (Sistema de medición) y una Resistencia patrón.

- Ajuste lineal

Como se puede observar en la Figura 3, el valor de coeficiente de correlación ($r = 0.9999$) del prototipo y el valor ($r = 0.9998$) del Resistómetro Nilsson, es cercano a 1, sugiriendo que ambos equipos tienen respuestas similares en el intervalo evaluado.

- Análisis residual

Se muestra en la Figura 4 los residuos de la respuesta obtenida de la medición con las resistencias patrón para ambos equipos de medición. Los errores obtenidos del analisis residual muestra una menor valor para el prototipo desarrollado. Esto nos indica que la respuesta obtenida con mediciones de resistividad con el equipo desarrollado tienen una mayor linealidad comparada con lo obtenido con el Resistometro Nilsson.

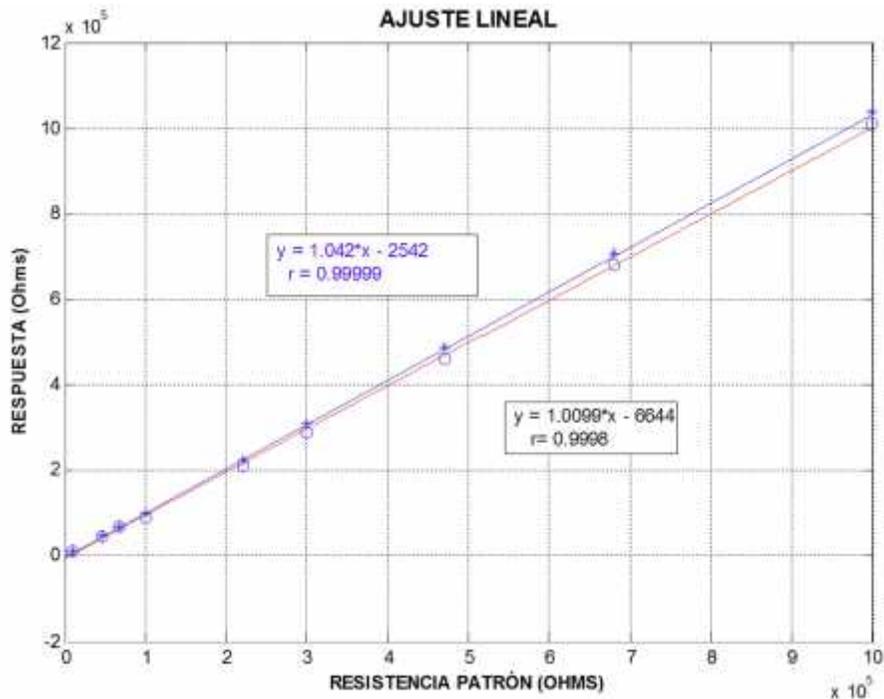


Figura 3.- Ajuste lineal de respuesta de sistemas de medición de Resistividad. (—)Línea de ajuste Resistometro Nilsson. (—)Línea de ajuste Sistema de medición de resistividad desarrollado.

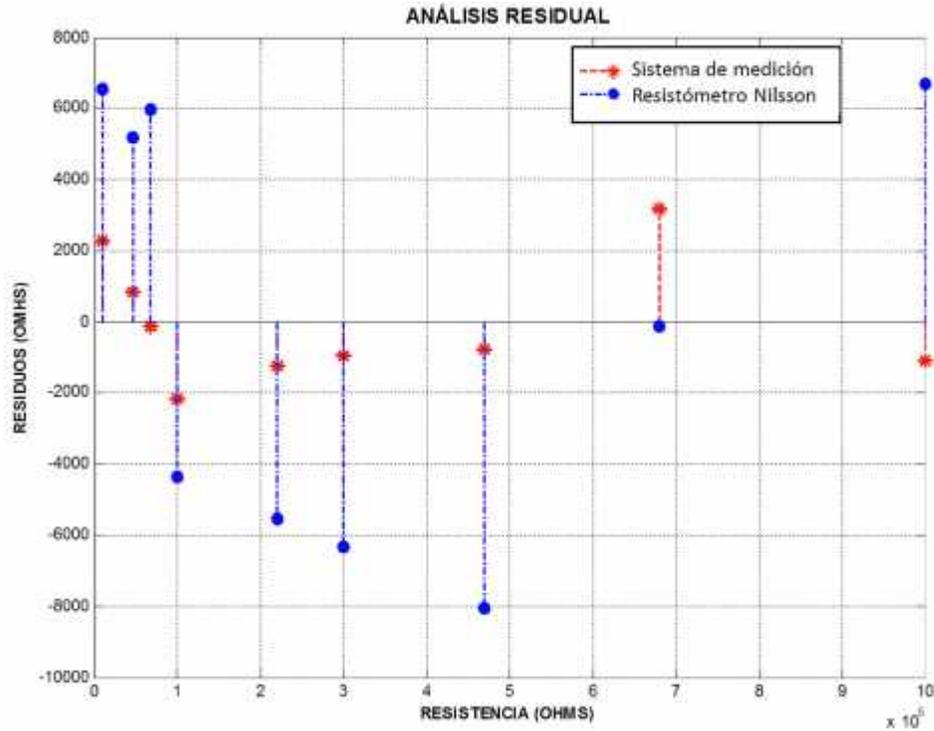


Figura 4.- Análisis residual de sistemas de medición de Resistividad

En la Figura 5 se muestra los diferentes valores de resistividad de las probetas (previamente seleccionadas) en función del contenido de humedad relativa ambiental (25-75%). Como pueden observarse la menor disminución en el valor de resistividad se presenta en probetas expuestas entre 25-45% de humedad relativa ambiental. Mientras en las probetas expuestas entre 45%-75%HR la disminución de resistividad fueron mayores.

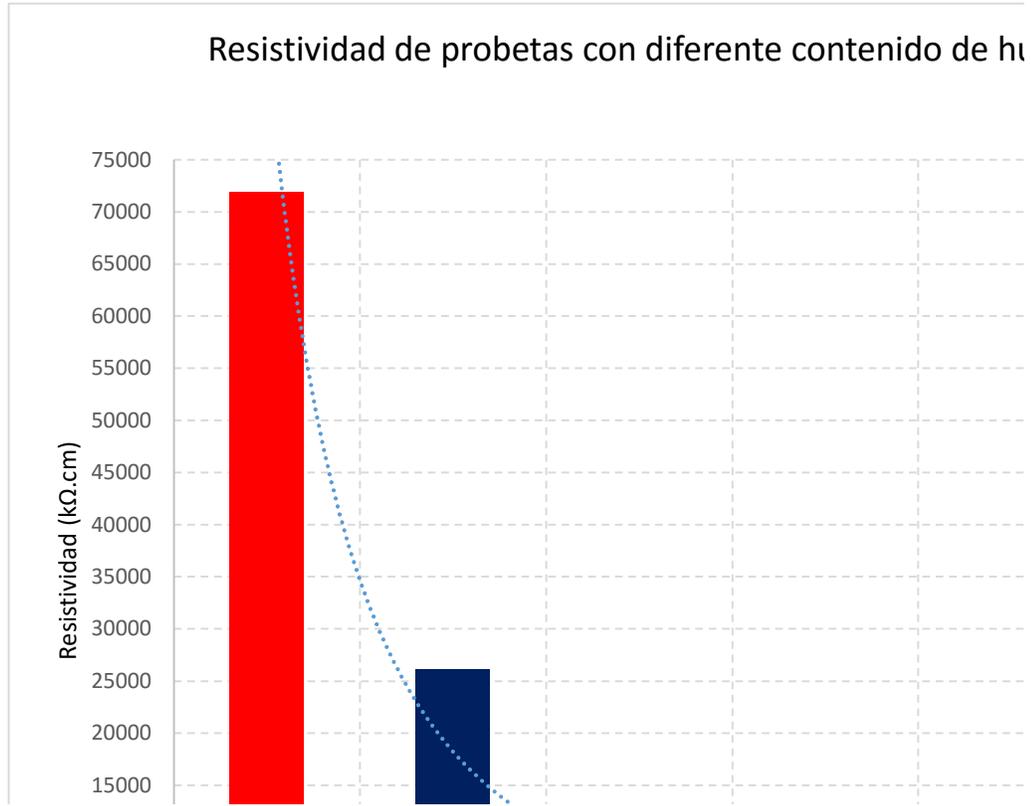


Figura 5.- Valores de resistividad de probetas expuestas a diferentes porcentajes de humedad relativa ambiental

4. CONCLUSIONES

El sistema permite el monitoreo de la evolución de la resistencia del concreto y puede configurarse para realizar la evaluación continua.

Acorde al modelado y simulación el uso de electrodos inertes con un valor de resistencia de 1 permite determinar el valor de RC, al simplificarse la respuesta del sistema, porque el interfaz electrodo-concreto se comporta como un circuito resistivo, pues la capacitancia de la doble capa no influye en la respuesta. Al poseer los electrodos valores despreciables comparados con RC, el comportamiento transitorio es imperceptible y no hay diferencia entre el estado transitorio y permanente. Aporta una manera efectiva de evaluar la resistividad de manera continua, teniendo los electrodos embebidos la evaluación se desarrolla de forma más eficaz.

El valor de coeficiente de correlación del prototipo y del Resistómetro Nilsson es cercano a 1, sugiriendo que ambos equipos tienen respuestas similares en el intervalo evaluado. Sin embargo el intervalo de medición del equipo desarrollado (máximo 60 MOhm) es mayor al intervalo del equipo comercial (máximo 1.1MOhm), esto permite la evaluación del concreto sin humectar el área de medición evitando modificar sus propiedades.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto CB-2008-01-101891.

6. REFERENCIAS

- Abu-Zeid, N., Balducci, M., Bartocci, F., Regni, R., Santarato, G. (2010). *Journal of Cultural Heritage*. 11, 220.
- Andrade, C., Sanjuan, M. A., Alonso, M. C. “*Measurement of chloride diffusion coefficient from migration tests*”. *Memorias NACE Corrosion* (1993), p.319.
- Garzon, A. J., Sanchez, J., Andrade, C., Rebolledo, N., Menéndez, E., Fulla, J. (2014) “*Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars*”. *Cement & Concrete Composites*, V.53, pp. 249-257.
- Hornbostel, K., Larsen, CK., Geiker, MR. (2013). “*Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review*”. *Cement & Concrete Composites*. V.39, pp.60–72.
- Hunkeler, F. “*The essentials for reinforced concrete monitoring, particular emphasis on CP onset and future responses*”. Conference on Structural Improvement through Corrosion Protection of Reinforced Concrete. Institute of Corrosion. 2–3 June, London (1992).
- Polder, R. B. (1995), “*Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment*. In: Nilsson L-O”, Ollivier P, editors. Proc. RILEM. International Workshop on Chloride Penetration into Concrete. St-Remy-les-Chevreuses, p. 225.
- Polder, R.B., Nuiten, P.C. (1994) “*A multi-element approach for cathodic protection of reinforced concrete*”, *Materials Performance Mater Perform*, V. 33 No. 6, pp. 11–14.
- Polder, RB., Nuiten, PC. “*Design and installation of a multi-element cathodic protection system*”. In: Ho DWS, Collins F. editors. Proc. RILEM Int. Conf. on Rehabilitation of Concrete Structures. Melbourne, (1992) pp. 257–266.
- Ramírez Muñoz, D., Casans Berga, S. (2005) “*An analog electronic interface to measure electrical conductivity in liquids*”. *Measurement*. V.38, pp.181-187.
- Schiessl, P. “*Corrosion of steel in concrete. Report of RILEM Technical Committee 60-CSC*”, Chapman and Hall, London (1988).

La resistividad del concreto como medida de control de la corrosión.

J. A. Cabral Miramontes¹. F. J. Olgún Coca², R. Rocha Reséndez¹. C. Gaona Tiburcio¹, F. Estupiñan López¹. †A. Martínez Villafañe³. F. Almeraya Calderón¹.

¹Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica., Nuevo Leon, Monterrey, México.

²Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, México.

³Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

RESUMEN

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. La resistividad eléctrica del concreto es uno de los parámetros del material más influyentes en la intensidad de corrosión. En este trabajo se proporcionará de la información necesaria para identificar los factores que afectan la resistividad del suelo, así como cuáles son los métodos más comunes para llevar a cabo dicha medición. Para determinar la resistividad del concreto se empleó la técnica de Wenner. Los resultados muestran que prácticamente todos los elementos evaluados por el método de resistividad presentaron alto riesgo de corrosión. Podemos concluir que la resistividad eléctrica baja está directamente relacionada con una alta velocidad de corrosión.

Palabras clave: Corrosión, concreto, resistividad.

E-mail Expositor y Responsable de la investigación: jocamira@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La resistividad eléctrica del concreto es uno de los parámetros del material más influyentes en la intensidad de corrosión. Su medición es cada vez más empleada junto con el mapeo de potenciales en el seguimiento e inspección de estructuras para determinar la gravedad de los problemas de corrosión que se pueden presentarse. La resistividad proporciona información acerca del riesgo de corrosión temprana, porque se ha demostrado que existe una relación lineal entre la intensidad de corrosión y la conductividad electrolítica, esto es, que una baja resistividad está relacionada con una alta velocidad de corrosión [1]. La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, estando determinada por los siguientes factores:

- Sales solubles
- Composición propia del terreno
- Estratigrafía
- Granulometría
- Estado higrométrico
- Temperatura
- Compactación

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar las zonas donde se localizaran las camas de ánodos, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas [1]. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

Existen tres métodos principales para medir la resistividad del suelo estos son:

- Método de Wenner o de potencial.
- Método de Schlumberger o de gradiente.
- Soil Box o toma de muestras.

1.1 Método de Wenner [2].

En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre

dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo. En la Figura 1 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores.

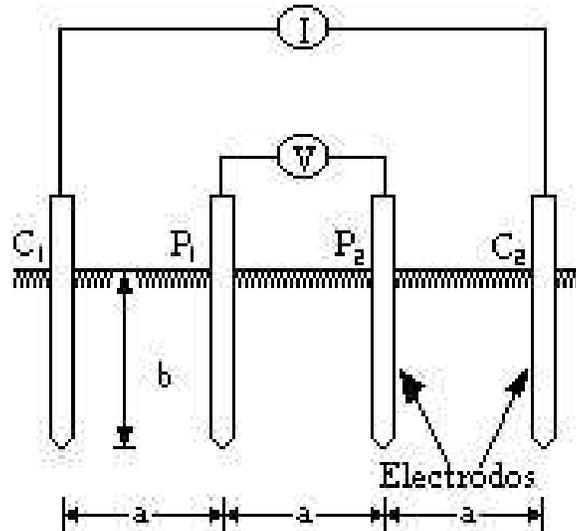


Figura 1. Modelo de conexión del método Wenner o de potencial.

La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\dots = \frac{4 \cdot f \cdot a \cdot R}{\left[1 + \left(\frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}} \right) - \frac{2 \cdot a}{(4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}} \right]} \quad (1)$$

Dónde:

- = Resistividad promedio a la profundidad (a) en ohm-m
- a = Distancia entre electrodos en metros
- a = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros
- R = Lectura del resistivímetro en ohms

Si la distancia enterrada (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a). O sea $a > 20b$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\dots = 2 \cdot f \cdot a \cdot R \quad (2)$$

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos (a) es de 3 metros, (b) es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada.

Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas. Y, que con ellas se obtenga el promedio.

1.2. Método de Schlumberger [3].

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial (a) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos (a).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la Figura 2.

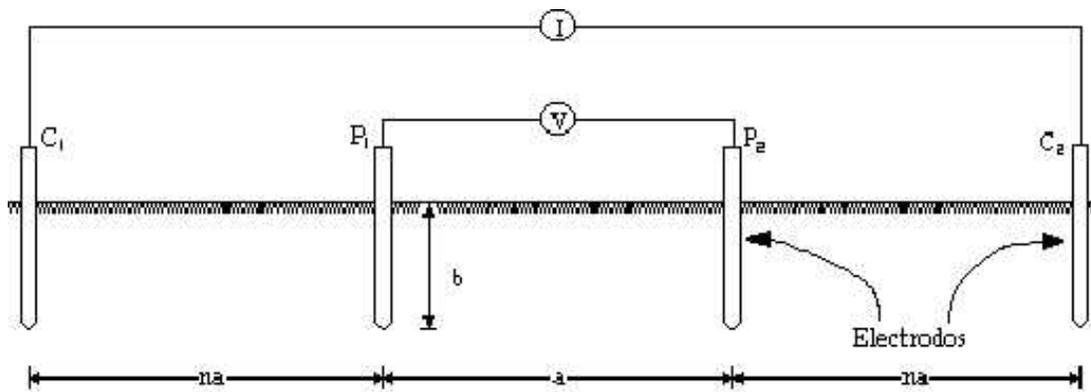


Figura 2. Modelo de conexión del método Schlumberger o de gradiente.

Con este método la resistividad ésta dada por:

$$\rho = 2 \cdot f \cdot R \cdot (n + 1) \cdot na \tag{3}$$

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

2.1 Método de Soil Box [1].

El principio básico de este método es básicamente el método Wenner donde, la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Solo que este se utiliza para medición de resistividad en laboratorio o cuando la colocación de los electrodos es complicada.

2. PROCEDIMIENTO

En este trabajo la resistividad se midió mediante la técnica de Wenner [4,5]. Este método emplea cuatro electrodos equi-espaciados y humectados con un líquido conductor (generalmente agua) que proporciona un buen contacto con la superficie del concreto. Se pasa una corriente alterna conocida (generalmente con una frecuencia entre 50 y 1000 Hz) entre los electrodos externos y se mide la diferencia de potencial entre los internos. La resistencia eléctrica (R), se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad cuando se utilizan testigos de concreto está dada por:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad \text{ohm}\cdot\text{cm} \quad (2)$$

Donde ρ es la resistividad eléctrica en $\cdot\text{cm}$, R es la resistencia eléctrica en $\cdot\text{cm}$ y a es la distancia entre los electrodos. Como electrodos se pueden utilizar uno de Cu/CuSO₄ o clavos metálicos. La Figura 3 presenta el equipo utilizado y la medición de resistencia de algunos testigos de concreto. Es fundamental asegurar un buen contacto de las cuatro puntas al concreto. Las recomendaciones para realizar estas mediciones de resistividad del concreto son, que se realicen utilizando los testigos extraídos de la estructura de concreto, previamente humedecidos hasta saturación del espécimen de concreto. Para eliminar de esta manera la variable de la posible falta de electrolito (humedad o agua) del concreto en el ambiente al que está expuesto. No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores [6-8] acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los datos presentados en la Tabla I.

Tabla I. criterios de resistividad eléctrica para la evaluación de concretos [4].

Intervalo	Criterio
$> 200 \text{ K} \cdot \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > > 10 \text{ K} \cdot \text{cm}$	Riesgo moderado
$< 10 \text{ K} \cdot \text{cm}$	Alto riesgo

Los especímenes a evaluar fueron extraídos de un muelle ubicado en el estado de Sinaloa, México, fabricado de concreto reforzado, los testigos fueron tomados de diferentes zonas como son losas, trabes y pilotes. Se tomaron 10 muestras de losa, 14 muestras de pilotes y 6 muestras de trabes.

Los testigos evaluados contaron con las siguientes dimensiones: 5 cm de diámetro y entre 20 y 25 cm de largo.



Figura 3. Equipo utilizado para la medición de resistencia y ejemplos de la medición.

3. RESULTADOS

En la Figura 4 se presenta la resistividad eléctrica para los testigos de concretos tomados de una losa expuesta en medio marino. Puede observarse que los dos testigos presentan riesgo moderado de corrosión.

En la Figura 5 se presenta la resistividad eléctrica para los testigos de concretos tomados de los pilotes de una estructura de concreto expuesta en medio marino. Puede observarse que todos estos elementos se encuentran en alto riesgo de corrosión independientemente de la zona de marea en la cual fueron evaluados. En el caso de los pilotes solo una muestra presento riesgo moderado de corrosión de las seis muestras evaluadas.

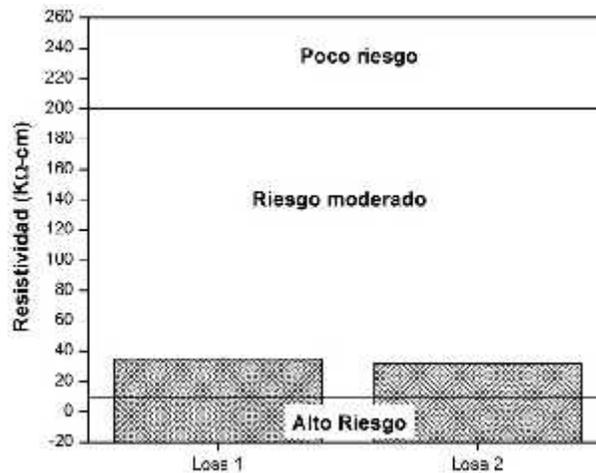


Figura 4. Resistividad eléctrica de las losas.

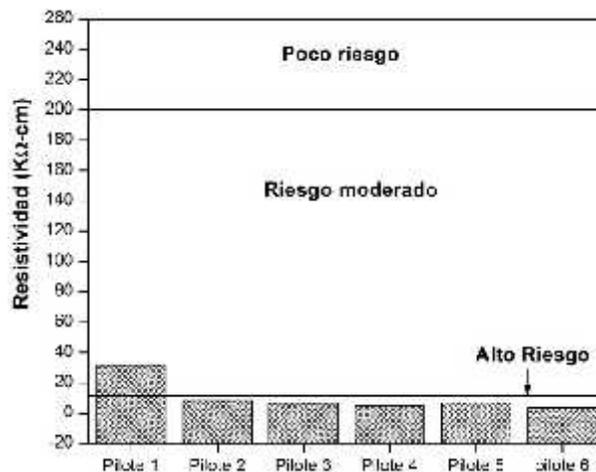


Figura 5. Resistividad eléctrica de los pilotes.

En la Figura 6 se muestra la resistividad eléctrica para los testigos de concreto tomados de las trabes de la estructura de concreto. En esta figura se puede observar que todos los elementos se encuentran con un riesgo moderado de corrosión, independientemente de la zona y la trabe de la que fueron extraídos. Es importante mencionar que fueron extraídos de diferentes zonas de la estructura y con diferentes orientaciones con respecto al norte y la dirección de los vientos.

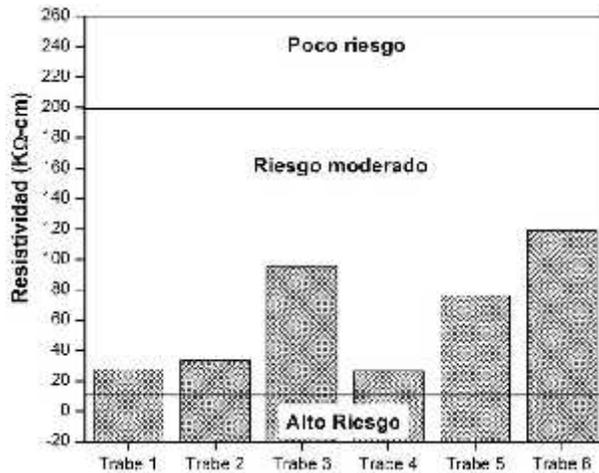


Figura 6. Resistividad eléctrica de las trabes.

En la Figura 7 se presenta la resistividad eléctrica para los testigos de concretos tomados de otra losa donde se realizaron mediciones de resistividad. Puede observarse que la totalidad de los testigos de concreto tomados de las losas se encuentran en riesgo moderado de corrosión, esto debido a los valores de resistividad presentados.

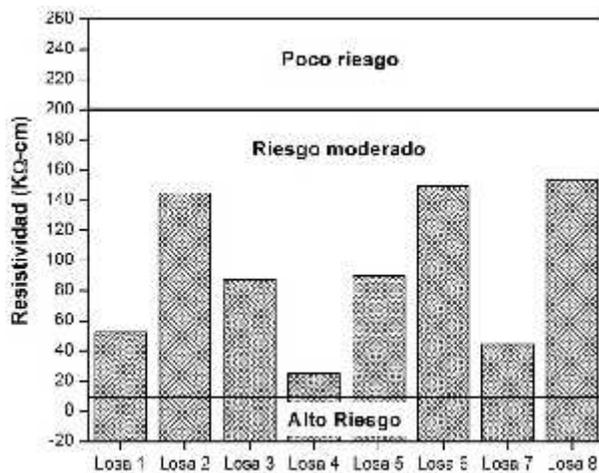


Figura 7. Resistividad eléctrica de las losas.

En la Figura 8 se presenta la resistividad eléctrica para los testigos de concretos tomados de los pilotes de otra estructura de concreto expuesta en ambiente marino. Puede observarse que solo dos elementos se encuentran en riesgo moderado de corrosión. Sin embargo, la gran mayoría de los testigos restantes se encuentran entre la línea de alto riesgo y riesgo moderado de corrosión lo cual podría ser indicativo de que estas muestras que presentan valores apenas por encima de 10 KΩ-cm muy probablemente pasen a alto riesgo de corrosión en los próximos años.

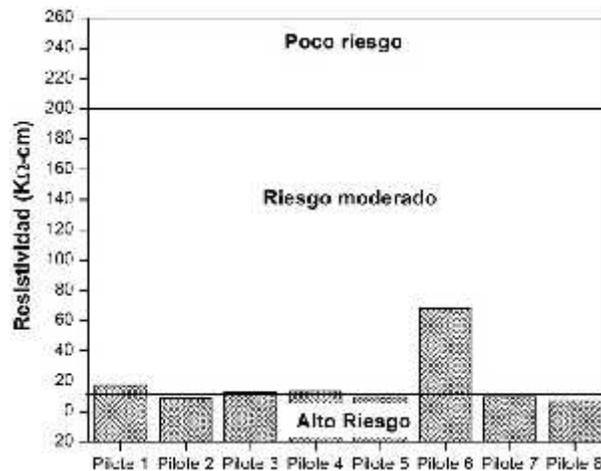


Figura 8. Resistividad eléctrica de los pilotes de la segunda estructura de concreto evaluada.

4. CONCLUSIONES

Se logró medir la resistividad de diferentes elementos en una estructura de concreto reforzado por el método de Wenner.

Los testigos obtenidos de las losas evaluadas se encontraron en riesgo moderado de corrosión según los valores de resistividad obtenidos.

Los testigos obtenidos de los pilotes presentaron alto riesgo de corrosión, mientras que las traveses evaluadas mostraron riesgo moderado de corrosión.

Ninguno de los elementos evaluados presento poco riesgo de corrosión esto debido a las condiciones medioambientales a las que se encuentran expuestas.

5. REFERENCIAS

- [1]. (Andrade C., Alonso C. y González J.A., 1987. "Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón". Materiales de construcción. Vol 37. No. 207.)
- [2]. (ASTM G57-06, 2012. Standard test method for field measurements of soil resistivity using the Wenner four-electrode method.)
- [3]. (F. Wenner, 1915/16. A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, p. 478-496.
- [4]. (Feliú S., Andrade C., González J., Alonso C., 1996. "New method for in-situ measurements of electrical resistivity of reinforced concret". Materials and structure. RILEM. Vol. 29, Pp. 362-365.)

- [5]. (IEEE Standard no. 81. Recommended guide for measuring earth resistivity, 1983. Ground impedance, and earth surface potential of a ground system. ANS/IEEE Std 81.
- [6]. (J. H. Argañaraz, “Mediciones eléctricas- Resistencia eléctrica de puesta a tierra- Resistividad eléctrica del suelo” Universidad Nacional del Sur- Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras.)
- [7]. (Millard, S.G., Harrison, J.A. and Edwrds, A.J., 1989. “Measurements of electrical resistivity of reinforced concret structures for the assessment of corrosion risk” British Journal of NTD. Vol. 31. Pp. 617-621.)
- [8]. (RED DURAR, 2000 .Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV: Corrosión/ impacto ambiental sobre materiales. Maracaibo, Venezuela. ISBN 980-296-541-3.)

Mezcla de concreto hidráulico con ceniza de bagazo de caña como sustituto de cemento: evaluación de las propiedades físico-mecánicas.

E. González Castro¹, E.M. Alonso Guzmán¹, W. Martínez Molina¹, H. Chávez García¹, S. C. Arguello Hernández¹, I. Trujillo Calderón¹, C. Bernabé Reyes¹, A. Torres Acosta².

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mújica S/N C.P. 58030 Morelia, Michoacán, México

²Instituto Mexicano del Transporte: atorres@imt.mx

Palabras clave: Concreto, Ceniza, sustituto.

E-mail Expositor y Responsable de la investigación: E González Castro
emmanuel.glezc@outlook.com

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de puzolanas como sustitución de cemento Portland en la elaboración de concreto pretende incrementar sus propiedades mecánicas a edades tardías, reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera y crear a su vez un eco-material que satisfaga las solicitudes de proyecto. De acuerdo con cifras del sistema Getting the Numbers Right (GNR), en 2013 se produjeron 862 millones de toneladas de cemento y se vertieron 546 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera. Acorde a las cifras provenientes de las “Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2005-2014”, publicadas por la Unión Nacional de Cañeros, en el período correspondiente a 2013-2014 se obtuvieron 15, 473, 145 toneladas de bagazo de caña a nivel nacional como parte del proceso de la molienda de caña de azúcar, lo que sitúa a nuestro país como una gran fuente de materia prima para el desarrollo de concretos ecológicos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La investigación se llevó a cabo utilizando ceniza de bagazo de caña (CBC) proveniente de un ingenio azucarero ubicado en la localidad de Pedernales, municipio de Tacámbaro, Michoacán. Para la elaboración del concreto ecológico y el concreto testigo se utilizaron los siguientes materiales: un cemento Portland CPC 30R RS Tolteca de la marca CEMEX, agua potable de mezclado proveniente del laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la cual cumple con las especificaciones y los límites permisibles para ser utilizada como agua de mezclado, como agregado grueso se eligió una grava producto de trituración de roca basáltica con TMA de ¾” (19 mm), el agregado fino utilizado fue una arena volcánica negra, y se utilizó un aditivo súper plastificante llamado CRISOTAN R-5. Para la caracterización de los materiales pétreos y el cemento Portland se utilizó la normativa NMX y ASTM correspondientes, con la finalidad de determinar sus características y utilizarlas para el diseño de mezcla, así como para conocer la calidad de los mismos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1 mostrada a continuación, en la parte superior se presentan los parámetros necesarios para el proporcionamiento por el método del American Concrete Institute (ACI), en la parte media se presentan resultados de ensayos de calidad para el agregado fino que no intervienen en el diseño de la mezcla y en la parte inferior se muestran los resultados obtenidos para el cemento Portland.

Tabla 1. Resultados para los ensayos de caracterización de los materiales pétreos y el cemento Portland.

MÉTODO DEL ACI						
Material	M.U.S.	M.U.C.	Densidad	Absorción	M.F.	T.M.A.
Unidad	Kg/m ³	Kg/m ³	g/cm ³	%	-	mm
Arena	1373.1	1502.9	2.39	5.42	3.6	-
Grava	1407.5	1497.1	2.57	1.10	-	19
Cemento	-	-	3.05	-	-	-
AGREGADO FINO						
Material que pasa la malla N° 200 7.02%	Terrones de arcilla 4.8% (excesivo)		Colorimetría 2 < 3 aceptable		Equivalente de arena 91.78%	
CEMENTO						
Consistencia Normal				31.43%		
Fraguado Inicial				4 horas		
Fraguado Final				10 oras 21 min		

Para utilizar la CBC en la elaboración de concreto es necesario llevar a cabo un proceso previo de preparación y caracterización para así determinar sus propiedades y utilizarla de manera eficiente para conseguir los resultados esperados:

2.1 SECADO DE LA CBC.

Se comenzó por eliminar la humedad presente en el material. El primer secado se realizó al sol por un período de entre 6 y 8 horas continuas. Posteriormente se secó en hornos a una temperatura de 100°C por un período de 12 horas. Este procedimiento se repitió hasta secar aproximadamente la cantidad de 45 Kg de CBC. Un aspecto importante en el proceso de secado es evitar en la medida de lo posible la pérdida de finos, ya que son las partículas de mayor interés debido a que su reactividad se ve favorecida a medida que el tamaño de partícula es más pequeño, por incrementarse su área superficial y por lo tanto su superficie reactiva.



Figura 1. Secado de la ceniza al sol, charola con CBC después del primer secado a la izquierda y CBC apenas extendida, a la derecha. (Fotografía, E. González Castro).

2.2 CRIBADO DE LA CBC.

Una vez concluido su proceso de secado se procedió a llevar a cabo un cribado mecánico utilizando las mallas 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200. Se comenzó cribando una cantidad de prueba de 6.5 Kg haciéndola pasar por las mallas ya mencionadas en el mecanismo de la máquina cribadora de la figura 2; se continuó el trabajo utilizando la máquina Raf-tap hasta pasar la muestra completa.



Figura 2. Máquina cribadora (izquierda). Máquina Raf-tap (derecha). (Fotografías, E. González Castro).

Con base en estos resultados del cribado en el que se observó gran porcentaje de material retenido en la malla 100 y 50 se tomó la decisión de pulverizar la ceniza y así reducir su tamaño de partícula.

2.3 GRANULOMETRÍA DE LA CBC PREVIO AL PROCESO DE PULVERIZACIÓN.

Se cribaron dos muestras representativas de 230 g cada una del material puzolánico haciéndolas pasar por las mallas número 8, 16, 30, 50, 100 y 200 con el objetivo de conocer su distribución granulométrica. El proceso fue llevado a cabo en la máquina Raf-tap.



Figura 3. Mallas y muestra representativa de CBC (izquierda). Mallas 100, 200 y Charola con sus respectivos retenidos (derecha). (Fotografía, E. González Castro).

Se observa que el cribado mediante la máquina Raf-tap es mucho más eficiente que la combinación de la máquina cribadora y el cribado manual, ya que se obtuvo una mayor cantidad de CBC que pasa la malla N° 200, sin embargo es mucho más lento el proceso si se dimensiona a la cantidad total de CBC necesaria para la experimentación, al tener menor capacidad. Por estas razones la pulverización se vuelve un factor necesario y práctico con ventajas como el tiempo y la eficiencia. Como una observación de gran importancia es que la CBC tiene baja densidad, pues ocupa un gran volumen en relación con su peso, por esta misma razón es que se desplaza fácilmente por el aire.

2.4 PULVERIZACIÓN DE LA CBC. La ceniza fue sometida a un proceso de pulverización introduciéndola en la máquina de ensayo de Los Ángeles, la cual consiste en un tambor cilíndrico de acero que gira en posición horizontal. Este cilindro está provisto de una abertura para introducir la muestra que se desea ensayar y un entrepaño para conseguir el volteo del material. Como cuerpos pulverizadores se utilizaron 12 bolas de hierro, en sesiones de 10 minutos por cada 6 Kg de ceniza de bagazo de caña hasta conseguir la cantidad de aproximadamente 45 Kg de CBC pulverizada.



Figura 4. Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Fotografía, E. González Castro).

Concluido el proceso de pulverización la ceniza se vuelve apta para sustituir al cemento Portland en la mezcla de concreto en el porcentaje que resulte óptimo. El cambio físico de tamaño es inmediatamente apreciable a la vista y al tacto, pues se vuelve mucho más fina y homogénea.

2.5 GRANULOMETRÍA DE LA CBC POSTERIOR AL PROCESO DE PULVERIZACIÓN.

Se cribaron nuevamente dos muestras representativas de CBC de 230 g cada una, y se colocaron en la máquina Raf-tap. Las juntas entre cada malla fueron selladas con cinta adhesiva y la pérdida de finos fue prácticamente nula. El tiempo de cribado de cada muestra fue de 10 minutos.



Figura 5. Muestra de CBC para el cribado. (Fotografía, E. González Castro).

El proceso de pulverización es altamente efectivo, pues consiguió un 92.95% de CBC que pasa la malla N° 200, comparado con el 48.94% que pasaba antes del proceso. Se realizaron ensayos de consistencia normal de las combinaciones de cemento Portland con los 3 porcentajes de sustitución tentativos, siguiendo el mismo procedimiento que marca la norma NMX-C-057-ONNCCE-2010. No se realizó la determinación de los tiempos de fraguado para el porcentaje de 20% de sustitución. Los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los ensayos para las distintas sustituciones.

Consistencia Normal CPC-CBC			
Porcentaje de Sustitución	5%	10%	20%
Consistencia Normal (%)	37.43	42.86	52
Agua añadida por efecto de CBC	19.09%	36.36%	65.45%
Fraguado inicial	6 horas	6 hr 14 min	-
Fraguado final	12 hr 52 min	12 hr 41 min	-

Se observa que al incrementar el porcentaje de CBC las pastas de cemento requieren mayor cantidad de agua para mantener la consistencia normal, esto es atribuido a la estructura porosa de las partículas de la ceniza. Se observa que la combinación de CPC-CBC retarda los tiempos de fraguado en un tiempo aproximado de 2 horas.

2.6 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PRELIMINARES.

Se realizaron 3 especímenes de prueba para cada sustitución de cemento por CBC, 5%, 10% y 20% con respecto al peso del cemento. Se probaron dos especímenes de cada sustitución a la edad de 7 días por compresión y uno más a los 14 días. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados de esfuerzo a compresión en los especímenes preliminares.

Comparativa con el $f'c = 407 \text{ Kg/cm}^2 = 39.91 \text{ MPa}$					
% CBC	N° espécimen	Edad (días)	Esfuerzo (MPa)	Promedio	% Alcanzado
20%	1	7	6.51	6.43	16.12
	2		6.35		
	3	14	7.62	7.62	19.10
10%	1	7	30.10	29.36	73.57
	2		28.62		
	3	14	31.25	31.25	78.30
5%	1	7	17.64	18.51	46.37
	2		19.37		
	3	14	22.17	22.17	55.55

Se determinó como porcentaje óptimo el 10%. Se sustituyó 10% del peso de cemento por CBC y se comparó el concreto ecológico con un testigo de relación agua cemento (A/C)= 0.42, utilizando un cemento CPC-30R-RS, ensayando los elementos elaborados por resistencia a la compresión simple, tensión y flexión, y calculando sus módulos de elasticidad estático y dinámico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 6 mostrada a continuación:

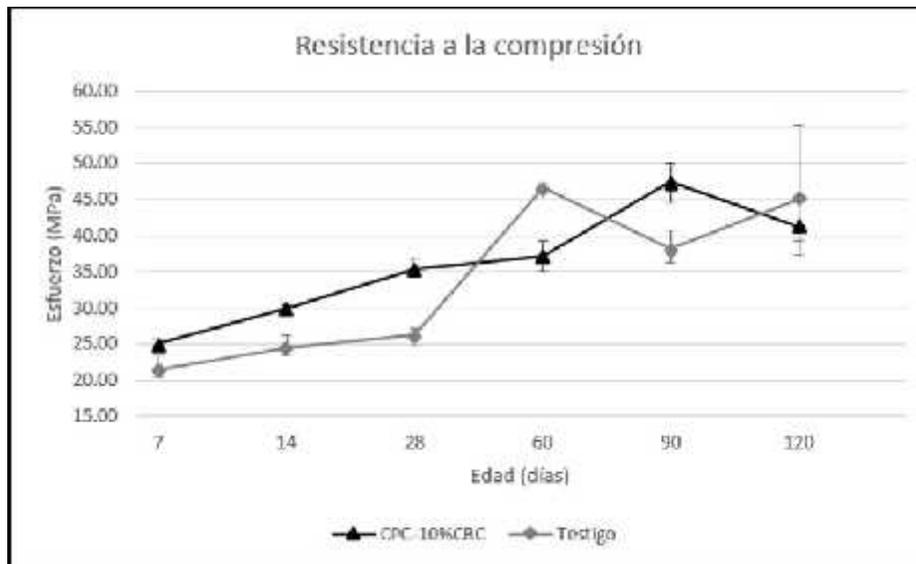


Figura 6. Resultados del esfuerzo a compresión por edad de prueba.

El esfuerzo máximo mostrado por la mezcla testigo se dio a los 60 días y corresponde a 46.74 MPa (117% del $f'c$ de proyecto) y la mezcla CPC-10%CBC consiguió un esfuerzo de 47.45 MPa (118.89% del $f'c$ de proyecto) a la edad de 90 días. De acuerdo a las especificaciones del cemento Portland utilizado (CPC 30R RS) se esperaba una resistencia de al menos 30 MPa a los 28 días,

superada por la mezcla CPC-10%CBC, quedando por debajo de este valor la mezcla testigo. Esto puede ser atribuido al efecto del fluidificante el cual favoreció a la combinación de CPC con CBC y perjudicó a la mezcla testigo. La falla en los agregados se presentó generalmente a la edad de 60 días y en las edades anteriores la falla se presentó en la interfase agregado-pasta de cemento.

3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.

El valor del módulo de elasticidad estático depende de varias variables, destacando la resistencia y características de los agregados gruesos. Los resultados se muestran enseguida:

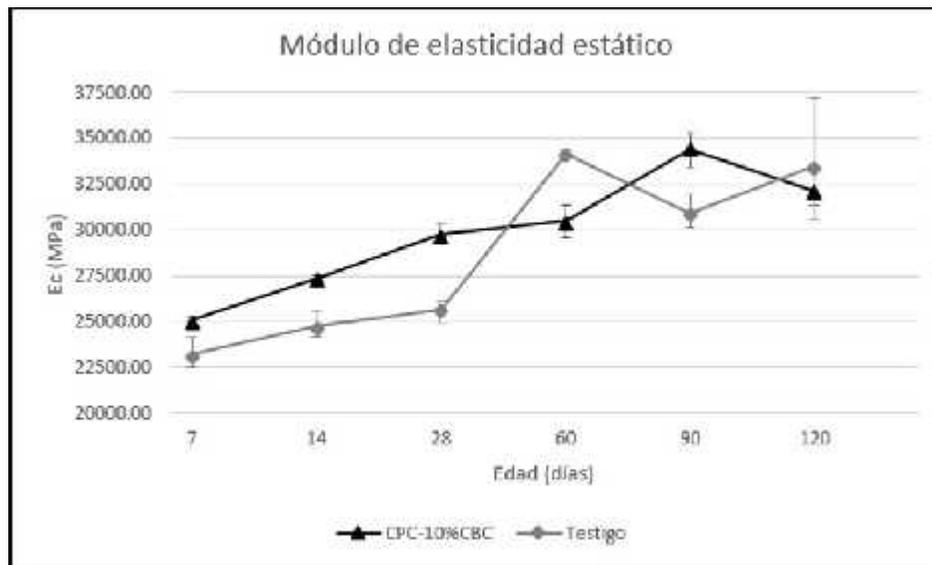


Figura 7. Resultados del cálculo del módulo de elasticidad estático.

A mayor resistencia a la compresión, mayor es el módulo de elasticidad estático, los valores presentados son aproximados ya que se obtuvieron por medio de una ecuación y no por medio de una relación esfuerzo-deformación. (15,000 Raíz $f'c$ ó 5,000 Raíz de $f'c$). Al depender de los esfuerzos a compresión, la tendencia de la gráfica es la misma que la mostrada anteriormente y solamente varía en magnitud. De acuerdo a la bibliografía se esperaba un módulo aproximado de 30,000 MPa lo cual se cumplió para ambas mezclas. Es importante conseguir módulos altos, pues estos se traducen en pocas deformaciones presentes a esfuerzos elevados.

3.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA.

La mezcla testigo presentó esfuerzos mayores a la tensión comparada con la mezcla CPC-10%CBC, sin embargo el comportamiento de la mezcla con CBC presentó un incremento en su resistencia de manera proporcional a la edad. Los resultados se muestran en la figura 8:

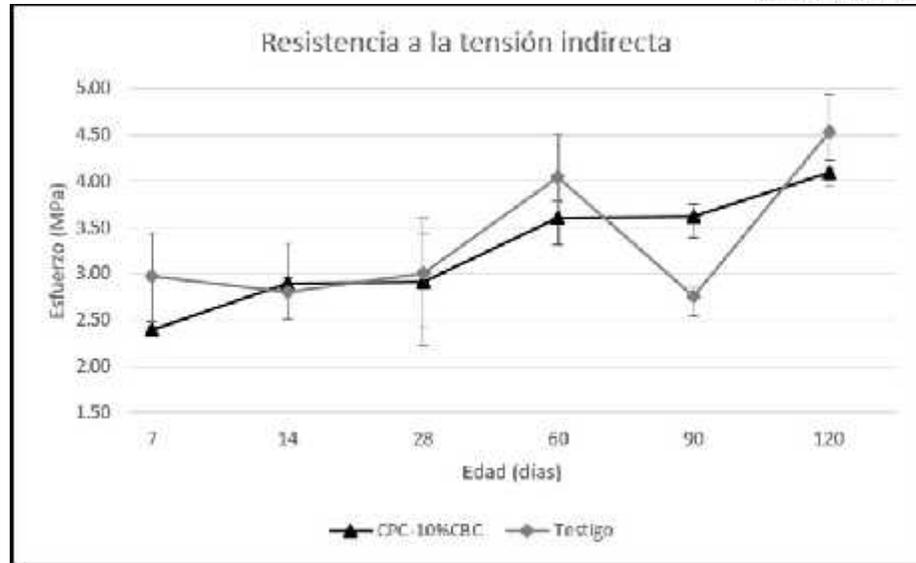


Figura 8. Resultados del esfuerzo a tensión indirecta por edad de prueba.

La mezcla testigo alcanzó un esfuerzo máximo de 4.53 MPa a la edad de 120 días, correspondiente al 11.36% del f'_c de proyecto, por su parte la mezcla CPC-10%CBC alcanzó un esfuerzo máximo de 4.09 MPa a la edad de 120 días correspondiente a un 10.25% del f'_c de proyecto, por lo que se comprueba que el valor de la resistencia a la tensión representa alrededor del 10% del esfuerzo a compresión.

3.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Se observa que la mezcla testigo superó a la mezcla sustituida con CBC en todas y cada una de las edades de prueba. Los resultados se muestran en la figura 9:

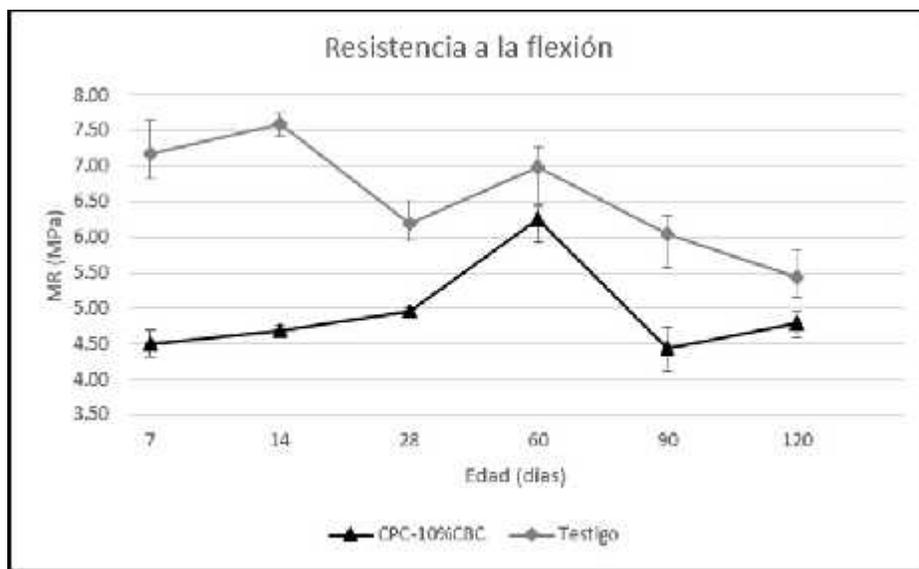


Figura 9. Resultados del esfuerzo a flexión por edad de prueba.

En ambas mezclas la falla del agregado debido a los esfuerzos internos se presentó a partir de la edad de 28 días. La tendencia de la gráfica en ambas mezclas es contraria al comportamiento esperado, principalmente en la mezcla testigo, se atribuye al proceso de elaboración. A pesar de que algunas vigas presentaron segregación los valores de MR no son bajos. Usualmente se considera el esfuerzo a la flexión de un concreto hidráulico como un valor comprendido entre el 10% y el 20% de su esfuerzo a la compresión, en la mezcla testigo se obtuvieron valores comprendidos entre el 13.61% y el 19.04% del f'_c de diseño, en la mezcla CPC-10%CBC se obtuvieron valores comprendidos entre el 11.13% y el 15.65% del f'_c de diseño.

3.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.

Se observa que los valores de módulo de elasticidad estático alcanzados en las últimas edades de prueba son muy similares a los del módulo dinámico, siendo éste último un poco superior.

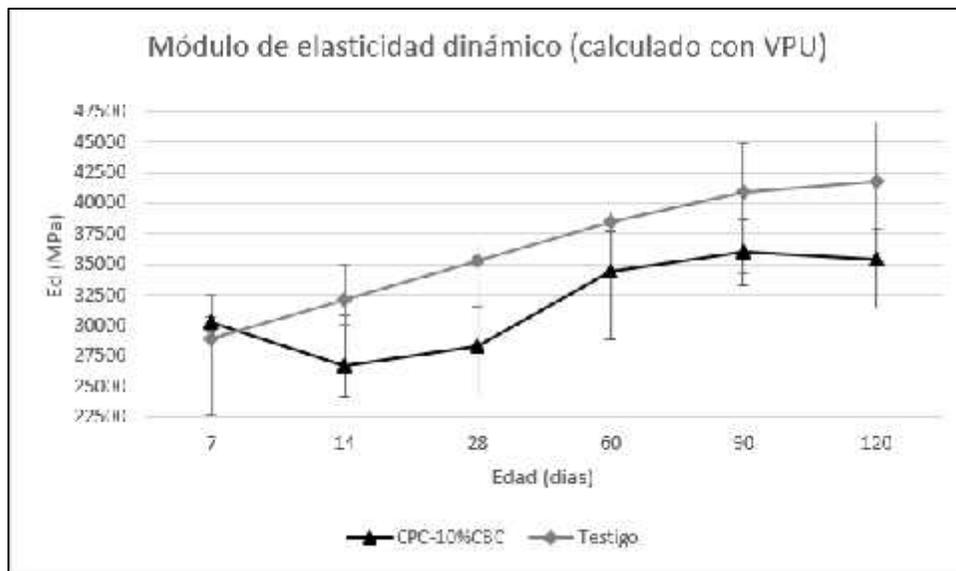


Figura 10. Resultados del cálculo del módulo de elasticidad dinámico.

El testigo presenta un módulo de elasticidad dinámico mayor al de la mezcla CPC-10%CBC, lo que significa que el testigo es un concreto más rígido.

4. CONCLUSIONES

Efectivamente, la utilización de CBC como material puzolánico mejora algunas características del concreto, sin embargo no se puede lograr la optimización de todas ellas simultáneamente. Se recomienda invertir un poco de energía en la pulverización de la CBC lo cual se verá recompensado en el desempeño de la actividad puzolánica. Se determinó un porcentaje óptimo de sustitución de CP por CBC correspondiente al 10% de la masa del cemento, sin embargo puede buscarse incrementar esta cantidad de sustitución sin sacrificar la trabajabilidad de la mezcla. No se recomienda llegar al 20% de sustitución ya que la demanda de agua de mezclado se aumenta significativamente, aún con el uso de un aditivo súper plastificante.

La mezcla CPC-10%CBC presentó un mejor comportamiento a través del tiempo en comparativa con la mezcla testigo. Con relación a los ensayos de resistencia mecánica, el concreto ecológico destaca en su resistencia a compresión logrando superar la resistencia de proyecto en un 18.89% y al testigo en un 1.89%, un excelente resultado al reducir la cantidad de cemento. El comportamiento más inestable en ambas mezclas se presentó en los resultados de resistencia a la flexión, sin embargo se alcanzó un MR = 6.25 MPa para la mezcla CPC-10%CBC (15.65% del f'_c de proyecto), solo un 2.31% más bajo que el testigo. De acuerdo a CEMEX, se recomienda un MR = 4.12 MPa para vialidades urbanas secundarias, MR = 4.41 MPa para vialidades urbanas principales y zonas industriales, y MR = 4.70 MPa para carreteras y autopistas. El concreto elaborado con CBC es candidato para ser utilizado en cualquiera de estos ámbitos. Con respecto a los ensayos de tensión indirecta y el cálculo de los módulos de elasticidad estático y dinámico se obtuvieron valores acorde a la literatura.

Finalmente se logró el objetivo principal de conseguir una mezcla de concreto hidráulico con buenas propiedades, utilizando un residuo agroindustrial como la ceniza de bagazo de caña, disminuyendo el costo de la mezcla. México es una fuente potencial en la generación de este subproducto (bagazo de caña), y su uso como material cementante en la industria de la construcción a escala nacional provocaría un gran impacto ecológico positivo, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO₂ producto de la industria del cemento.

5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la facultad de ingeniería Civil de la U.M.S.N.H.

6. REFERENCIAS

- [1]. (Comité Ejecutivo Nacional, (2014-2018).Obtenido de: <http://www.caneros.org.mx/estadisticas.html>).
- [2]. (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. (2014-2015). Cement Sustainability Initiative. Obtenido de Cement Sustainability Initiative: <http://www.wbcscement.org/index.php/en/about-cement/benefits-of-concrete>)
- [3]. (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. (2014-2015). Cement Sustainability Initiative. Obtenido de Cement Sustainability Initiative: <http://www.wbcscement.org/index.php/en/about-cement/benefits-of-concrete>)
- [4]. (Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto (Primera ed.). Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association. Recuperado el 11 de Abril de 2016.)
- [5]. (Normativa NMX – ASTM para la caracterización de los agregados pétreos, cemento Portland, y procedimientos de elaboración de especímenes y ensaye a diferentes esfuerzos.)
- [6]. (Unión Nacional de Cañeros, A.C.-GNPR. (2014).”Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2005-2014”.)

Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones parciales de metacaolín y ceniza de bagazo de caña.

Expositor: S.C. Arguello Hernández¹, Responsable: W. Martínez Molina¹, E. M. Alonso Guzmán¹, H. L.

Chávez García¹, C. Lara Gómez¹, C. Bernabé Reyes¹, M. Arreola Sánchez¹, J.I. Escalante García²

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México. E-mail: sandy_360_7@hotmail.com

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México. e-mail: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

1. RESUMEN

Reducir sensiblemente el problema de la huella de carbono, para lograr un ahorro energético y una menor afectación al ambiente. Las sustituciones a morteros base cemento Portland (CP), se realizaron para mejorar mediante una dosificación, sus propiedades físico-mecánicas; la base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Puzolánico” en el cemento. Los morteros se sometieron a pruebas destructivas: compresión, tensión, flexión y adherencia; así como no destructivas: velocidad de pulso ultrasónico (vp), resistividad eléctrica (r), densidad (d) y gravedad específica (ge). Las edades de prueba fueron 14, 28, 45, 90 y 180 días. Primero se comparó los resultados de las sustituciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso de la masa de CP con respecto a un mortero CONTROL (cemento-arena-agua) (ASTM C-109 , 2002). Se elaboró un estudio comparativo del empleo de pruebas destructivas y no destructivas para predecir el comportamiento mecánico del mortero. Dichas correlaciones se hicieron con el algoritmo LARS, el cual nos proporciona las variables de acuerdo a su orden de importancia. En las sustituciones de metacaolín (MK) y ceniza de bagazo de caña (CBC), 15 y 20% se incrementa las propiedades mecánicas (Arguello Hernández, 2012). Las pruebas de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, nos indican de manera indirecta la porosidad del material (Chávez García , 2011) y fueron los parámetros de mayor importancia en la predicción del comportamiento del mortero a través de correlaciones.

Palabras clave: Morteros, sustituciones, puzolanas, correlaciones.

2. OBJETIVOS:

Diseñar, elaborar y evaluar en una mezcla de mortero la incorporación de materiales puzolánicos como un sustituto parcial del cemento portland, sus propiedades físico-mecánicas, correlacionando los resultados de las pruebas destructivas con las no destructivas por medio de un modelo matemático para predecir la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura del mortero estudiado, a partir de los datos de las pruebas no destructivas aplicadas en este trabajo. Especificar los ensayos de acuerdo a su importancia al momento de hacer las correlaciones, así mismo el % de confiabilidad de cada correlación. Obtener el % óptimo a sustituir para cada uno de los materiales.

3. INTRODUCCIÓN

La protección del medio ambiente ha sido de gran importancia en los últimos años. El empleo de cemento involucra una contaminación hacia el medio, un sorpresivo 5% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo son producidas por esta industria, sin embargo, no existe otro material con las características del cemento para el área de la construcción, es el ligante universal por excelencia, por lo que su producción es indispensable para satisfacer la demanda de la población. Surge la necesidad de disminuir los efectos negativos que produce el uso del cemento. Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto (Águila et al, 2008).

La base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Puzolánico” en el cemento. Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento Portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

El mortero se puede definir como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland y otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecer presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Sánchez de Guzmán, 2006). Una manera de reducir el consumo de cemento en la elaboración de los morteros es sustituir parte de este, por diferentes materiales, para la presente investigación: Metacaolín y ceniza de bagazo de caña.

De los ensayos realizados, de acuerdo a su naturaleza se clasifican en: No Destructivas y Destructivas; las primeras se realizan a los materiales, para determinar cierta característica física, mecánicas o química del material en cuestión y no alteran de forma permanente sus propiedades,

ya sean éstos: metales, plásticos (polímeros), cerámicos o compuestos; se tiene la posibilidad de repetir un sin número de veces la prueba, y por tanto, de reducir el número de las muestras, pero además posibilitan para realizar un análisis estadístico confiable, los reglamentos vigentes hablan de 30 especímenes, los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada. En esta investigación las pruebas no destructivas fueron: velocidad de pulso,

resistividad eléctrica, densidad y gravedad específica.

En el caso de las pruebas destructivas permite determinar el parámetro a medir mediante la rotura de probetas: cubo-compresión simple (NMX-C-083-2004), prisma-flexión (ASTM-C-348-97), briqueta-tensión y losa revestida para realizar la prueba de adherencia (ASTM-C-1583-04). El comportamiento de un mortero frente a los distintos esfuerzos es variable y complejo.

Los modelos de regresión multi-variable pueden ser implementados más fácilmente y además la estadística del modelo puede proveer información de cómo cada variable influye en la predicción (Chávez, 2011). El modelo seleccionado, LARS, está dentro de los modelos de regresión multivariable, su algoritmo nos proporciona las variables de acuerdo a su orden de importancia, esto lo determina gracias a que cuando obtiene la predicción de un espécimen usa los datos de todos los especímenes restantes que tiene para obtener dicha predicción, esto le permite definir que variables son más importantes que otras en la predicción.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Estudio de los materiales:

En primer lugar, se tamizó la arena, proveniente del río Huajúbaro perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán, México, entre las mallas 16 y 30, se verificó su calidad.

Los materiales de sustitución CBC, y MK fueron caracterizados mediante pruebas de tamaño de partícula, análisis en el MEB para determinar la morfología de partícula y por fluorescencia de rayos X (FRX, Tabla 1) en que se determinó la composición química.

Tabla 1. Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X.

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	TOTAL	SO ₃
MK	49.75	1.53	44.71	0.51	0.01	0.16	0.04	0.23	0.14	0.03	0.77	97.89	
CBC	60.04	0.43	6.83	3.15	0.13	1.83	1.64	0.45	1.86	0.79	23.6	100.14	
30 R RS	27.93	0.2	6.44	2.22	0.08	1.3	49.77	0.67	1.26	0.12	5.12	95.11	3.37

La ceniza de bagazo de caña (CBC) se obtuvo del ingenio azucarero localizado en el municipio de Taretan, en el estado de Michoacán, Ilustración 1. El tratamiento al que se sometió fue de secado y cribado, utilizando las partículas que pasan la malla ASTM No. 200 (0.074 mm) para la

elaboración del mortero.

El metacaolín (MK) utilizado para la investigación se obtuvo de un proceso industrializado, adquirido en sacos de 50 kg.



Ilustración 1 Obtención de la ceniza de Bagazo de caña.

Etapa preliminar

La consistencia normal (CN) de una pasta se obtiene cuando al agregar un porcentaje de agua, respecto a la cantidad de cementante seco (cemento o cemento + adición), se obtiene una penetración de 10 ± 1 mm en la pasta de cemento utilizando la aguja de 1mm del aparato de Vicat, (NMX-C 057, 2010).

Tiempos de fraguado es mediante la utilización del Aparato de Gillmore. El tiempo de fraguado inicial es el tiempo transcurrido desde que se agrega el agua a la pasta hasta que la aguja de menor masa deja huella apreciable sobre la superficie. La determinación del tiempo de fraguado inicial sigue el mismo procedimiento utilizando la aguja con masa mayor (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011).



Ilustración 2 Método de mezclado mediante aspas de acero.

(Cruz L., 2012), (NMX-C-085)

Elaboración y diseño de mezcla. El mezclado de los morteros se realizó en una cubeta de plástico de 19 litros, utilizando un taladro con potencia de 750w y 3500 RPM con accesorio de aspas mezcladoras como se muestra en la ilustración 2. El tiempo de mezclado fue de 3 minutos, previo a la elaboración de los especímenes.

Se realizó la prueba de fluidez para determinar la cantidad de agua necesaria para obtener un valor de fluidez de $110\% \pm 5\%$ (ASTM C 109 M, 2002) La prueba de fluidez consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, sobre la mesa de fluidez; el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 20 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 20 golpes con el pisón, posteriormente se enrasa el

molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 25 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos.



La ilustración 3 muestra la realización del ensayo.

Se elaboraron los especímenes: cubos de 5cm de arista (ASTM C 109 M, 2002), prismas de 4x4x16cm y briquetas en forma de maní.

Se procedió a realizarse los ensayos No destructivos: velocidad de pulso ultrasónico (vp), resistividad eléctrica (r), gravedad específica (ge) y densidad (d).

Y los ensayos destructivos: compresión simple (ilustración 4), flexión (ilustración 5) y tensión directa.



Ilustración 5 Espécimen colocado en la platina, para compresión simple. ASTM-C-109/2002.



Ilustración 4 Espécimen marcado a una pulgada y en el centro del claro, para flexión. ASTM C 348-97, 2002.

Posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento en las losas (ASTM-C- 1583-2004), registrándose como carga de ruptura, también se observó y registró el tipo de falla (ilustración 6). Las fallas pueden ser de 4 tipos: A. En el sustrato. B. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento. C. En el material de reparación o revestimiento. D. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.

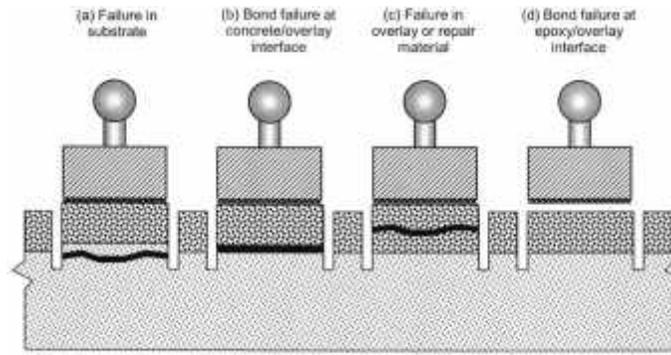


FIG. 3 Schematic of Failure Modes

Ilustración 6 Tipos de falla

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la etapa preliminar, en la tabla No. 2, se presentan los resultados de la consistencia normal y de los tiempos de Fraguado. La norma NMX-C-021 especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado, 90 min mínimo para fraguado inicial y 1080 máximo para fraguado final.

Finalmente se determinó un rendimiento de cementante de 0.47g/cm^3 . Con la prueba de fluidez se obtuvo una relación agua/cemento 1.01. La relación cemento/arena utilizada es 1:2.75, especificada en la norma (ASTM C 109 M, 2002).

Para morteros de albañilería sin adiciones la norma mexicana establece que la resistencia a compresión de los morteros a 7 días debe ser de 4.4 MPa, y de 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos (NMX-C-021-ONNCE., 2004). Los resultados de la resistencia a la compresión se muestran en la ilustración 7.

Tabla No. 2. Resultados de Consistencia Normal y Tiempos de Fraguado.

Materiales	Consistencia normal %	Tiempos de fraguado		
		Inicial (min)	Final (min)	
CONTROL	36	263	540	
MK	5%	36.00	155	502
	10%	39.00	161	506
	15%	43.00	164	537
	20%	45.00	182	564
	30%	52.00	191	623
CBC	5%	37.54	427	732
	10%	44.44	424	813
	15%	49.80	393	750
	20%	60.42	412	868
	30%	73.81	547	1016

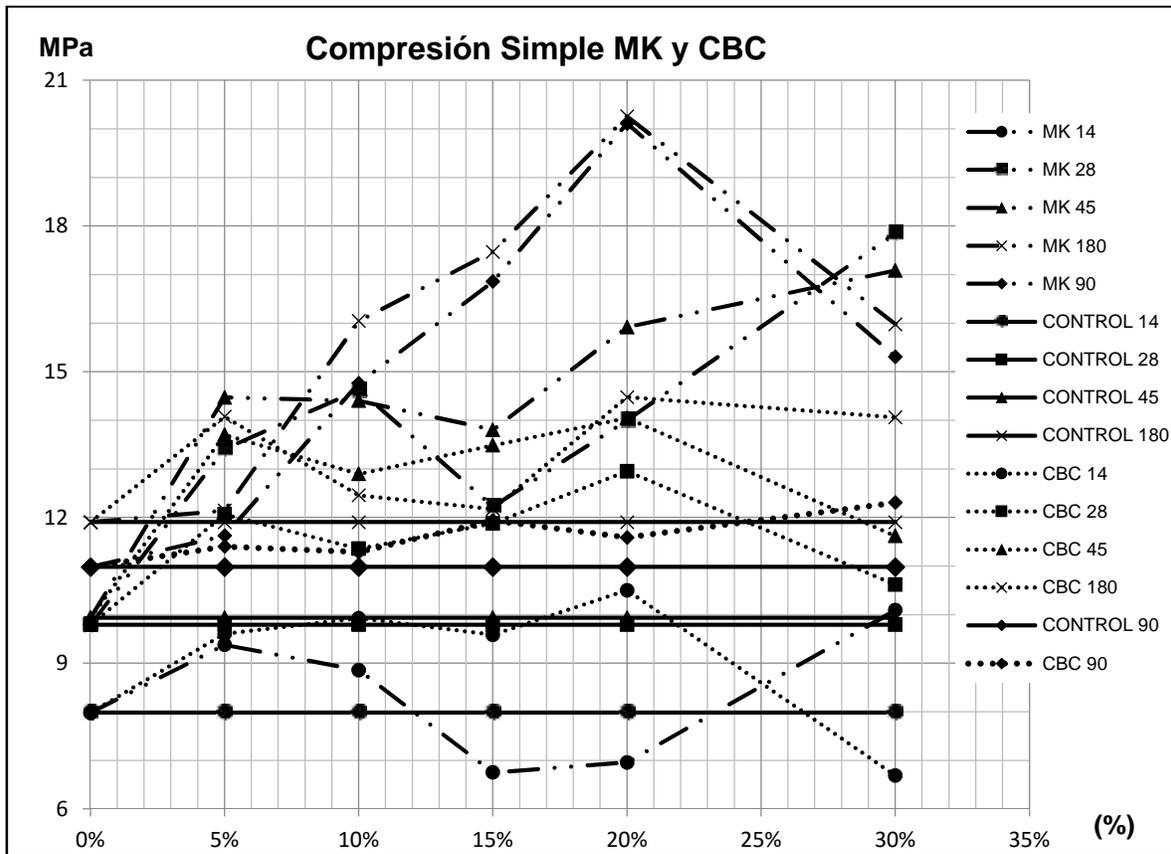


Ilustración 7 Resultados de la prueba de compresión simple.

Un criterio de evaluación, utilizando como parámetro la velocidad de pulso ultrasónico, se presenta en la tabla 3. Este criterio especifica como material de análisis al concreto hidráulico. Sin embargo, el concreto hidráulico a su vez nos puede ubicar en el rango de calidad del mortero que estamos estudiando al ser evaluado con la vp. Los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico se muestran en la ilustración 8.

Tabla 3. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 1998).

Velocidad de Propagación	Calidad del Concreto
<2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001-4000 m/s	Alta
>4000 m/s	Durable

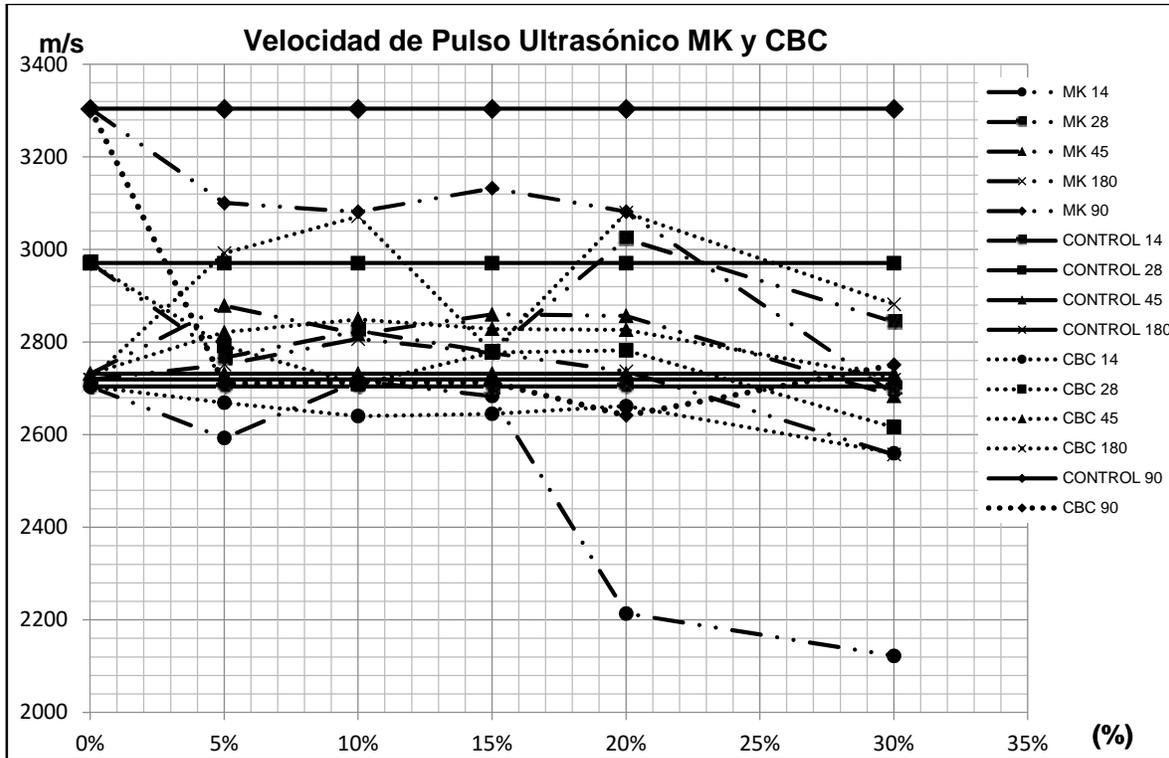


Ilustración 8 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico

No existe un criterio general para determinar los valores de resistividad que definan el estado de corrosión de una armadura. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se pueden utilizar los parámetros de la tabla 4 para estructuras de concreto armado (CYTED-DURAR, 1998). Los resultados de la prueba de resistividad eléctrica se muestran en la ilustración 9.

Tabla 4. Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto. (CYTEDDURAR, 1998)

Valor	Criterio
>200K -cm	Poco Riesgo
200 > >10K -cm	Riesgo Moderado
<10K -cm	Alto Riesgo

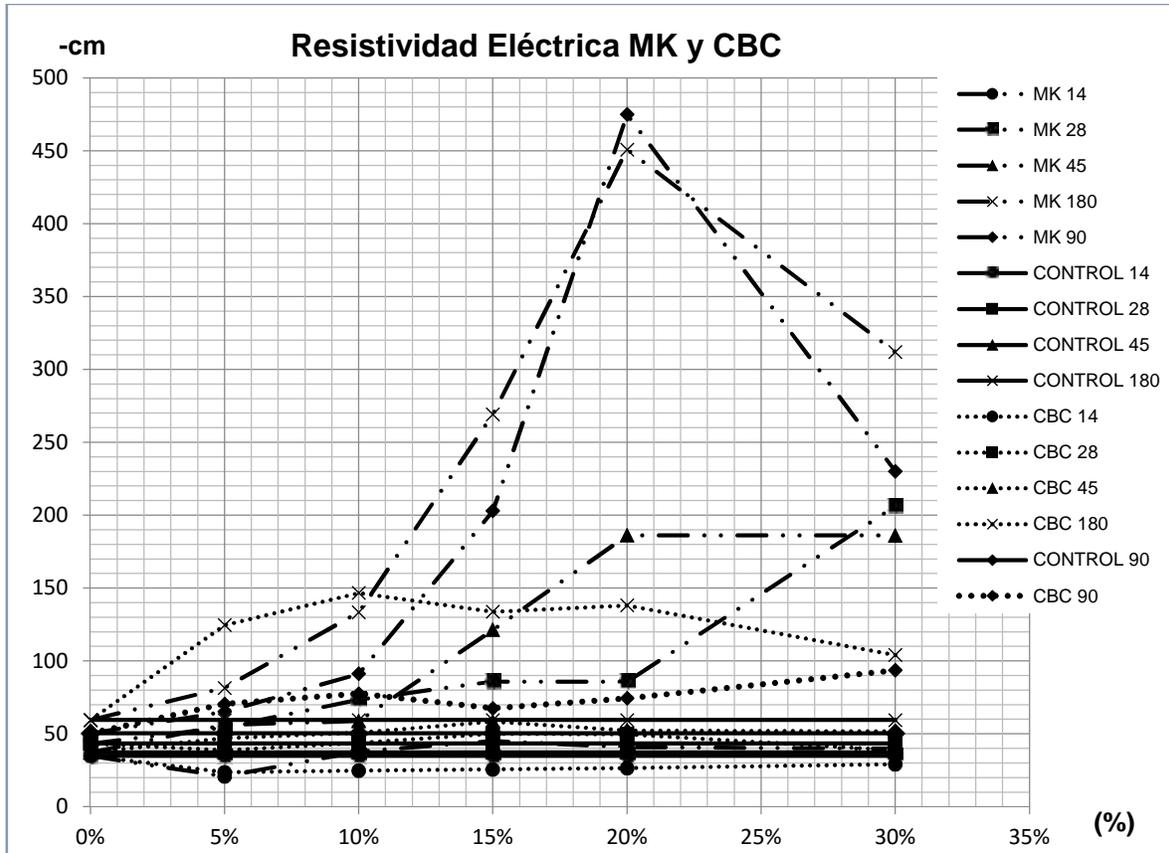


Ilustración 9 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica

Modelos resultantes por orden de importancia de forma descendente es decir de mayor a menor importancia. Son 6 modelos y corresponden 2 por material, uno para predecir el esfuerzo a compresión (C) y el otro para la predicción del esfuerzo a flexión (F).

ECUACIONES PARA PREDECIR LOS ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE
$0.0529538879129vp - 964.250305725466m + 0.2631831998582e + 145.924740590103ge - 0.4644415661317r - 0.0248495746354d = 0.846773895742933$ C CONTROL
$890.430475651599m + 0.0609669467833vp + 0.1160440613784e + 30.3278162107418\%a - 0.1662288024604d + 0.2541046039053r + 2.742996389013ge = 0.82441855405591$ C MK
$4.00549104m*d - 12.7439509ge - 0.9270374d - 7680.59376m - 0.00018392vp^2 + 1.20160829vp + 0.00032074r^2 + 0.00962556e - 0.00095257vp*r + 2.70857855r + 15.1867806\%a = 0.803880030415513$ C CBC

Tabla 5. Ecuaciones para predecir los esfuerzos a compresión simple

ECUACIONES PARA PREDECIR LOS ESFUERZOS A FLEXIÓN
$0.0000000001r^3*vp^3 + 0.2926160256r^*e - 0.00027663874r*vp^2 - 0.0001589416vp*e - 0.01564875876vp*r^2 + 10595.3488538729m - 0.20058229561r^3 - 3779.36677209789r + 0.00000188662vp^3 + 17.15961790446vp - 0.01196093321vp^2 - 12.02153457047e + 2.08599454132r*vp + 48.24659270977r^2 = 0.902999752941448$ F CONTROL
$0.992830750119r*m + 0.00000146207vp*e + 0.000000035824r^3 - 0.453768162063r*%a - 0.793151433757vp*m - 0.000061382586r^2 + 0.309230475513r - 0.738340173622vp - 0.036364593262e + 313.823661568343%a - 0.000042835729r*e + 0.000386464055vp^2 - 0.000205003364r*vp + 2216.99037365069m - 0.107200524602vp*%a - 0.000000042571vp^3 = 0.790268818635849$ F MK
$-0.000037375618076r^3 + 0.011868r^2 - 0.000073970738269vp^2 - 0.00145081vp*r + 0.000000016977591vp^3 + 0.08753669vp + 1.22482457m - 0.02862285e + 3.39684226r + 12.9322657%a = 0.81497303$ F CBC

Tabla 6. Ecuaciones para predecir los esfuerzos a flexión

Los valores de confiabilidad se muestran en la tabla 7; entre más se aproxime el factor de correlación al valor de 1 las predicciones serán más exactas.

Factores de confiabilidad de las correlaciones		
Material	Cubos	Prismas
CONTROL	0.847	0.903
CBC	0.804	0.815
MK	0.824	0.790

Tabla 7. Factores de confiabilidad de las correlaciones

6. CONCLUSIONES

En la mayoría de los modelos los parámetros de mayor importancia fueron la velocidad de pulso y la resistividad. Nuestros factores de correlación son un poco bajos en comparación a los presentados por los trabajos mencionados sin embargo nuestro modelo puede ser aplicado con materiales locales y obtener resultados confiables, de acuerdo a las condiciones planteadas en esta investigación.

Aunque en este caso tenemos una variante muy importante a analizar, esta es la actividad puzolánica, que se manifiesta en el comportamiento del espécimen a lo largo del tiempo. Es un poco difícil de predecir, ya que varía de un material a otro, inclusive varía de un porcentaje a otro utilizando los mismos materiales. En general los materiales que han presentado buenos resultados, incluso han superado al testigo en cuanto a resistencia a carga axial son el MK hasta un 15% de sustitución y la CBC en un 5% y 20%, en el resto de los materiales por lo general el 5% de sustitución ha sido el óptimo. Se concluye que este trabajo es solo una pequeña aportación de todos los parámetros que se debería ahondar en su investigación, para poder utilizar alguno de estos materiales como sustituto parcial del cemento, en base a un diseño por durabilidad.

7. AGRADECIMIENTOS

LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”, FACULTAD INGENIERÍA CIVIL, UMSNH.

8. REFERENCIAS

- [1]. Águila I.; Soso M., (2008), Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Universidad Central de Venezuela: Revista de la Facultad de Ingeniería 4, págs. pp.51-62.
- [2]. Arguello Hernández, S. C. (2012). "Análisis comparativo entre técnicas no destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus". Tesis de maestría, UMSNH, Morelia, Michoacán.
- [3]. ASTM C 109M, (2002). I. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). U.S.A.
- [4]. Bernabé Reyes C. (2015). "Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación. Tesis de maestría, Morelia: UMSNH, Morelia, Michoacán.
- [5]. Chávez García, H. L. (2011). Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos locales y cemento CPC30R RS. Tesis de doctorado, CIDEM, Morelia, Michoacán.
- [6]. Cruz L. (2012), Comportamiento Mecánico del Carbón Mineral y de la Escoria de Alto Horno en Morteros como sustituto parcial del cemento, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán México.
- [7]. Escalante, J.I.; Navarro, A.; Gómez, L. Y. (2011). "Caracterización de morteros de cemento portland sustituido por metacaolín de baja pureza". Revista ALCONPAT: pp. 156-169.
- [8]. Navarro L. M.; Martínez, W.; Espinoza, J. A. (2011). Análisis de Materiales (Tercera edición ed.). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [9]. Sánchez de Guzmán D., (2006), Concretos y morteros, Colombia, Instituto del Concreto.

Estudio De La Durabilidad De Un Recubrimiento Orgánico Aplicado Sobre Acero De Refuerzo Embebido Concreto Mediante Técnicas Electroquímicas.

K. Cambranis Acosta¹, T. Pérez López¹, E Chavez²

¹Centro de Investigación en Corrosión, Av. Agustín Melgar s/n. Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, Cam., México.

²Secretaría de la Defensa Nacional, Dir .Gral. Ings., U.D.E.F.A., E.M. I., Calzada México-Tacuba s/n, Del. Miguel Hidalgo, México. D.F., México.

RESUMEN

La corrosión es uno de los fenómenos que afectan la integridad de las estructuras de concreto, por lo cual, uno de los métodos para protección en las varillas de acero de refuerzo que se ha implementado es el uso de recubrimientos orgánicos, esto, con el fin de contribuir al cuidado del medio ambiente. Para este ensayo se empleó material reciclado (poliestireno expandido). Se elaboraron dos series de cilindros una con 3.5% de NaCl en el agua de amasado y otra con agua purificada. Para el análisis del funcionamiento del recubrimiento se implementaron tres técnicas electroquímicas: Espectroscopía de Impedancia Electroquímica, Resistencia a la polarización y Ruido Electroquímico. Los resultados demuestran que la varilla se encuentra activa pero empiezan a desarrollar óxidos, por lo tanto el recubrimiento orgánico no está funcionando como protector para disminuir la velocidad de corrosión.

Palabras clave: corrosión; recubrimiento; orgánico; concreto; refuerzo.

Kareli Guadalupe Cambranis Acosta. (karelicambranis16@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión metálica es un proceso de oxidación química o electroquímica, en el cual el metal transfiere electrones al ambiente y sufre un cambio en su número de valencia, de cero a un valor positivo (Pérez, 2004)

La reacción de que se produce en el fenómeno de la corrosión depende de la naturaleza química del entorno y de la concentración efectiva de las especies reactivas. El efecto de la corrosión es una alteración de propiedades de los materiales afectados, que viene acompañado de una pérdida de material.

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: (Traconis de Rincón, 2000)

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación
- Un cátodo, donde ocurre la reducción
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

La aplicación de recubrimientos es uno de los métodos actuales para evitar o retrasar la corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto. Con la finalidad de contribuir al cuidado del medio ambiente se ha implementado material reciclado orgánico para la fabricación de recubrimientos.

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas.

Los resultados obtenidos muestran que el recubrimiento aplicado no aporta una barrera física que incremente la resistencia del refuerzo de acero contra la corrosión. Se aprecia el efecto de la adición de NaCl en el agua de amasado y las condiciones de exposición sobre la respuesta electroquímica de la intercara concreto refuerzo embebido.

2. PROCEDIMIENTO

1.1. *Diseño de la mezcla*

Las pruebas a las que fueron sometidas los agregados finos y gruesos son: absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a la norma mexicana NMX C-111(NMX C 111 2004). La dosificación de los componentes: agregado grueso, agregado fino, cemento, agua y aditivo fue llevada a cabo de acuerdo a la Norma ACI 211.1 (ACI 211.1 2002).

1.1.1. *Elaboración de cilindros*

Se usaron varillas de refuerzo convencional para construir los cilindros armados de 3/8" (0.95 cm) de diámetro y una longitud de 18 cm. Las varillas fueron limpiadas, delimitadas mediante una pintura y cinta aislante, dejando 5 cm para la aplicación del recubrimiento orgánico al centro de cada una de ellas. La Figura 1 muestra la aplicación del recubrimiento en la varilla.

Se elaboraron dos series de cilindros: una de concreto simple para ensayos de carbonatación y otra con una varilla embebida en el centro, como se muestra en la Figura 2. A la mezcla de una serie se le agregó NaCl al 3.5% y en la complementaria solo se usó agua purificada.

Las dimensiones de diseño son:

- 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura.
- Relación agua cemento (a/c) de 0.57.

La Figura 2 muestra los especímenes de concreto simple y reforzado.



Figura 1. Aplicación del recubrimiento orgánico.



Figura 2. Cilindros de concreto simple y reforzado.

1.1.2. Sitios de exposición

Fueron elegidos para la experimentación cuatro condiciones con la finalidad de observar el efecto de cada una de ellas en el deterioro de las muestras.

Sitio de exposición	Características
Azotea del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche. Testigo, T)	Exposición atmosférica natural
Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP)	Ubicado sobre la línea de costa de San Francisco de Campeche en el km 5 de la carretera Campeche-Lerma. En este sitio se

	han realizado proyectos de corrosión atmosférica desde 1993, por lo que se cuenta con información de su agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223[5]
Cámara de carbonatación acelerada (CCA)	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad relativa $65 \pm 5 \%$, • Temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}, \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ • Concentración de CO_2 de 1.2%. Estos parámetros son registrados empleando sensores de temperatura y humedad relativa (HOBO ware Pro V2) y CO_2 (Telaire 7001).
Disolución de NaCl (SS)	Inmersión permanente con una concentración de NaCl 3.5% en peso, aproximando agua de mar.

Tabla 1. Sitios de exposición de las muestras.

1.1.3. Técnicas Electroquímicas

El seguimiento se hizo utilizando una celda convencional de tres electrodos, siendo el refuerzo de acero el electrodo de trabajo, una placa envolvente de acero inoxidable 304 el contraelectrodo y un electrodo de calomelanos saturado como referencia. Se llevaron a cabo los ensayos:

- Resistencia de polarización (R_p), con un barrido de -20 a 20 mV con respecto al potencial de corrosión (E_{corr}).
- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE) con un barrido desde $100,000$ a 0.001 Hz, con amplitud de 10 mV.
- Ruido electroquímica (RE) registrando 1024 mediciones en potencial y corriente con un registro cada segundo.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la técnica de EIE con un periodo de pruebas de seis meses.

Probetas expuestas en Cámara de Carbonatación

En las Figuras 3 y 4 se aprecian los espectros de las muestras expuestas a la cámara de carbonatación CCA. La impedancia en los espectros con NaCl tiene un orden de magnitud entre 10000 y 100000 ; en los espectros sin contenido de NaCl el orden de magnitud es muy similar. La impedancia es alta ya que se mantiene bajo condiciones constantes la humedad relativa de $65 \pm 5 \%$, permitiendo estabilidad de la película pasiva sobre la superficie del acero. Aunque el proceso de carbonatación se da rápido este no influye para que la varilla desarrolle corrosión, por los niveles de humedad relativa que no permiten humedad sobre el acero. Se observa que no tiene influencia la presencia de NaCl en los especímenes expuestos en la cámara de carbonatación, CCA.

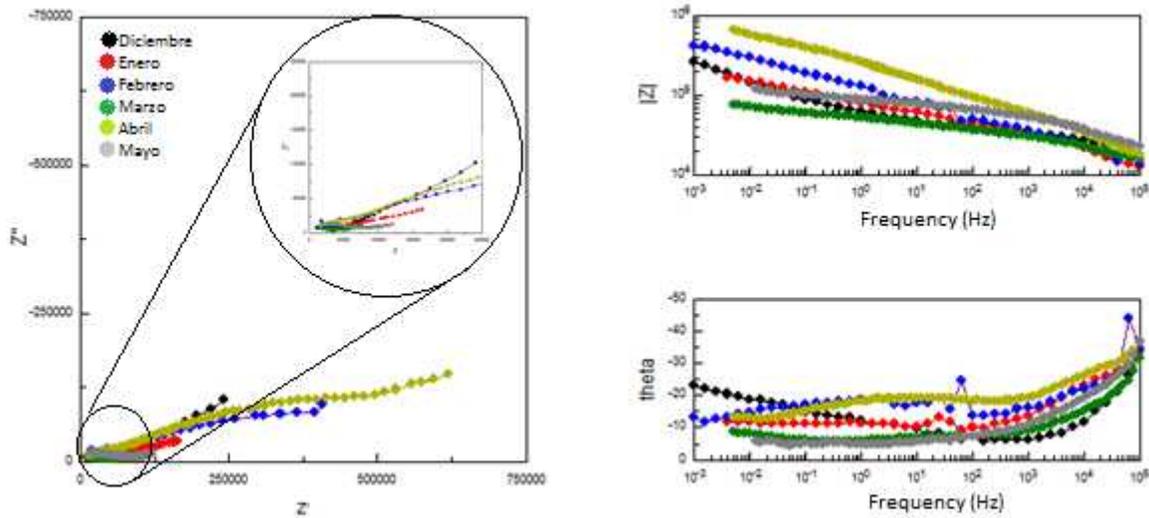


Figura 3. Espectros de especímenes con NaCl expuestos en la CCA.

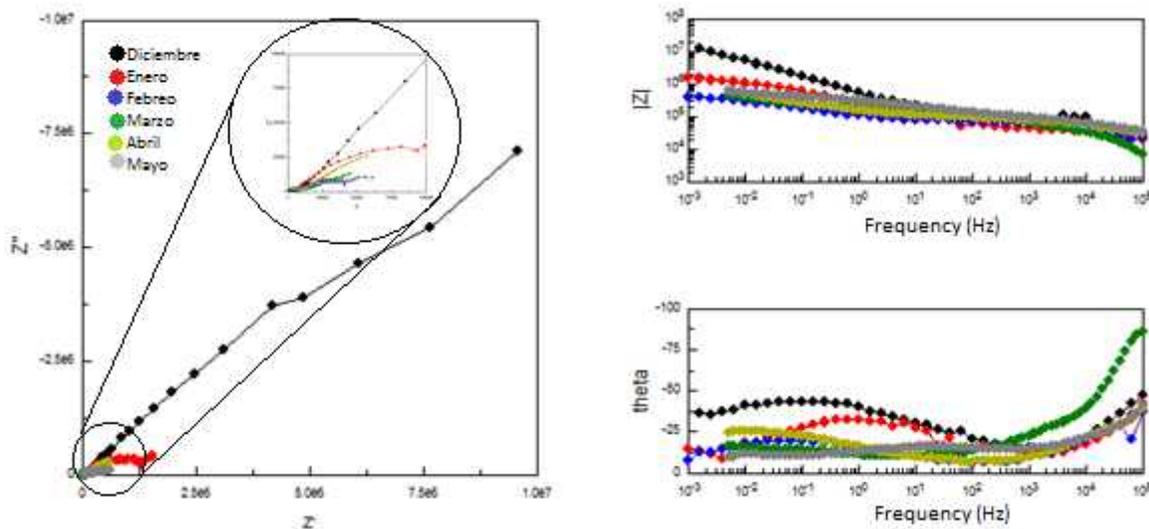


Figura 4. Espectros de especímenes sin NaCl expuestos en la CCA.

Probetas expuestas en Solución Salina

Los espectros de las probetas inmersas en solución salina se muestran en la Figuras 5 y 6 donde se observa que la interfase se ve afectada, iniciando el proceso de corrosión, cabe mencionar que la adición de NaCl en el colado no influye en esta serie de cilindros.

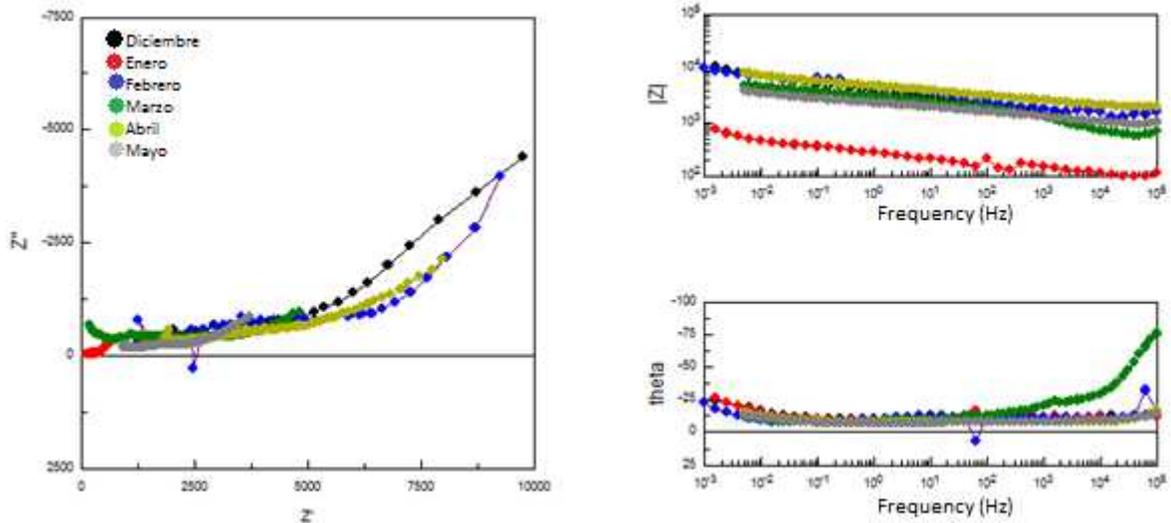


Figura 5. Espectros de especímenes con NaCl expuestos a solución salina al 3.5%

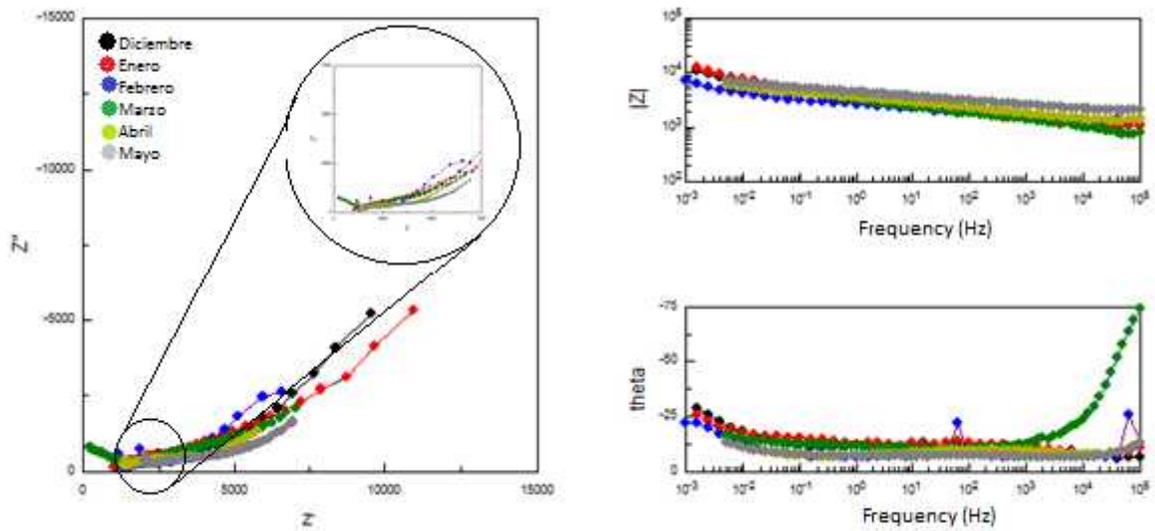


Figura 6. Espectros de especímenes sin NaCl expuestos a solución salina al 3.5%

Probetas Expuestas en el CRIP

Las figura 7 y 8 muestran los espectros de las probetas expuestas en CRIP, en la gráfica con NaCl se muestra que el orden de magnitud es mayor con respecto a las que no contienen, estas series tiene un orden de magnitud similar a las probetas expuestas en la cámara de carbonatación.

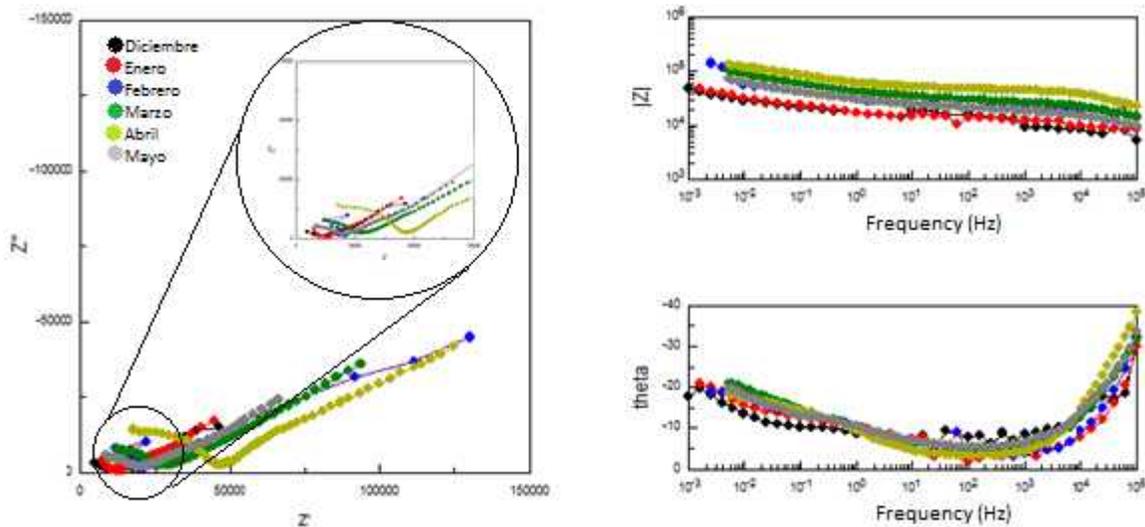


Figura 7. Espectros de especímenes con NaCl expuestos en el CRIP

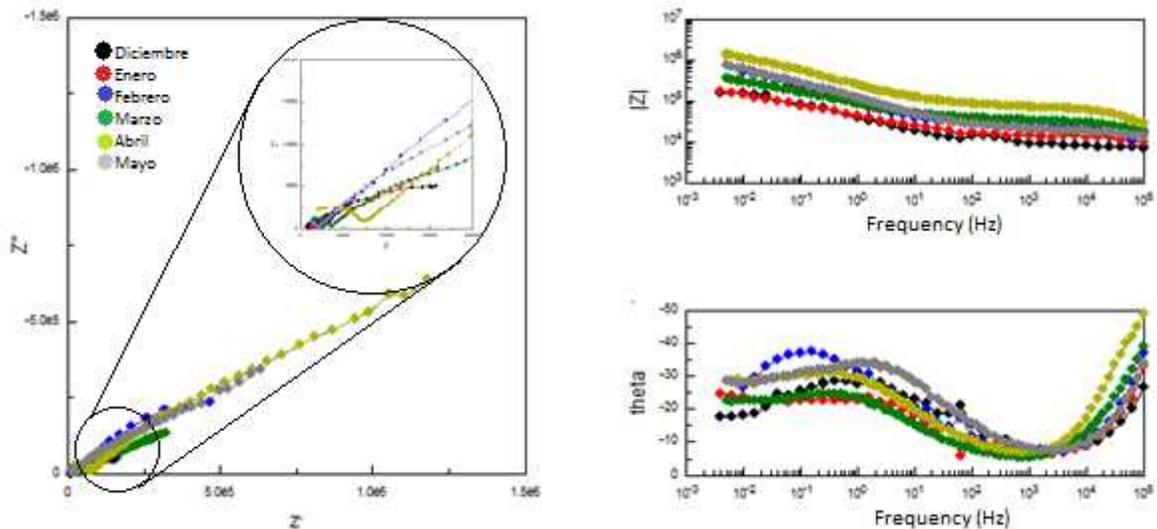


Figura 8. Espectros de especímenes sin NaCl expuestos en el CRIP

Probetas expuestas en CICORR

La serie de probetas expuestas en CICORR se ilustran en la Figura 9 y 10 presenta una impedancia mayor, las condiciones naturales influyen, dando como respuesta una resistividad por parte del concreto.

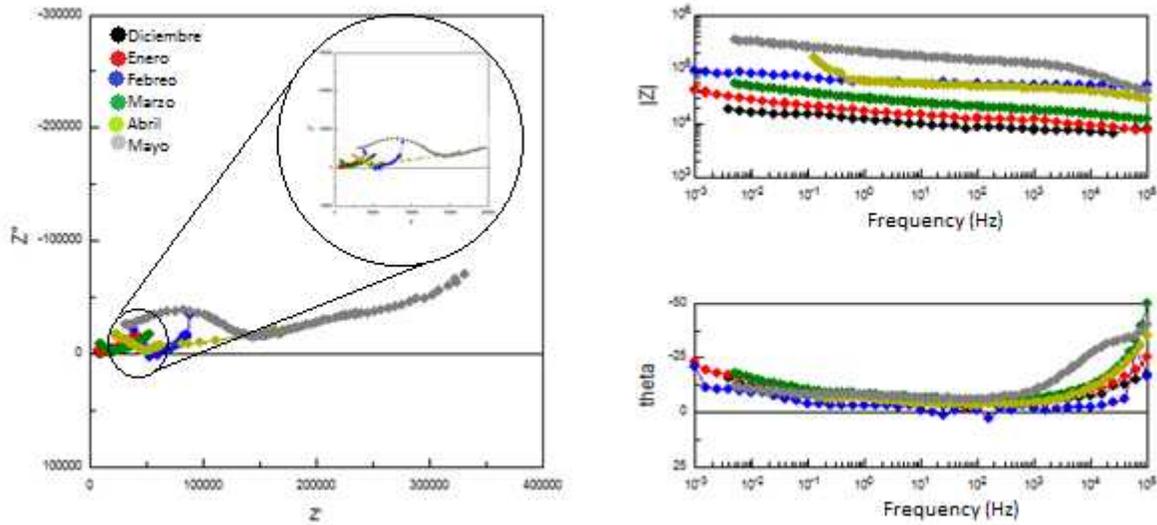


Figura 9. Espectros de especímenes con NaCl expuestos en el CICORR

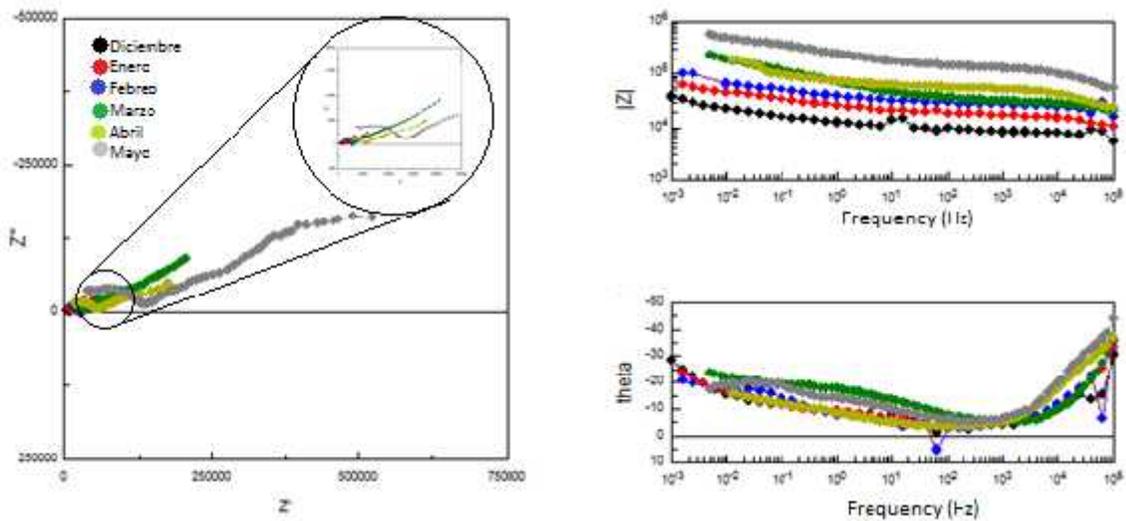


Figura 10. Espectros de especímenes sin NaCl expuestos en el CICORR

Ruido Electroquímico

Los datos obtenidos en la prueba de Ruido Electroquímico realizados en un periodo de seis meses y tratados con la rutina de ajuste de un simulador, se ilustran en la figura 11, donde se observa que la serie de solución salina (SS) se encuentra en un rango menor con respecto al resto de las series. Esto indica que la presencia de agua permanente en el concreto favorece su activación. Para la serie en la cámara de carbonatación, el intervalo de humedad mantiene valores elevados de resistividad del concreto, y por tanto baja agresividad. En las exposiciones naturales como CICORR y CRIP, la variación de humedad relativa propicia llenado-vaciado de los poros del concreto, llevando a valores de resistividad elevados que mantienen sin actividad la interfase concreto varilla.

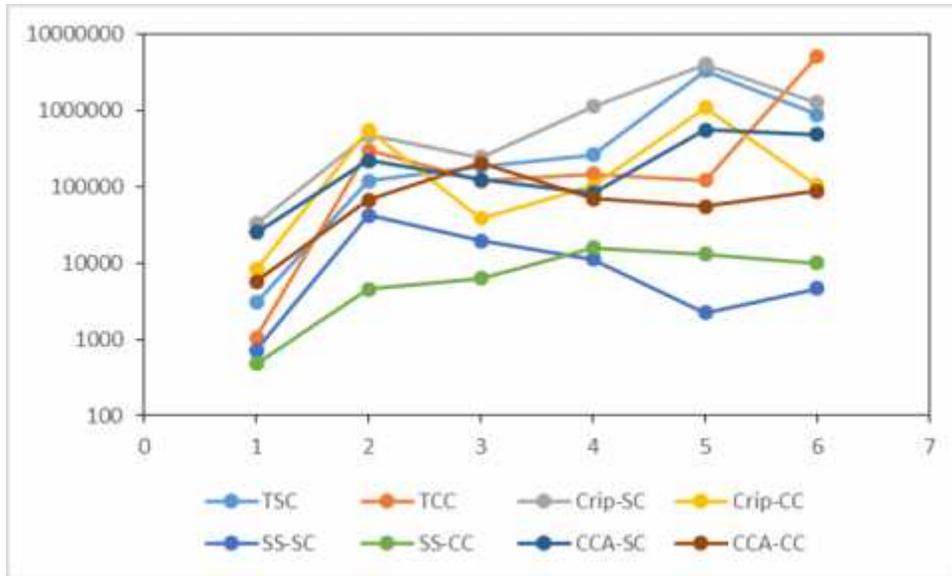


Figura 11. Valores de Resistencia en ruido (RE). SS: Solución salina; T: Testigo, CICORR; CCA: Cámara de carbonatación acelerada; CRIP: Centro Regional de Investigaciones Pesqueras.

Resistencia de Polarización

En la figura 12 se presentan los valores medidos de la resistencia a la polarización obtenidos de cada una de las probetas durante el periodo de exposición. Los especímenes se muestran activos en los primeros meses, como se puede ver con el paso del tiempo la Rp va en aumento.

Las probetas expuestas a la cámara de carbonatación presentan una mayor resistividad esto debido a las condiciones de humedad que se encuentran controladas, en el caso de las probetas expuestas a solución salina son las que tienden a estar más activas.

Los valores obtenidos son cercanos a los de resistencia en ruido.

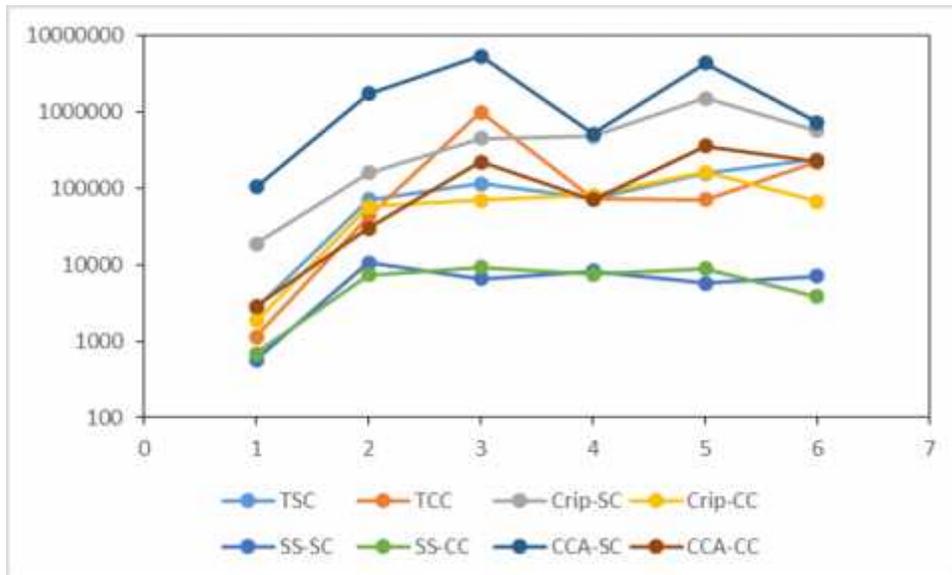


Figura 12. . Valores de Resistencia de la Polarización (Rp). SS: Solución salina; T: Testigo, CICORR; CCA: Cámara de carbonatación acelerada; CRIP: Centro Regional de Investigaciones Pesqueras.

4. CONCLUSIONES

La serie de probetas inmersas en NaCl son las que muestran menor impedancia, Rp y RE, lo que indica que la humedad permanente afecta las condiciones de la intercar entre el concreto y la varilla. Cabe mencionar que este medio es el más agresivo por el alto contenido de cloruros.

En las gráficas de Ruido Electroquímico y Resistencia a la polarización se observa que en los primeros meses de prueba la varilla se encuentra activa pero como va transcurriendo el tiempo las varillas se empiezan a desarrollar óxidos.

El recubrimiento orgánico no está funcionando como protector para disminuir la velocidad de corrosión en la varilla.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto CB-169092.

6. REFERENCIAS

ACI 211.1, Práctica estándar para la selección de la proporción: concreto normal, peso pesado, USA, (2002). (Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete)

N. Pérez, La Ciencia de Electroquímica y Corrosión, Springer Science & Business Media, Alemania (2004). (Electrochemistry and Corrosion Science)

NMX C 111, Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba, México, (2004).

Trocónis de Rincón Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.- CYTED.- Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. pp. 13-14, pp.21,pp. 38-40

Pérdida de adherencia en la interfase acero-concreto debido al ion K^+ y Na^+ en una mezcla modificada con fly ash bajo protección catódica.

J. García .¹, C. Barrios.², F. Almeraya.¹, I. López.¹, C. Gaona.¹, A. Martínez.¹

1 Depto. de Física de Materiales/Grupo corrosión. Miguel de Cervantes 120. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Chih., México.

2 Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Sinaloa Campus Los Mochis, UAS, Facultad de Ingeniería, Los Mochis Sinaloa, México.

RESUMEN

En este trabajo se estudió la degradación de adherencia en la interfase acero-concreto bajo condición de protección catódica por corriente impresa, en dos mezclas elaboradas de cemento portland ordinario (CPO) y sustituyendo un 15% de cemento por ceniza volante (fly ash) (CPOFA). Los especímenes se evaluaron con dos niveles de protección: protección (-900 ± 100 mV vs Ag/AgCl) y sobreprotección ($-1,200 \pm 100$ mV vs Ag/AgCl). De acuerdo a el análisis químico mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) realizado a la pasta de concreto en la interfase acero-concreto, se observa mayor concentración de ion potasio (K^+) y ion sodio (Na^+) en los especímenes con nivel de sobreprotección, lo cual presenta una pérdida de adherencia de acuerdo a los resultados por las pruebas de tensión.

Palabras clave: Protección Catódica, Corriente Impresa, Adherencia acero-concreto, K^+ , Na^+ , Fly ash.

In this work is studied the degradation of adhesion in the interphase steel-concrete under impressed current cathodic protection condition on two mixtures made with ordinary Portland cement (OPC) and replacing a 15% of cement by (fly ash) (OPCFA). The specimens were evaluated with two levels of protection: protection (-900 ± 100 mV vs Ag/AgCl) and over protection ($-1,200 \pm 100$ mV vs Ag/AgCl). According to chemical analysis by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) realized to the concrete powder in the interphase steel-concrete is observed a higher concentration of potassium (K^+) and sodium (Na^+) in specimens with overprotection level, which present a smaller adherence according to the results by the pull out test.

Key words: cathodic protection, impressed current, rebar-concrete adhesion, K^+ , Na^+ , Fly ash.

1. INTRODUCCIÓN

El esfuerzo de adherencia se presenta principalmente como consecuencia de la fuerza cortante, entre el elemento de refuerzo y el concreto que lo envuelve, y se puede describir como un esfuerzo local de cortante por unidad de área de la superficie de la varilla¹. La adherencia cumple fundamentalmente dos objetivos: asegurar el anclaje de las varillas y transmitir las tensiones tangentes periféricas que aparecen en la armadura principal como consecuencia de las variaciones de su tensión longitudinal. El fenómeno de la adherencia está originado por dos tipos de causas, una de naturaleza físico-química y la otra de carácter netamente mecánica². Las primeras provocan la adhesión del acero con el concreto a través de fuerzas capilares y moleculares desarrolladas en la interface, las de origen mecánico son más importantes y están constituidas por la resistencia al deslizamiento debida a la penetración de pasta de cemento en las irregularidades de la varilla de acero. El mecanismo de la adherencia puede asignarse a tres causas: adhesión, rozamiento (tensiones tangentes en el concreto) y acuñaamiento (en caso de varilla corrugadas).

Por otro lado una de las causas principales considerada en la limitada duración de las estructuras de concreto reforzado es la corrosión por penetración de cloruros NaCl ³. Por lo cual se recurren en la práctica a diferentes técnicas para combatir este problema, entre estas, las más utilizadas es la técnica de protección catódica la cual involucra la supresión del flujo de corriente en la celda galvánica, ya sea por la provisión externa de corriente en la dirección opuesta o por el uso de ánodos de sacrificio. El método de la corriente impresa es aplicado comúnmente para la protección contra la corrosión en estructuras de concreto reforzado contaminado con cloruros^{4,5}. Sin embargo pueden existir efectos secundarios sobre estas que afecten el enlace que existe entre la interfase del acero de refuerzo y el concreto. Física y químicamente la no homogeneidad de la distribución de la corriente de protección catódica puede no ser uniforme y quedan áreas sin protección en la estructura^{6,7}. De acuerdo a estudios realizados se ha reportado que la fuerza de adherencia disminuye debido a la corriente de protección y sobreprotección catódica, Ya que esta produce un suavizamiento en los silicatos de calcio hidratados (C-S-H gel)⁸⁻⁹. Se ha encontrado que este fenómeno es ocasionado por la emigración de iones K^+ y Na^+ entre la interfase acero concreto, durante la polarización catódica de la varilla ocasionando este suavizamiento en el C-S-H gel¹⁰⁻¹¹.

En este trabajo se estudia la fuerza de adherencia que pierde el acero de refuerzo embebido en el concreto al estar bajo condición de protección y sobreprotección catódica por corriente impresa. Considerando para esto dos tipos de mezcla: cemento portland ordinario y la otra sustituyendo un 15 % del cemento por fly ash, ambas con una relación agua-cemento $a/c = 0.66$. Las cenizas volantes (fly ash) se utilizan en el concreto por varias razones económicas y ambientales. Por otra parte, las partículas de las cenizas volantes reaccionan con el hidróxido de calcio, produciendo productos de hidratación que disminuyen fuertemente la porosidad del concreto¹². Estudios han reportado la alta calidad de adhesión y el mejoramiento mecánico al utilizar estas cenizas y la escoria de alto horno (BFS) debido al incremento de los volúmenes del C-S-H gel¹³

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se elaboraron 14 especímenes cilíndricos de concreto, con relación a/c de 0.66 utilizando como refuerzo una varilla de acero al carbono 1018, embebida 10.5 cm en el centro de estos cilindros, con un diámetro de 3/8 in (0.95 cm), un extremo de la varilla se recubrió con cinta aislante termoplástica dejando un área expuesta de 31.42 cm². Las dimensiones del espécimen cilíndrico fue de 15 cm de alto por 7.5 cm de diámetro como lo muestra la fig. 1. De los cuales en 6 de ellos se reemplazó un 15% de cemento por fly ash, y dos no tuvieron ningún tipo de exposición siendo las muestras control. Los 14 especímenes se sometieron a 28 días de curado sumergidos en agua.

TABLA 1.- Dosificación de las mezclas para la relación a/c de 0.66, cemento portland Tipo 1.

Mezcla	Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Fly ash kg/m ³
CPOFA	205	263.5	1049	781	46.5
CPO	205	310	1049	781	---

Posterior a la etapa de curado los cilindros de ambas mezclas se sumergieron en una solución de NaCl al 3.5% con la nomenclatura mostrada en la tabla 2, y se les instaló un sistema de protección catódica por corriente impresa. Como ánodo se utilizaron barras de grafito de ¼ in. (0.635 cm) de diámetro y una longitud de 15 cm. El rectificador utilizado fue de 20 V 10 A, seis de los cilindros se les sometió a un criterio de potencial de protección de -900 ± 100 mV, y al resto de sobreprotección de $-1,200 \pm 100$ mV vs Ag/AgCl¹⁴. El tiempo de exposición fue de dos, tres y cinco meses durante este tiempo se mantuvieron con potenciales de protección y sobreprotección, para lograr esto se realizó un circuito eléctrico y dejar fluir la corriente necesaria para obtener estos potenciales como lo muestra la Fig.2, utilizando como electrodo de referencia Ag/AgCl y obteniendo el arreglo experimental final de la fig. 3

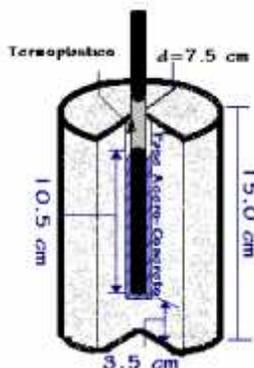


Figura 1.- Dimensiones del cilindro de experimentación.

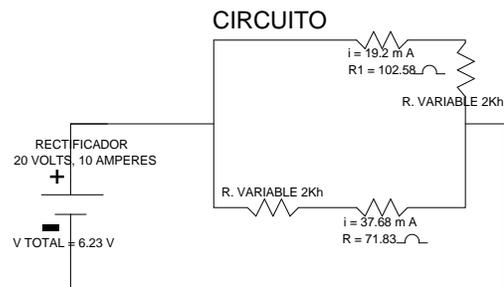


Figura 2.- Circuito para mantener los especímenes en potenciales de protección y sobreprotección.

Después de los tiempos de exposición bajo condición de protección y sobreprotección catódica se extrajeron los especímenes de ambas mezclas y se les realizó una prueba de tensión con la maquina Instron 4469 como lo muestra la fig. 4, este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM E8 ¹⁵. Posteriormente se extrae un gramo de polvo a una profundidad de 1cm y un gramo de la interfase que existe entre el acero y el concreto en ambas mezclas. A estas se les realiza un aforamiento de 1g en 100 ml de solución y se les deja agitando mediante 24 horas; Esto con el fin de alcanzar una mejor disolución, a estas muestras se les realizo un análisis químico para conocer la concentración de iones K^+ y Na^+ mediante espectrofotometría de absorción atómica (FAAS) el análisis se realizó con un espectrofotómetro modelo Avanta Sigma. Una vez realizado esto, se cortan pequeñas muestras de concreto de ambas mezclas, en la interfase que existe entre el acero de refuerzo y el concreto, y se hacen pruebas de microscopia electrónica de barrido (MEB). El análisis se realizó con un microscopio marca Jeol JSM-5800LV, con el objetivo de conocer la microestructura de la mezcla con ceniza volante (fly ash) en la interfase acero-concreto a diferencia del cemento portland ordinario.

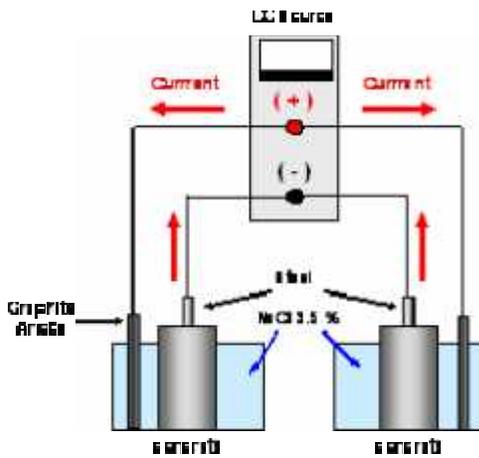


Figura 3.- Arreglo experimental del sistema de protección catódica para los especímenes



Figura 4.- Maquina universal para realizar pruebas de tensión, Modelo instron 4469

TABLA 2.- NOMENCLATURA DE CILINDROS EXPUESTOS

Nomenclatura	Tipo de cilindro
CPOP	Cemento Portland ordinario protegido
CPOSP	Cemento Portland ordinario sobreprotegido
CPOFAP	Cemento Portland mas fly ash protegido
CPOFASP	Cemento Portland mas fly ash sobreprotegido

DISCUSION DE RESULTADOS

En la fig. 5 Se observa como al suministrarle la corriente de protección catódica adecuada y con un potencial de protección, la emigración de iones K^+ son menores que cuando se le suministra un flujo de corriente mayor y por lo tanto un potencial de sobreprotección.

Para tiempos de exposición de dos meses. Por otra parte se visualiza que la emigración de iones K^+ son mayores en el CPO, que en la mezclas hechas con ceniza volante (fly ash) CPOFA en la interfase acero-concreto con sobreprotección.

En la fig. 6 se puede ver como la emigración de los iones Na^+ es en mayor cantidad que en los iones K^+ . Es notorio que al tener mayor flujo de corriente emigran con mayor facilidad hacia la interfase acero-concreto en ambas mezclas. Sin embargo también nos muestra como en las mezclas hechas con fly ash tiene mayor flujo de iones Na^+ , En los tiempos de dos y cinco meses, tanto en la protección como en la sobreprotección que en el CPO, esto puede ser porque la estructura atómica del ion Na^+ es más pequeña que la del ion K^+ y por lo tanto puede migrar hacia la interfase acero-concreto en los pequeños poros de la mezcla de CPOFA, lo cual no sucede con el ion K^+ . A diferencia de tres meses de exposición que solo fue mayor la de protección. Es notario que en los especímenes expuestos a dos y cinco meses la emigración de iones K^+ y Na^+ , no se comportaron de una forma homogénea, a diferencia de los especímenes expuestos a tres meses, que si lo mantuvieron de acuerdo a las figuras 5,6.

En la figura 7 se observa la concentración de K^+ a un centímetro de profundidad y se puede observar que en los especímenes con potencial de protección tienen mayor concentración de iones, esto posiblemente porque no tienen la suficiente facilidad de fluidez hacia la interfase acero-concreto. Por otra parte en los especímenes con potencial de sobreprotección se tiene menos concentración esto se le puede atribuir a que como se le aplica más corriente los iones K^+ pueden migrar de una manera más fácil. Por otro lado en la concentración de iones Na^+ se puede notar que estos se concentran más en los especímenes con sobreprotección debido a que la aplicación de mayor corriente facilita el flujo de iones Na^+ por mecanismo de difusión ¹⁶, provenientes del medio acuoso NaCl hacia la masa de concreto como lo muestra la fig. 8.

La Figura 9 muestra los resultados de pérdida de adherencia obtenidos de las pruebas de tensión, comparándolos con las mezclas control. Se puede observar que a dos meses de exposición la mezcla de CPO tanto en protección como en sobreprotección tuvieron perdida, siendo más considerable la del espécimen en sobreprotección, a diferencia de la mezcla de CPOFA que solo tuvo perdida en el nivel de sobreprotección. En cuanto a tres meses de exposición se puede notar solo perdida de adherencia en el espécimen CPO sobreprotegido y que de acuerdo a los resultado obtenidos por análisis químico este espécimen tuvo mayor concentración de ion K^+ y Na^+ , a cinco meses de exposición se puede notar que la perdida de adherencia se refleja en ambos niveles de protección para la mezcla CPOFA, ya que en la mezcla de CPO solo fue en el nivel de sobreprotección, lo cual esto refuerza nuestros resultados del análisis químico debido a que estos en promedio tuvieron mayor concentración de iones K^+ y Na^+ en la interfase acero-concreto.

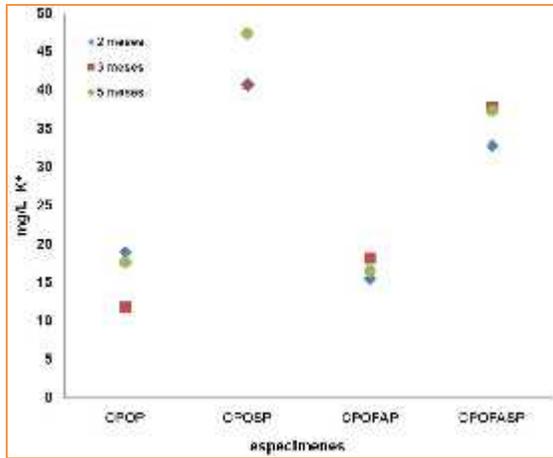


Figura 5.- Penetración de iones K⁺ en la interfase acero-concreto.

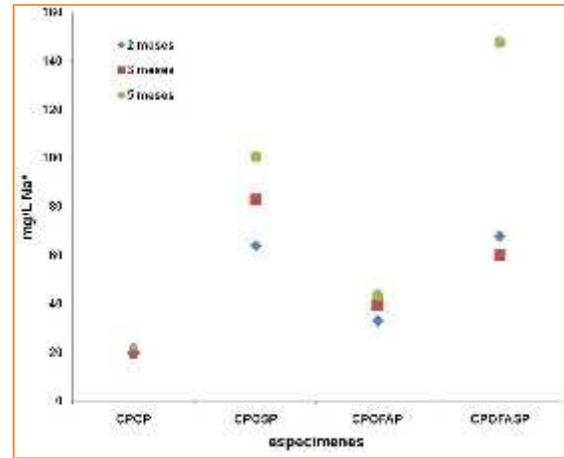


Figura 6.- Penetración de iones Na⁺ en la interfase acero-concreto.

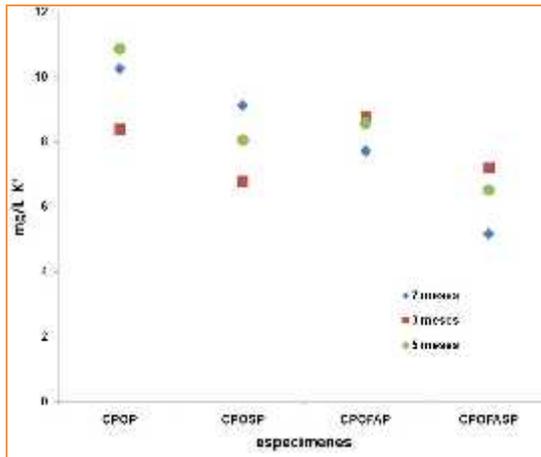


Figura 7.- iones K⁺ a un cm de profundidad

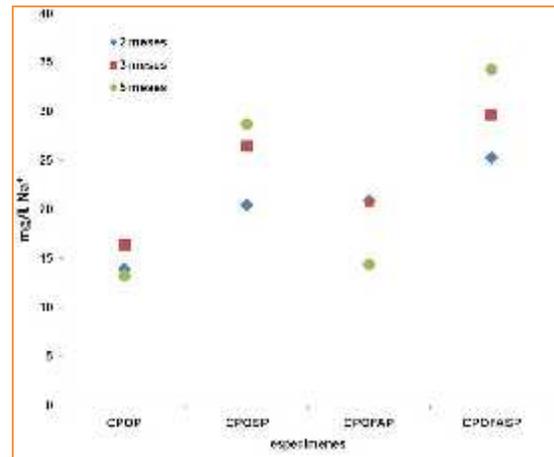


Figura 8.- iones Na⁺ a 1 cm de profundidad.

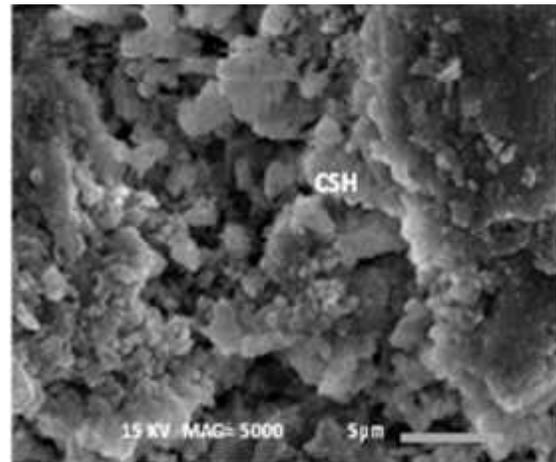
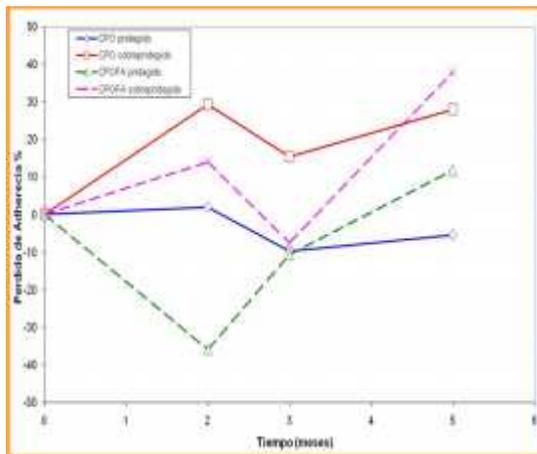


Figura 9.- Pérdida de adherencia en especímenes

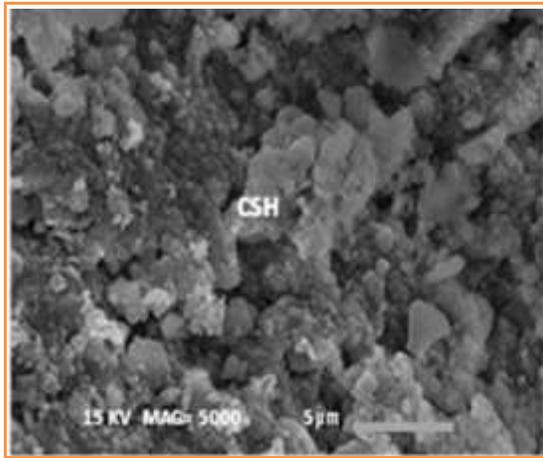


Figura 10.- CPOFA protegido. 5000x

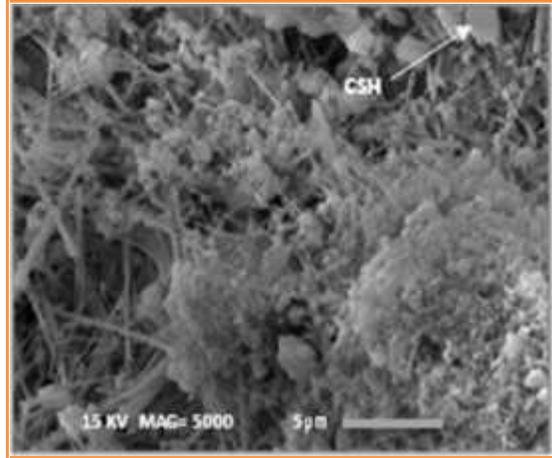


Figura 11.- CPO protegido. 5000x

Figura 12.- CPO sobreprotegido. 5000x

En la fig 10. Se puede visualizar la forma homogénea de C-S-H gel con potencial de protección y con mezcla realizada con CPOFA, por otro lado se puede notar también en la fig. 11 la microestructura de un espécimen con potencial de protección y mezcla de CPO la cual contiene productos de hidratación como etringita¹³ en forma de aguja y C-S-H gel, pero es notoria la diferencia contra el espécimen hecho con CPOFA ya que su microestructura es mucho mas homogénea con respecto al CPO. De acuerdo a los datos arrojados por las pruebas de tensión (pull out) y los de análisis químico (FAAS), se puede reforzar estos resultados con la fig. 12 en la cual se muestra la escasa cantidad de productos de hidratación en un espécimen con potencial de sobreprotección y una mezcla de CPO. Con estos resultados se puede afirmar que la corriente de sobreprotección catódica tiene efecto en el suavizamiento del C-S-H gel.

CONCLUSIONES

La pérdida de adherencia está relacionada a un incremento en la concentración de iones K^+ y Na^+ , en la interfase acero concreto. Provocado por el incremento de corriente al estar en condición de sobreprotección.

El incremento en la concentración de los iones K^+ y Na^+ debido a la condición de sobreprotección influyo en el suavizamiento del gel C-S-H con esto tener una mayor pérdida de adherencia en la interfase acero concreto.

En los especímenes con mezcla CPO se observó un mejor comportamiento en cuanto a perdida de adherencia a 5 meses de exposición que la mezcla de CPOFA, esto se soporta con los resultados de FAAS ya que en este tiempo de exposición la penetración de los iones Na^+ fueron mayores en esta mezcla.

En los especímenes con CPOFA tuvieron resultados mejores a dos y tres meses de exposición, en la que la diferencia de perdida de adherencia a dos meses si fue considerable. Por lo cual la mezcla de CPOFA arrojó los mejores resultados de perdida de adherencia a diferencia de los obtenidos de la mezcla de CPO.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen al Ing. Arturo Hernández del Laboratorio de Pruebas Mecánicas del CIMAV por el apoyo brindado para la realización de los ensayos de tensión (pull out) requeridos para el desarrollo de este trabajo de investigación.

3. REFERENCIAS

- A.L.A. Fraay, J.M. Bijen, Y.M. de Haan, *Cem. Concr. Res.* 19, 235 (1989).
- ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]1, 2 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.,3 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.,2000
- B.S Wyatt,D.J. Irvine, A review of Cathodic Protection of Reinforced Concrete, *Mater. Perform.* 26 (12-21) (1987).
- C. Andrade, Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from ionic Migration Cement and Concrete Research, 23(724-742) 1993.
- C. Andrade, M.A. San Juan, A. Recuero and O. Rio, Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from Migration Experiments, in non Steady-State Conditions, *Cement and Concrete Research*, 24(1214-1228) 1994.
- C.E. Locke, C. Dehghanian, L. Gibbs, Effect of Impressed Current on Bond Strength Between Steel Rebar and Concrete, *NACE Corrosion* 83, Paper No. 178, pp 178/1–178/16 , (1983).
- Edward G. Nawy, *Concreto Reforzado un Enfoque Básico*, 10 (409-417) 1988.
- Hanifi Binicia, Ismail H. Cagatayb, Tahir Shahc, Selim Kapurd, *Mineralogy of Plain Portland and Blended Cement Pastes*, *Building and Environment*,(2007).
- J. H Morgan, Imber Grove, Esher July, *Cathodic Protection* , 10 (448-449) 1959.
- J.A. Lehmann, Cathodic Protection of Reinforced concrete structures, *Mater. Perform.* 26 79-81 (1987).
- J.J. Chang, A study of the Bond Degradation of Rebar due to Cathodic Protection Current, *Cement and Concrete Research*, 32 (657–663) 2002.
- J.J. Chang, W. Yeih, R. Huang, Degradation of the Bond Strength Between Rebar and Concrete due to the Impressed Cathodic Current, *J. Mar. Sci. Tech.* 7 (2), 89– 93 (1999).
- P. Jiménez, A. Garcia Meseguer, F. Moran Cabre, El hormigón Montoya-Mesenguer-Moran 1(145-168).P. Pedefferri, Cathodic Protection and Cathodic Prevention, *Constr. Build. Mater.*10, 391–402 (1996).
- Rasheeduzzafar, M.G. Ali, G.J. Al-Sulaimani, Degradation of Bond Between Reinforcing Steel and Concrete due to Cathodic Protection Current, *ACI Mater. J.* 90 (1) 8– 15 (1993).
- Svolvear, Norway, Cathodic Protection of Reinforced Concrete—Principles and Applications, *Proceedings of the International Conference on Repair of Concrete Structures. From Theory to Practice in a Marine Environment*, (123–131) 1997.

Evaluación de la sustentabilidad de diferentes técnicas de producción de concreto hidráulico

L. M. Reynosa Morales¹, F. J. Olgún Coca², H. A. Guillén Trujillo¹, F. A. Alonso Farrera¹, P. Castro Borges³

RESUMEN

Hoy en día, la sustentabilidad en el ramo de la construcción es un factor crítico en el desarrollo de las sociedades. Una de las importantes dimensiones de este concepto es la influencia de la intensidad del consumo de recursos y su generación de residuos. El análisis eMergético, constituye una metodología adecuada para evaluar la sustentabilidad, ya que integra los diferentes tipos de flujos de energía que interactúan en los sistemas. En este trabajo, se aplicó el análisis de eMergético para realizar una valoración ambiental en la producción de concreto con el fin de evaluar su dependencia de los recursos naturales no renovables, influenciado por las entradas externas (importaciones). Se eligieron tres técnicas de fabricación: industrializada, semi-industrializada y con medios manuales. Esto se realizó para medir la cantidad de uso de los recursos del medio ambiente en términos de energía solar equivalente (seJ). Las transformidades resultantes se compararon con evaluaciones anteriores de eMergía hechas por otros autores con el fin de poner de manifiesto que el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia. El Índice de Inversión eMergética (EIR), el Índice de eficiencia eMergética (EYR), el Índice de Carga Ambiental (ELR) y el Índice de Sustentabilidad (ESI) se evaluaron y se presentaron como indicadores sintéticos de sustentabilidad. Los resultados obtenidos muestran una alta dependencia en la producción de concreto sobre las fuentes de recursos externos, resultando el concreto semi-industrializado el más sustentable. Destacando la insustentabilidad de las técnicas estudiadas debido a la dependencia de insumos externos procedentes de sistemas económicos; esto es, además, confirmado por el hecho de que la mayor proporción de los insumos para el proceso no son renovables.

Palabras clave: Análisis eMergético, Contabilidad ambiental, Sustentabilidad, Transformidad, Concreto hidráulico.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de grandes volúmenes de concreto se emplea generalmente para la construcción de edificios, particularmente, para la construcción de cimentaciones, marcos estructurales, pisos, losas, y elementos prefabricados (Pulselli et al., 2007).

El cemento es el componente principal del concreto, que a su vez, después del agua, es el material de mayor consumo en el mundo. Por lo tanto, los impactos ambientales del cemento siempre están asociados a los del concreto.

La producción mundial de cemento ha ido aumentando constantemente desde principios de 1950, especialmente en los países en desarrollo, según datos de la Revista Internacional del Cemento (ICR Research) en el año 2012 se produjeron alrededor de 3,939 millones de toneladas, con un crecimiento anual de alrededor del 8 al 9%; duplicándose en menos de 20 años. Asia ha sido la fuerza impulsora junto con China e India siendo actualmente los principales productores de cemento, seguidos por Estados Unidos.

En el año 2012 se estima que la producción de cemento en América Latina y el Caribe haya alcanzado los 180 millones de toneladas. Manteniéndose el liderazgo de Brasil en la producción de cemento seguido de México, Colombia y Argentina. En 2012 el consumo per cápita estimado para América Latina y el Caribe es de 301 kg/hab; en México 305 kg/hab.

Según las cifras del informe del ICR Research, la producción de cemento de América Latina y el Caribe equivale al 4.7% de la producción mundial (estimación 2012). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) la producción en México para el año 2012 fue de 41,608,413 toneladas.

Por otra parte, la industria del cemento libera aproximadamente el 5% de las emisiones mundiales de CO₂. El impacto ambiental debido a la emisión de contaminantes, partículas, cenizas y dióxido de carbono ha sido investigado en gran medida en los últimos años (Kjellsen et al., 2005; Pade y Guimaraes, 2007), así como el ciclo de vida del cemento y concreto (Vold y Ronning, 1995; Nisbet y Van Geem, 1997), (Josa et al., 2004; Josa et al., 2007; Nazar, 2013) y la huella ecológica del concreto (Bastianoni et al., 2007).

El concreto se produce al mezclar una parte de cemento y agua con diversos materiales inertes; los que se utilizan más comúnmente son la arena y la grava triturada. Luego que el cemento y el agua se combinan, comienza un proceso físico-químico que se conoce como fraguado y en unas cuantas horas la mezcla comienza a endurecerse; la pasta sirve para aglutinar los materiales inertes en una masa sólida. En condiciones ideales, el proceso de fraguado continuará hasta que el concreto adquiera la característica de dureza requerida. La cantidad de cemento, el tamaño y propiedades de los agregados y el porcentaje de agua en la mezcla dan resultados diferentes. La mezcla es un proceso muy importante para las propiedades técnicas del concreto que varían según su área de aplicación.

La Asociación Mexicana de Concreteros Independientes (AMCI) estimó para el año 2015 un crecimiento del ocho por ciento del sector, el doble que en 2013, impulsado por grandes proyectos de infraestructura federal y de vivienda en el país.

La producción de concreto en México se ubica actualmente en 32 millones de metros cúbicos anuales, pero el potencial con la capacidad instalada podría llegar hasta los 50 millones de metros cúbicos al año.

En razón de lo anterior, este estudio se refiere al uso intensivo de los recursos minerales no renovables y los combustibles fósiles en la extracción de los agregados inertes (arena y grava triturada), la utilización de agua, la fabricación de cemento para la producción del concreto y, en particular, como objetivo evaluar la cantidad de entradas de recursos ambientales en el proceso de producción. Se evaluó el proceso de producción de concreto como caso de estudio, teniendo en cuenta los procesos estándares para la producción de Cemento Portland Compuesto 30R. En comparación con los datos obtenidos y el cálculo de los valores calculados anteriormente (Björklund et al., 2001; Buranakarn, 1998; Brown y Buranakarn, 2003; Brown y McClanahan, 1992; Pulselli et al., 2008) se pone de manifiesto que el carácter del análisis eMergético es particularmente sensible a los límites de contexto y sistemas. Debido al agudo impacto ambiental, en cuanto a la explotación de los recursos del medio ambiente, debido a la utilización de concreto en el desarrollo de infraestructura física, se implementó un método de contabilidad ambiental en la producción de concreto con el fin de proporcionar una evaluación más profunda de comparación sobre la sustentabilidad de las alternativas planteadas.

2. METODOLOGIA

El procedimiento de análisis eMergético está diseñado para evaluar los flujos de energía y materiales de los sistemas en unidades comunes (emjoules solares, abreviado como seJ) que permitan al analista comparar aspectos ambientales y financieros de los sistemas. Sobre la base de esta unidad, eMergía se define como la cantidad de energía solar utilizada, directamente o indirectamente para producir un producto o servicio (Odum, 1971, 1983, 1988, 1996) (Brown et al., 2004). En otras palabras, eMergía es la "memoria energética", que se ha utilizado a lo largo de una secuencia de diferentes procesos para obtener un producto o servicio.

Este procedimiento permite la comparación e incorporación de los beneficios y costos ambientales con variables tradicionales de beneficio-costos financiero para proveer una perspectiva más amplia en la toma de decisiones. La metodología general para el análisis eMergético es un acercamiento de sistemas de "arriba hacia abajo". El primer paso es construir diagramas de los sistemas para organizar la manera de pensar y conocer las relaciones entre los componentes y los flujos de recursos. El segundo paso consiste en la construcción de las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas descritos anteriormente. Como tercer paso, se calculan los diferentes índices de eMergía que relacionan los flujos de eMergía de la economía con aquellos del medio ambiente, y finalmente, la interpretación de los índices que permiten diagnosticar la viabilidad económica y capacidad de carga de los sistemas en estudio.

Los índices eMergéticos desarrollados por Odum (1971) definen la sustentabilidad respecto a la cantidad y calidad de energía transformada por un sistema de producción particular. Su análisis utiliza el diagrama de tres brazos que facilita el cálculo de los índices como se presenta en la Figura 1.

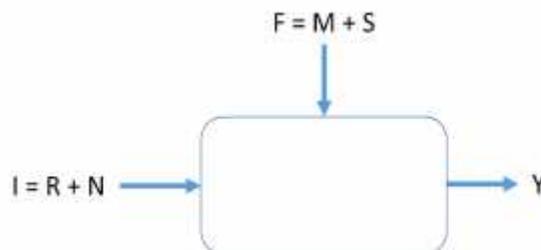


Figura 1. Diagrama de tres brazos
Fuente: A partir de Odum, 1971

Donde:

I: Recursos Naturales Renovables (R) sumando los Recursos Naturales No Renovables (N)

F: Materiales (M) más servicios (S)

Y: Salidas del sistema

Teniendo en cuenta una región, el uso de los recursos no renovables por la industria de la construcción se puede evaluar a través de la eMergía. Subrayando la preocupación ambiental de los materiales de construcción, en particular del concreto.

Este procedimiento siguió un acercamiento de "arriba hacia abajo" comenzando con un análisis de eMergía del país (México), luego del estado de Chiapas y el municipio de Tuxtla Gutiérrez, y finalmente a nivel alternativas.

La información fue presentada en tablas de análisis eMergéticos por alternativas y en su conjunto.

Los objetivos planteados para el estudio fueron:

- 1) Proveer una metodología que evalúe beneficios y costos en la producción de concreto hidráulico.
- 2) Comparar diferentes métodos de producción de concreto, usando indicadores eMergéticos tales como EIR, el EYR, el ELR, el ESI y Transformidades.

De acuerdo a la recopilación de información en la zona de estudio y del estado de conocimiento actual, se identificaron las técnicas empleadas para la elaboración de concreto hidráulico, además la industria de la construcción local refirió al concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ como el más utilizado en el medio.

Para el estudio de las alternativas relacionadas a la producción de concreto, se eligieron tres técnicas: 1) industrializada, 2) semi-industrializado y 3) con medios manuales, y se evaluaron mediante el análisis eMergético. La comparación se hizo por medio de los índices eMergéticos obtenidos en un estudio de caso en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, para determinar la viabilidad de estas alternativas con respecto al componente ambiental. La unidad de evaluación fue el metro cúbico.

Las consideraciones para cada técnica fueron las siguientes:

- 1) Técnica industrializada. Esta técnica se puede distinguir de los dos siguientes por el uso de las máquinas a gran escala, como son la planta de concreto, camión revolvedor y cargador frontal, con ocho trabajadores para realizar el proceso de producción.

- 2) Técnica semi-industrializada. La técnica se caracteriza porque vincula el empleo de la mano de obra con una máquina simple (revolvedora de trompo), utiliza un grupo de diez trabajadores. Con ayuda de la revolvedora operada con gasolina, este método es empleado para la generación de volúmenes moderados (no más de 45 m³ por cuadrilla).
- 3) Técnica con medios manuales. Esta técnica utiliza una cuadrilla de quince trabajadores que tienen habilidades moderadas en el trabajo, con dos técnicos, uno de ellos como controlador de especificaciones y el otro usa su experiencia para dirigir la cuadrilla. Con ayuda de herramientas simples para su fabricación sin necesidad de combustibles, energía eléctrica o energía mecánica, ordinariamente empleado para la generación de volúmenes pequeños (no más de 10 m³ por cuadrilla).

Para este estudio, las Transformidades de los agregados inertes, cemento y agua fueron calculadas para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Se realizó una evaluación de un proceso específico teniendo en cuenta la producción de 70,000 m³ anuales para el concreto industrializado, para el semi-industrializado y con medios manuales, se consideró la producción por día de 45 m³ y 10 m³ respectivamente. La planta cementera para obtener la transformidad del cemento presentó una producción anual de 2, 190,000 toneladas. La transformidad empleada para la arena corresponde a la extracción de arena del río Santo Domingo ubicado en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas a una distancia de 30 kilómetros de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La grava triturada explotada y extraída de la cantera ubicada en la colonia Plan Chiapas en el municipio de Chiapa de Corzo, en los límites con el municipio de Tuxtla Gutiérrez.

A través de una clasificación de los flujos de energía en el proceso investigado en función de su origen, desde dentro o fuera del sistema, algunos indicadores basados en la energía se evaluaron. Esta clasificación dependió de la elección de los límites del sistema. En particular, los índices de eMergía empleados en este estudio fueron: el EIR, se calculó como la relación entre la contribución de la economía (F) y la naturaleza (I), es adimensional. Es presentado como un indicador para comprender la intensidad de eMergía importada utilizada en el sistema. Es una medida del impacto potencial o "carga" de una actividad de desarrollo en particular que ejerce sobre el medio ambiente y es considerado como el índice de la eMergía adquirida externa al sistema y la residente. Este factor puede ser usado como un indicador del nivel adecuado de desarrollo de la alternativa estudiada.

Casi todos los procesos humanos productivos incluyen la interacción de recursos no renovables y recursos renovables del ambiente, el EYR, se consideró como la relación entre la eMergía total que entra al sistema (Y) y la contribución de la economía (F). Este índice es adimensional y permite conocer, de manera general, el beneficio neto que el sistema ofrece a la economía global, el ELR, se calculó como la relación entre la suma de los recursos no renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R), también es adimensional. Cuando el valor del índice es alto, mayor será el impacto ambiental del sistema. También indica que los costos de producción son más altos, y por lo que su precio final se incrementará, haciendo que el producto sea menos competitivo en el mercado con una relación de carga ambiental más bajo, y el ESI indica la contribución del medio natural, es decir el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Entre más alto es el valor significa que se es más sustentable, valores cercanos a 0 indican la insostenibilidad del sistema, se calculó dividiendo la contribución de la naturaleza (EYR) sobre la carga ambiental (ELR).

Finalmente, los valores calculados de eMergía del concreto en este estudio se compararon con evaluaciones anteriores de eMergía con el fin de poner de manifiesto cómo el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Este estudio permitió realizar comparaciones entre las técnicas de producción de concreto planteados, usando indicadores eMergéticos tales como el EIR, el EYR, el ELR y el ESI. Los atributos eMergéticos de los sistemas fueron cuantificados y usados como indicadores de las características de cada alternativa. Para la evaluación de las alternativas, se consideró concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, las proporciones se obtuvieron en el Laboratorio de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas para los casos de las técnicas con medios manuales y semi-industrializado. Las correspondientes al concreto industrializado fueron proporcionadas por una planta de concretos de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

En el diagrama de los flujos de energía que interactúan en el sistema de producción de concreto (Figura 2) se muestran los recursos renovables y no renovables, la energía adquirida en importaciones (materiales, servicios, mano de obra). A partir del diagrama de flujos de energía se realizó el análisis de la eMergía de la producción de concreto de cada alternativa y se presentan en las Tablas 1, 2 y 3. Para cada caso, la eMergía de la producción de concreto se debió a los siguientes insumos: materias primas, transporte, equipo y maquinaria, combustibles, mano de obra, mantenimiento y seguros.

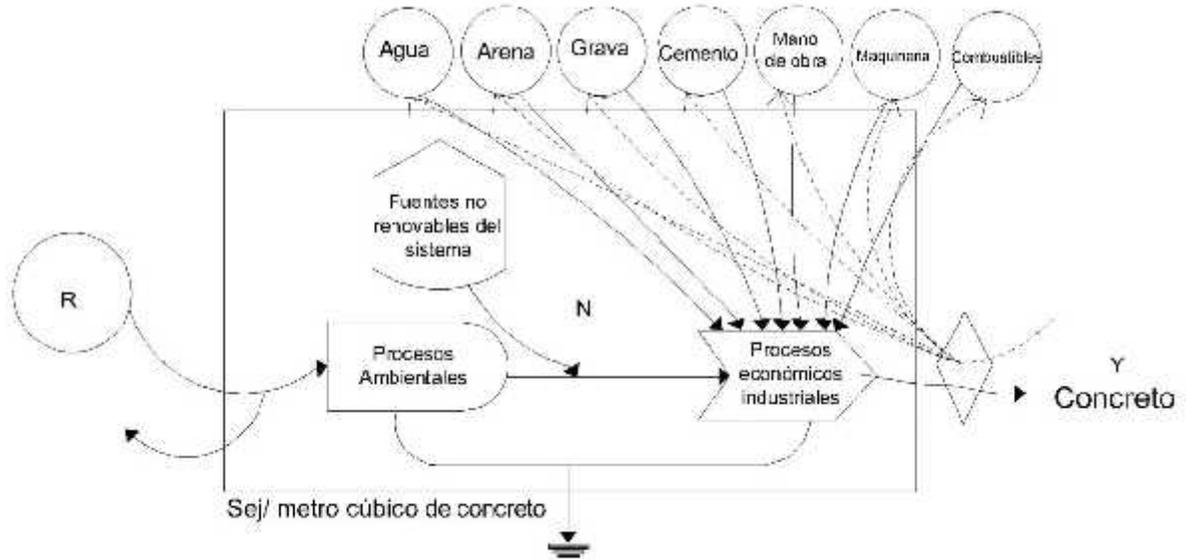


Tabla 1. Análisis eMergético de la producción de concreto industrializado.

No.	Descripción	Unidades (unid/m ³)	Trans- formidad (seJ/unid)	eMergía (seJ/m ³)	Referencias
-----	-------------	------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	-------------

MATERIALES

1	Cemento	4.00E+05	g	3.61E+09	1.44E+15	*
2	Arena de río	1.07E+06	g	3.29E+09	3.53E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	1.42E+06	g	2.24E+09	3.19E+15	*
4	Agua	2.51E+05	g	3.27E+06	8.19E+11	*
5	Diesel	1.08E+08	J	6.60E+04	7.13E+12	Doherty et al, 1994
6	Lubricantes	3.21E+05	J	6.60E+04	2.12E+10	Doherty et al, 1994
7	Energía eléctrica	2.76E+08	J	2.77E+05	7.63E+13	Odum, 1996

PLANTA Y MAQUINARIA

8	Dosificadora de concreto	1.86E+02	g	6.70E+09	1.25E+12	Doherty et al, 1994
9	Silo de cemento	8.06E+01	g	6.70E+09	5.40E+11	Doherty et al, 1994
10	Tolva de agregados	5.58E+01	g	6.70E+09	3.74E+11	Doherty et al, 1994
11	Transportador de banda	3.10E+01	g	6.70E+09	2.08E+11	Doherty et al, 1994
12	Báscula de cemento	2.23E+01	g	6.70E+09	1.50E+11	Doherty et al, 1994
13	Báscula de agregados	3.47E+01	g	6.70E+09	2.33E+11	Doherty et al, 1994
14	Dosificador de agua	2.48E+01	g	6.70E+09	1.66E+11	Doherty et al, 1994
15	Cargador frontal	4.30E+02	g	6.70E+09	2.88E+12	Doherty et al, 1994
16	Camión revolvedora	1.14E+02	g	6.70E+09	7.64E+11	Doherty et al, 1994
17	Camión volteo	5.95E+01	g	6.70E+09	3.99E+11	Doherty et al, 1994

SERVICIOS

18	Mano de obra	4.19E+06	J	4.77E+06	2.00E+13	Guillén, 1998
19	Mantenimiento y seguros	9.46E-01	\$	4.59E+13	4.34E+13	*

*Transformidad calculada para este estudio.

Y = 8.32E+15

Tabla 2. Análisis eMergético de la producción de concreto semi-industrializado.

No.	Descripción	Unidades (unid/m ³)	Trans- formidad (seJ/unid)	eMergía (seJ/m ³)	Referencias	
MATERIALES						
1	Cemento	4.02E+05	g	3.61E+09	1.45E+15	*
2	Arena	7.25E+05	g	3.29E+09	2.38E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	9.04E+05	g	2.24E+09	2.02E+15	*
4	Agua	2.33E+05	g	3.27E+06	7.60E+11	*
5	Gasolina	1.92E+07	J	6.60E+04	1.27E+12	Doherty et al, 1994
6	Lubricantes	3.33E+04	J	6.60E+04	2.20E+09	Doherty et al, 1994
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
7	Cabo de pala de madera	3.82E+03	g	6.79E+08	2.59E+12	Odum, 1996
8	Cuchara de pala y mango	8.77E-01	g	3.16E+09	2.77E+09	Bargigli et al, 2003
9	Botes de plástico capacidad 19 litros	1.73E+00	g	8.57E+04	1.48E+05	Brown et al, 2003
10	Revolvedora capacidad 2 sacos	7.42E+00	g	6.70E+09	4.97E+10	Doherty et al, 1994
SERVICIOS						
11	Mano de obra	9.30E+05	J	4.77E+06	4.44E+12	Guillén, 1998
12	Mantenimiento y seguros	6.36E-05	\$	4.59E+13	2.92E+09	*

*Transformidad calculada para este estudio.

Y = 5.87E+15

Tabla 3. Análisis eMergético de la producción de concreto con medios manuales.

No.	Descripción	Unidades (unid/m ³)		Trans- formidad seJ/unid)	eMergía (seJ/m ³)	Referencias
MATERIALES						
1	Cemento	4.02E+05	g	3.61E+09	1.45E+15	*
2	Arena	7.25E+05	g	3.29E+09	2.38E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	9.04E+05	g	2.24E+09	2.02E+15	*
4	Agua	2.33E+05	g	3.27E+06	7.60E+11	*
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
5	Cabo de pala de madera	1.29E+05	g	6.79E+08	8.76E+13	Odum, 1996
6	Cuchara y mango metálico de pala	2.96E+01	g	3.16E+09	9.35E+10	Bargigli et al, 2003
7	Botes de plástico capacidad 19 litros	1.17E+01	g	8.57E+04	1.00E+06	Brown et al, 2003
SERVICIOS						
8	Mano de obra	6.28E+06	J	4.77E+06	3.00E+13	Guillén, 1998
				Y =	5.98E+15	

*Transformidad calculada para este estudio.

La eMergía total consumida en cada técnica de producción fue de 5.98E15 seJ, 5.87E15 seJ y 8.32E15 seJ, con medios manuales, semi-industrializado e industrializado, respectivamente. Para la producción de concreto industrializado el 98.14% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Maquinaria (0.084%), combustible (1.00%) y la mano de obra (0.24%).

El concreto semi-industrializado el 99.44% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Equipo y herramienta (0.045%), combustibles (0.022%) y la mano de obra (0.076%). Finalmente, el concreto elaborado con medios manuales el 98.02% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Equipo y herramienta (1.47%), y la mano de obra (0.50%).

El EIR es la razón entre los recursos de la economía y de la naturaleza e indica la inversión que realizan la sociedad involucrada en la cadena productiva para producir un bien, en relación a la contribución de la naturaleza. Puede ser utilizado para evaluar la eficiencia, o competitividad de un sistema productivo en la utilización de los recursos invertidos de la economía. Comparándose dos o más sistemas productivos, aquel con menor EIR será el más competitivo, una vez que para cada unidad de recursos naturales utilizado (sin costo financiero) necesita invertir un volumen menor de recursos de la economía. El alto valor de EIR en la producción del concreto industrializado comparado con el semi-industrializado y el fabricado con medios manuales, 10,161, 7,724 y 7,867, respectivamente. Este valor sugirió una débil capacidad competitiva debido a una alta sensibilidad a las inestabilidades de fuentes externas. En la Figura 3 puede apreciarse la comparación en el EIR en la producción de concreto.



Figura 3. Inversión eMergética en la producción de concreto

Para el caso del EYR en donde se expresa la contribución de la naturaleza al sistema productivo, es decir se cuantifica el trabajo del ecosistema para la obtención de procesos. Las alternativas analizadas presentaron un valor de 1.00, ello indica que la eMergía liberada por los sistemas es igual a aquella invertida con recursos de la economía, en otras palabras, implica que son altamente dependientes de los insumos y servicios importados. Un valor EYR mucho mayor a 1 indica que el sistemas analizado genera más nuevos recursos (de emergía) que los que estaban disponibles como entradas, de lo contrario, el sistema es un consumidor transformador de recursos (Ascione et al., 2009). En la Figura 4 se ilustra gráficamente la producción de eMergía en la fabricación de concreto.



Figura 4. Producción de eMergía en la fabricación de concreto

El análisis señala que el concreto industrializado presentó un mayor ELR con un valor de 10,161 comparado con los datos obtenidos para el semi-industrializado y con medios manuales 7,724 y 7,867, respectivamente. Estos valores son relevantes para demostrar en qué medida la producción de concreto atenta contra el medio ambiente. Es importante señalar que el concreto elaborado con medios manuales presenta mayor carga ambiental que el semi-industrializado, esto es debido a la baja productividad 10 m³ en un jornal de 8 horas de trabajo contra 45 m³ para el semi-industrializado. Es decir, esto refleja la energía incorporada al sistema por la mano de obra empleada en ambas técnicas. La comparación de Carga Ambiental ejercida por las alternativas planteadas es presentada en la Figura 5.



Figura 5. Carga ambiental ejercida sobre el ecosistema en la fabricación de concreto

En el ESI se indica la contribución del medio natural, es decir el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Según Brown y Ulgiati (2004), valores de ESI inferiores a 1 indican sistemas que consumen recursos y están asociados a economías altamente desarrolladas y orientadas para el consumo.

Los valores reportados en este estudio indican que el concreto semi-industrializado (0.000129) es mayor que el fabricado con medio manuales (0.000127) y el industrializado (0.0000984) siendo el sistema de semi-industrializado el que afecta en menor grado el equilibrio del medio ambiente, por lo tanto, es más sustentable ambientalmente que el concreto industrializado y el elaborado con medios manuales. En la Figura 6 puede observarse la comparación gráfica de los resultados obtenidos para cada alternativa referente al ESI.



Figura 6. Sustentabilidad en la producción de concreto

Con relación a otros estudios realizados que corresponden a la producción de concreto industrializado, se encontraron las siguientes diferencias significativas que a continuación se describen:

En Björklund et al (2001); los autores utilizaron valores de transformidad solar para un contexto nacional. Por ejemplo, la transformidad de la electricidad es muy específica, ya que se evaluó de acuerdo con los procesos de producción en Suecia, que incluye nuclear (33% -aquí representó con la transformidad de la producción eléctrica media mundial) y la energía hidroeléctrica (66%). En este estudio, la evaluación eMergética de la producción de cemento no toma en cuenta todo el proceso de producción y esto representa una aproximación relevante. De los insumos principales, solo considera el uso de piedra caliza, la electricidad y el petróleo se tuvieron en cuenta, mientras que las entradas para el transporte, embalaje, servicios, tales como mano de obra, la maquinaria y el combustible no se evaluaron. La electricidad y la mano de obra se evaluaron a través de una relación de eMergía/dinero.

En Buranakarn (1998); la eMergía específica se evaluó en los EE.UU. En su análisis presentó una evaluación de carreteras, vehículos e infraestructuras usados, teniendo en cuenta todo el sistema nacional de transporte. El autor calculó la longitud total de las carreteras nacionales y su proceso de producción (materiales, energía, mano de obra, y otros servicios), teniendo en cuenta el costo anual de su construcción. Este valor (en seJ / km) se dividió por el porcentaje de camiones con relación al peso total de vehículos (automóviles, autobuses, camiones, otros). Lo mismo para los ferrocarriles y servicios por mar (barcos). En general, no se considera la vida útil de las carreteras, infraestructuras y vehículos. La mano de obra y otros servicios fueron evaluados a través de una relación de eMergía/dinero.

En el caso de Brown y Buranakarn (2003); la evaluación se basa principalmente en Buranakarn de 1998, además tomó en cuenta de las etapas del uso de materiales, demolición y reutilización. Por lo tanto, este análisis tuvo que ver con otras aportaciones al proceso que necesita procedimientos específicos. El presente trabajo, por el contrario, tiene la finalidad de determinar la transformidad del concreto, desde el origen hasta su proceso de producción, que se utilizará en la construcción de edificios y sin explorar la totalidad de su ciclo de vida hasta su destino de desecho.

Adicionalmente, Brown y McClanahan (1992); evaluaron la eMergía específica en Tailandia, con referencia a las fuentes de energía disponibles a nivel local. Este análisis se llevó a cabo en 1992, utilizando datos de 1983. El análisis de eMergía fue muy simplificado con respecto al presente estudio, ya que los autores consideran algunos problemas como el flujo de materiales, el petróleo y la electricidad como el flujo de energía y otros bienes y servicios, este último evaluado en términos del flujo de dinero (a través de una relación de eMergía / dinero).

Por otro lado, Pulselli et al. (2008); se centra en los procesos de producción de la industria italiana de cemento y concreto. La mayoría de los valores de las transformidades se evaluaron en los EE.UU. Los autores realizaron una evaluación de un proceso específico teniendo en cuenta la producción de una determinada cantidad de concreto de 23 toneladas, y su transporte al lugar de la obra. En la elección del sistema consideran algunos factores insignificantes, tales como la evaluación de la totalidad de las infraestructuras nacionales de transporte (carreteras y otros servicios).

En la Figura 7, se ilustran las Transformidades del concreto, que han realizado los autores antes citados y son comparados con los resultados obtenidos en este trabajo.

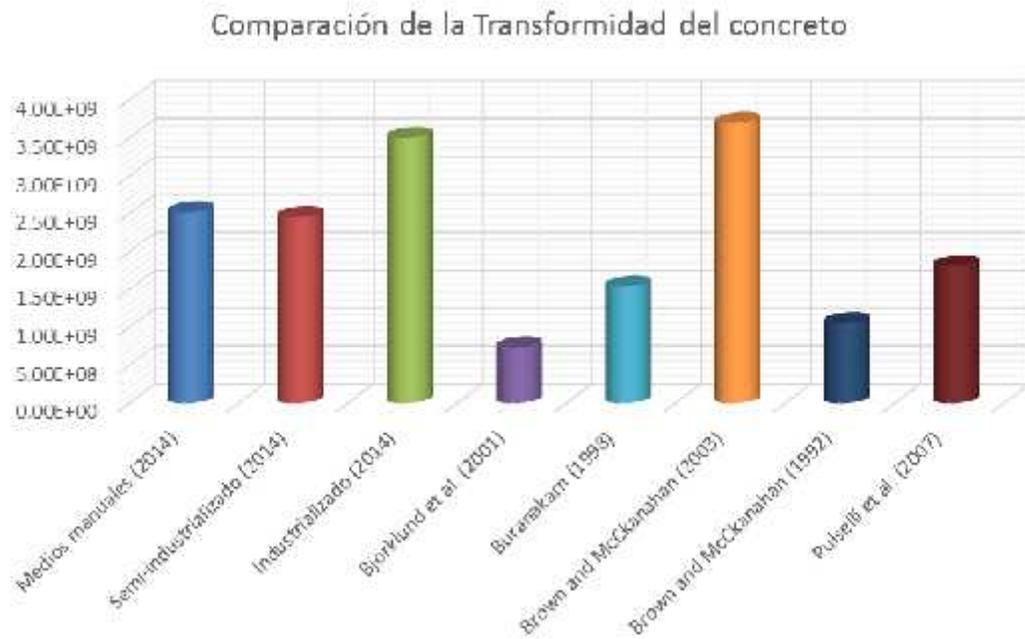


Figura 7. Comparación de las transformidades del concreto

CONCLUSIONES

El método eMergético permitió tener una visión con una fuerte componente ecológica de las relaciones entre los sistemas naturales y las actividades antrópicas, y nos ayuda a buscar estrategias que nos acerquen a la sustentabilidad.

El análisis eMergético de la producción de concreto, toma en cuenta varios pasos en el proceso. Desde los procedimientos para la producción de materiales hasta la elaboración del concreto mismo, los resultados ponen de manifiesto el impacto de la utilización de materiales de cantera. Estos son vistos como recursos minerales con alta eMergía específica proporcionada por ciclos sedimentarios naturales, cuantificados en seJ. En el presente estudio, los materiales (arena, grava triturada, cemento) para el método industrializado representan el 98.14%, el método semi-industrializado el 99.44% y el método con medios manuales el 98.01% de la eMergía total. Por lo tanto, la eMergía pone de relieve el papel fundamental del uso excesivo de los recursos no renovables en el sector de la construcción, ya que representa la obra de la naturaleza (ciclo sedimentario), y no sólo el trabajo humano para la explotación de canteras. La contribución dominante de los recursos minerales subraya la insustentabilidad de la industria de la construcción. Los materiales no renovables y no reciclables, tales como el concreto están experimentando el agotamiento.

De acuerdo con Burón Maestro (2012), la sustentabilidad no es una característica que representa un valor absoluto. Es un concepto que sirve para comparar y elegir del modo más conveniente para que el desarrollo de la sociedad, en un tiempo determinado, no comprometa el desarrollo futuro de la misma en otro momento posterior a aquél en el que se toma la decisión que toda elección conlleva. No hay soluciones sustentables, existen soluciones más sustentables que otras. El EIR se evaluó como un indicador de sustentabilidad para evaluar la dependencia de fuentes locales o externas. Las materias primas tienen un papel relevante en la evaluación de eMergía de la producción concreto y que son proporcionados por la naturaleza de forma gratuita. Sin embargo, además de las materias primas y su ubicación dentro o fuera del sistema, se necesita una proporción importante de recursos externos, especialmente los combustibles y maquinaria, para producir concreto. De este modo, los procesos de producción de concreto dependen en gran medida de los insumos adquiridos (flujo de eMergía de importaciones).

El ESI se empleó como medida de la contribución del sistema jerárquicamente superior a la producción del sistema por unidad de carga del mismo. Los resultados señalan que la producción de concreto semi-industrializado es más sustentable comparado con los concretos fabricados con medios manuales y los industrializados.

Por lo anterior, se puede decir que la transformidad se presenta como una medida de la utilización de los recursos del medio ambiente debido a los materiales de construcción; es un parámetro intensivo que proporciona una clasificación de los materiales de construcción sobre la base de una jerarquía de energía. En general, el análisis de eMergía combina calidad (Transformidad) con la cantidad (energía o masa). Por ejemplo, el análisis de eMergía del proceso de construcción dependerá de la elección de los materiales de construcción (calidad en términos de costo ambiental debido al uso de la energía y la materia) y el propio proyecto de construcción (cantidad de materiales necesarios para construir elementos estructurales).

REFERENCIAS

- Ascione, M., Campanella, L., Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2009). Environmental driving forces of urban growth and development. An emergy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landscape and Urban Planning*, 93(3–4), 238–249.
- Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2003). Emergy and Life-Cycle assesment of steel production in Europe. Gainesville, Florida, E.U.: University of Florida.
- Bastianoni, S., Galli, A., Pulselli, R. M., & Niccolucci, V. (2007). Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: practical case study in the Italian context. *Ambio*.
- Björklund, J., Geber, U., & Rydberg, T. (2001). Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 293 - 316.
- Brown, M. T., & Buranakarn, V. (2003). Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 1 - 22.
- Brown, M. T., Odum, H. T., & Jorgensen, S. E. (2004). Energy hierarchy and transformity in the universe. *Ecological Modelling*, 17 - 28.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (2004). Emergy Analysys and Environmental Accounting. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 329 - 354.
- Brown, M. T., & McClanahan, T. R. (1992). *Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Final Report to the Cousteau Society*. Gainesville, FL.: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida.
- Buranakarn, V. (1998). *Evaluation of recycle and reuse of building materials using the emergy analysis method*. Ph.D. Dissertation. University of Florida, FL.
- Burón Maestro, M. (2012). El hormigón y la sostenibilidad en la normativa. *Sostenibilidad: Eficiencia Energética, Evaluación de edificios y estructuras*. Madrid, España: IECA.
- Doherty, S. J., Scatena, F. N., & Odum, H. T. (1994). *Emergy Evaluation of the Luquillo Experimental Forest and Puerto Rico. Final Report to International Institute of Tropical Forestry*. Rio Piedras, Puerto Rico.
- Guillén, H. A. (1998). Sustainability of Ecotourism and Traditional Agricultural Practices in Chiapas, México. Gainesville, Florida, E.U.: Tesis Doctoral.
- Gutierrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia.: Centro de publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- INEGI. (2015). *Encuesta mensual de la industria manufacturera. Estadísticas históricas de México 2014-2015*.
- Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assesment of available cement inventories in the EU. *Cement Concrete Research*, 781 - 788.
- Josa, A., Aguado, A., Heino, A., Byars, E., & Cardim, A. (2004). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement Concrete Research*, 1313 - 1320.
- Kjellsen, K., Guimaraes, M., & Nilsson, A. (2005). *The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective*. Danish Technological-DTI.
- Mendoza Sánchez, J. F. (2014). *Criterios de sustentabilidad para carreteras en México*. Sanfandila: Publicación Técnica No. 392, Instituto Mexicano del Transporte.
- Nazar, M. (2013). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a la construcción de viviendas multifamiliares de interés social*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Tesis Doctoral.

- Nisbet , M., & Van Geem, M. G. (1997). Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete. *World Cement*, 3.
- Odum, H. T. (1971). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1983). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1988). Self organization, transformity and information. *Science*, 1132 - 1139.
- Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting Energy and Environmental Decision Making*. New York, NJ.: John Wiley and Sons, Inc.
- Pade , C., & Guimaraes, M. (2007). The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement Concrete Research*, 1348-1356.
- Pulselli , R. M., Simoncini , E., F.M. Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2007). Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Emergy and Buildings*, 620-628.
- Pulselli , R. M., Simoncini, E., Ridolfi, R., & Bastianoni, S. (2008). Specific emergy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 647 - 656.
- Vold, M., & Ronning, A. (1995). LCA of Cement and Concrete. *Stiftelsen*.

Comportamiento electroquímico de morteros con cementos activados base Mk-CBCA en una solución simulada de agua de mar

H. E. Hernández Martínez¹⁻², E. E. Maldonado-Bandala¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

RESUMEN

En este estudio se analiza el comportamiento mecánico y electroquímico de pastas con cementos activados alcalímente a base de metacaolín (Mk) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), expuestas en una solución del 3.5% de NaCl por 180 días. La técnica electroquímica empleada fue Resistencia a la polarización Lineal y la técnica termodinámica de potenciales de corrosión. Se encontró que las pastas fabricadas con cementos alcalinos superaron casi por el doble en la resistencia mecánica de compresión simple a la pasta control de 100% cemento Portland, sin embargo, en lo que se refiere a la caracterización electroquímica, no se observa mucho cambio entre todas las pastas analizadas incluyendo la pasta control, pues hasta los 180 días de exposición, todas se encuentran en velocidades de corrosión despreciables.

Palabras clave: cementos activados, pastas, corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

Considerando las innovaciones en el campo de los materiales, así como la protección y conservación del medio ambiente, es necesario desarrollar investigaciones en materiales que de acuerdo a su composición química, puedan aportar mejores desempeños de resistencia y durabilidad (Maldonado-Bandala et al 2011). Fabricar materiales para construcción a partir de cenizas es una idea que se remonta a la antigüedad. Hace 4000 años a.c. los chinos y 2,500 a.c. los hindúes; con cenizas de la cáscara de arroz y arcilla calcinada, fabricaban cementos hidráulicos mezclando estos residuos con cal, en tanto los romanos y los griegos utilizaban para este mismo fin las cenizas volcánicas (Vaca castaño 2007)

En este estudio se analiza la posibilidad de utilizar Caolín extraído del municipio de Huayacocotla, Veracruz, México, procesado a Metacaolín (Mk), combinándolo con un subproducto agroindustrial, la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA). EL Caolín recibe su nombre por la composición de arcillas blancas que lo caracterizan, cuyos compuestos están formados en su mayoría por caolinita que son arcillas con un alto contenido de alúmina y sílice. Entre las ventajas que distinguen el uso del caolín se distinguen las siguientes: Mejora la trabajabilidad, incrementa los esfuerzos a compresión, incrementa la tracción y los esfuerzos a flexión, incrementa la durabilidad, reduce la permeabilidad, incrementa la resistencia a los ataques químicos, reduce la reacción álcali sílice, reduce la contracción debido al empaquetamiento de las partículas y reduce potencialmente la eflorescencia (Rafat Siddique y Mohammad Iqbal Khan. 2011)

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

De un diseño de experimentos se planearon 32 mezclas de pastas activadas, de estas se pudieron elaborar y ensayar 26 mezclas, y de estas 26 se eligieron las mejores cuatro bajo el criterio de la mayor resistencia es la mejor, a las cuales se les agregó arena sílica que cumpliera las especificaciones de acuerdo a la norma NMC-061 del ONNCCE para elaborar morteros.

Para el cálculo de estas cuatro mezclas de morteros de cemento activados; los factores que intervinieron en el diseño de mezclas fueron el porcentaje de Mk : CBCA, %NaOH, Ms, Área Superficial y Tratamiento térmico [4]. Se evaluó la resistencia a la compresión simple a edades de 3, 7, 14, 28, 90, 120 y 180 días. Se realizó la caracterización electroquímica empleando las técnicas de Potencial de Corrosión Ecorr y Resistencia a la Polarización Lineal (Rp), durante 180 días, periodo en el que los especímenes estuvieron expuestos en 3.5% de NaCl. Las proporciones y características de las cuatro mezclas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1; Proporciones de las mezclas para elaborar los morteros

Mezcla	Mk:CBCA (%)	NaOH (%)	Ms	Área Sup (m ² /kg)	Tratamiento (°C)
7	50:50	14	1	600	80
11	75:25	14	1.5	300	40
12	75:25	16	1	400	20
28	75:25	16	0.5	400	80

La ceniza que se estudió en esta investigación, fue obtenida de los ceniceros de la caldera bagacera número dos del ingenio azucarero de Mahuixtlán, Ver., esta caldera es de la marca Babcock Wilcox que está diseñada para alimentarla con combustóleo y/o bagazo; actualmente solo opera mediante bagazo. Para el uso de la CBCA esta se llevó a un procedimiento de molienda por medio de un molino de bolas, y se hizo una curva de molienda, donde se determinó los tiempos necesarios para alcanzar las áreas superficiales de 300, 400 y 600 m²/kg.

El caolín se obtuvo de la región de Huayacocotla, Veracruz, México. Para transformarlo a Metacaolín (Mk), se llevó a un procedimiento de calcinación a una temperatura de 750 °C por un tiempo ininterrumpido de 6 horas en una mufla marca Paragon Industries, L.P. USA.

El Mk y la CBCA que fueron utilizados para activación cumplen con los requisitos mínimos de Silicio (SiO₂), Aluminio (Al₂O₃) y Hierro (Fe₂O₃) (NMX-C-146-ONNCCE-2000).

En la Tabla 2, se muestra la caracterización química del Metacaolín y de la CBCA realizada mediante un análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Tabla 2; Composición química de Metacaolín y ceniza de bagazo de caña de azúcar

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	PPI (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	BaO (%)	CaO (%)	MgO (%)
Mk	73.24	22.67	0.154	1.14	1.8	0.064	0.463	0.0	0.040	0.00
CBCA	66.91	6.5	3.88	0.059	0.00	0.106	10.18	0.0	4.328	2.38

Los tratamientos térmicos de curado necesarios para el desarrollo de esta investigación, se efectuaron en una cámara isotérmica por un periodo de 20 horas.

Para el ensaye de compresión simple se elaboraron cubos de una pulgada de lado y se les aplicó carga a una velocidad de 300 N/s. Para ello se utilizó una MÁQUINA UNIVERSAL SHIMADZU Tipo AUTOGRAPH Serie AG-IS MS.

Para evaluar el comportamiento electroquímico se desarrollaron probetas prismáticas de 2.5 x 6.0 x 9.0 cm. (Figura 1). Y se realizó una configuración normal de tres electrodos, donde el electrodo de trabajo (ET) fue una varilla de acero AISI 1018, electrodo de referencia (ER) de Cu/CuSO₄ y como electrodo auxiliar (EA) se utilizó una placa de acero inoxidable cuya área nominal fue la misma que el área expuesta del ET, Figura 2.

Las Probetas se expusieron en una solución de NaCl al 3.5% durante 180 días. Se monitorearon con mediciones cada 15 días, utilizando un Potenciostato/Galvanostato/ZRA ACM Gill; empleando la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal (Rp) con un barrido de ± 20 mV y na velocidad de barrido de 10 mv/min. La velocidad de corrosión se calculó empleando la ecuación de Stern y Geary.



Figura 1: Probetas prismáticas para ensayos electroquímicos



Figura 2: Celda de corrosión

3. RESULTADOS

El análisis de resultados de resistencia a la compresión de la combinación de Mk con CBCA activados alcalinamente a edades de 3 hasta 180 días, se muestran en la Figura 3; en ella se puede observar que las mezclas 7, 12 y 28 a edades de 3, 7 y 14 días obtuvieron incrementos de 13.76 MPa, 20.86 MPa y 22.13 MPa, con porcentajes de incrementos desde un 79% hasta un 140.06% sobre las resistencias de un mortero elaborado con cemento portland convencional; no así para la mezcla No. 11, la cual mostró un decremento en promedio de 3.38 MPa con un 17.95% de por debajo del mortero de cemento portland mencionado como referencia y para estas mismas tres edades de ensaye (3,7 y 14 días).

Sin embargo para las edades de 28, 90, 120 y 180 días, las resistencias para las cuatro mezclas reportadas en esta investigación: 7, 11, 12 y 28, mostraron un incremento de 13.22 MPa, 23.34 MPa, 26.57 PMA y 20.11 MPa con porcentajes de incrementos del 61.6%, 108.78%, 119.4% y 98.95%, todos estos incrementos y porcentajes como se puede observar en la Figura 3, se encuentran muy por encima del mortero elaborado con cemento portland.

El análisis de los valores de potenciales de corrosión (Ecorr) aplicado a las probetas prismáticas se muestra en la Figura 4 en ella se observan dos líneas horizontales que representan los límites horizontales de criterios de probabilidad de corrosión (ASTM C876-99)

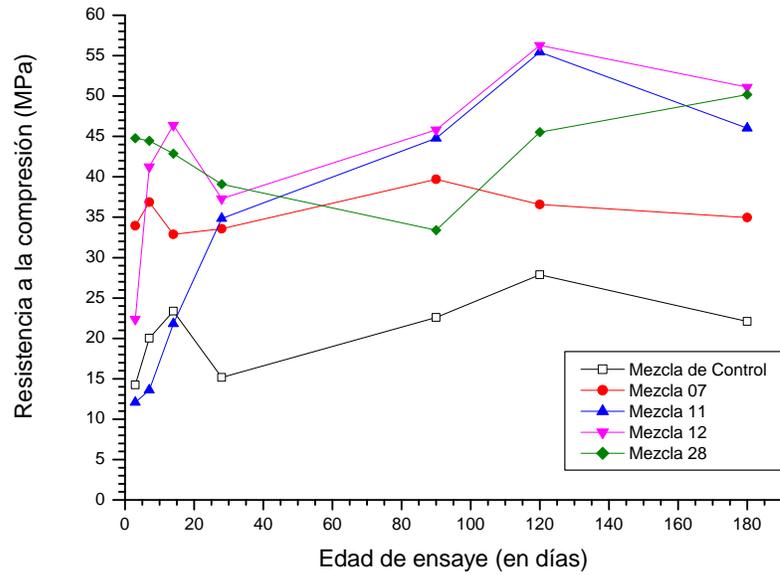


Figura 3. Comportamiento de la resistencia a compresión de mezclas de morteros.

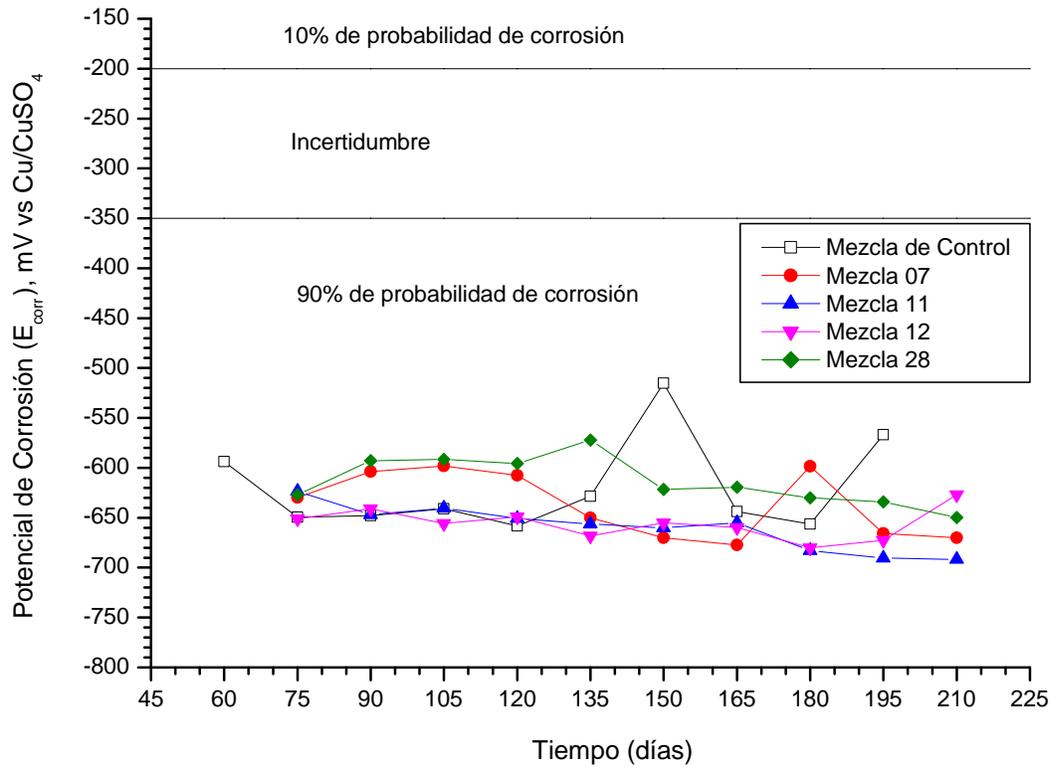


Figura 4. Variaciones de la Probabilidad de corrosión del acero embebido, VS el tiempo de exposición.

Se puede observar para las cuatro mezclas de esta investigación, los valores de potenciales de corrosión del acero embebido en morteros, varían desde un -572.1 hasta un -690.5 mV vs Cu/CuSO₄.

Si bien los valores E_{corr} indican que las cuatro mezclas se encuentran dentro del 90% de probabilidad de corrosión. Cabe resaltar que la mezcla 28 presenta una menor probabilidad de corrosión en comparación con la mezcla control o de referencia del mortero convencional de cemento portland. Así mismo la mezcla 7 a 180 días mostró un valor de -598.4 mV vs Cu/CuSO₄; comparado contra el valor de -656.5 mV vs Cu/CuSO₄. (Mezcla de control) lo que indica una probabilidad de corrosión menor de un 8.8 %. Tanto la mezcla 7 como la 28 muestran valores de probabilidad de corrosión menores debido muy probablemente a que fueron mezclas con un tratamiento de curado de 20 horas a 80°C.

El análisis de los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) aplicado a las probetas prismáticas se muestra en la Figura 5 en ella se observan tres líneas horizontales que representan los límites horizontales de criterios de velocidad de corrosión en términos de la vida útil del elemento estructural (Red DURAR 1998)

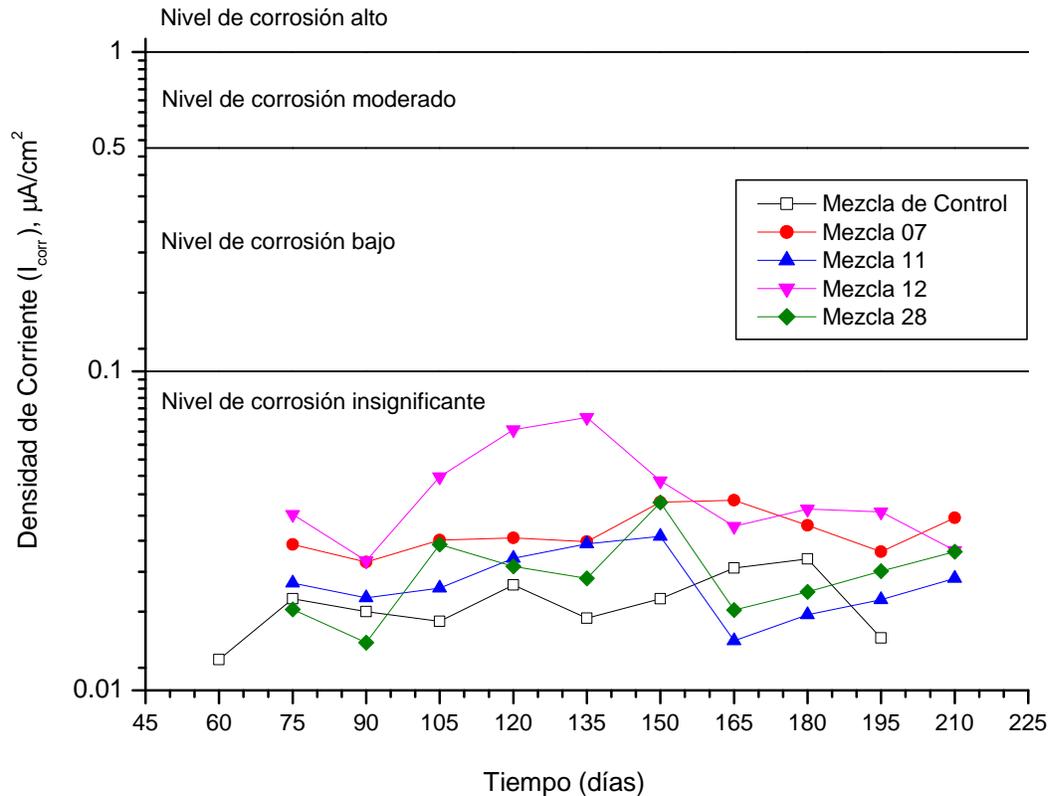


Figura 5. Variaciones de la Densidad de corriente del acero embebido, VS el tiempo de exposición.

De la figura 5, se desprende que los cuatro sistemas de esta investigación muestran un comportamiento muy similar al de un mortero elaborado con cemento Portland, se observa que

todos los sistemas incluyendo al de control se encuentran en un nivel de corrosión insignificante (por debajo del valor de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Sin embargo los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) indican que el sistema No. 11 muestra mayor durabilidad, desde la perspectiva del criterio de resistencia a la corrosión a partir de los 150 días de exposición al medio agresivo.

4. CONCLUSIONES

Los valores de resistencias a la compresión son superiores a los de un mortero con cemento portland tradicional.

Los valores de corrosión indican un estado de pasivación (corrosión despreciable); sin embargo se observó que mezclas elaboradas con porcentajes más altos de Na_2O y menores módulos de silicato indican una probabilidad de corrosión menor a la de un cemento portland tradicional.

5. REFERENCIAS

ASTM C-876-91 “Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA (1991)

NMX-C-146-ONNCCE-2000 “Industria de la construcción – Aditivos para concreto puzolana natural cruda o calcinada y ceniza volante para usarse como aditivo mineral en concreto de cemento Pórtland – Especificaciones.

Maldonado Bandala E.E.; Jiménez Quero V.; Olguin Coca F.J.; Lizarraga M.; Baltazar Zamora M.A.; Ortíz Cedano A.; Almeraya Calderón F.; Zambrano R.P.; Gaona Tiburcio, C. (2011), Electrochemical Characterization of Modified Concretes with Sugar Cane Bagasse Ash, International Journal Of Electrochemical Science, Vol: 6, Issue: 10, pages 4915-4926.

Rafat Siddique & Mohammad Iqbal Khan. (2011), *Supplementary Cementing Materials*, New Yor, USA, Springer.

Red DURAR, “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico en Estructuras de Hormigón Armado”. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Tronconis, O, Ed Maracaibo, Venezuela (1998).

Vaca Castaño P., “Cemento de entre las cenizas”, [<http://www.imcyc.com/cyt/mayo03/cenizas.htm>], Febrero 2007.

Elaboración de block a partir de Jales

J. Flores Badillo¹, J. Hernández Ávila¹, E. Salinas Rodríguez¹, M. Guerrero Rodríguez², E. Moreno Pérez¹, M. I. Reyes Valderrama¹ y E. Cerecedo Sáenz¹

RESUMEN

En el presente trabajo plantea la elaboración de block a partir de desechos mineros en forma de jales, ya que dentro del distrito minero Pachuca-Real del Monte, dónde se encuentran es un problema de contaminación a la atmosfera debido a que en la zona de estudio existen fuertes vientos que arrastran estos desechos en forma de partículas de tamaño micrométrico hacia las vías respiratorias y los ojos de los habitantes cercanos a los jales provocando enfermedades de tipo respiratorio, alergias y complicaciones oculares. La estabilización de los jales partió de su muestreo; su determinación de composición química en porcentajes es 70.43 de SiO₂, 7.032 de Al₂O₃, 2.69 de Fe, 0.46 de Mn, 3.98 de K₂O, 3.34 de CaO, 2.50 de Na₂O, 0.04 de Zn, 0.026 de Pb, 56 gr/ton de Ag y 0.6 gr/ton de Au. Dentro de las fases existentes dentro del material de los jales, se encuentran fases mayoritarias como Cuarzo, Anortoclasa, Ortoclasa, Berlinita y Albita; fases minoritarias como Hidroniojarosita, Natrojarosita, Argentita y Gibbsita; fases traza como Jarosita de Potasio, Romboclasa Anhidrita, Tridimita, Hematita, Pirita, Cristobalita, Wustita y Magnetita.

También se tiene que la determinación granulométrica del material de las presas de jales en el orden de 60% menor que la malla 270 (53 μm). Finalmente se elaboraron blocks a partir de la utilización del materia de las presas de jales como agregado fino, junto con agregados gruesos en forma de perlita expandida y pumicita, junto con el agente cementante. Obteniendo con el desarrollo de los compósitos cerámicos al final del fraguado, resistencias a la compresión igual o superior a 8 MPa, así como un porcentaje de absorción entre 35 y 19 %; siendo que estos blocks pueden ser utilizados en muros internos o externos, de carga o relleno, además de podersele adicionar un agente impermeabilizante o no, según se requiera.

Palabras clave: Jales, resistencia a la compresión, agregado fino, agregado grueso, agentes cementantes, block

1. INTRODUCCIÓN

La presa de jales de Dos Carlos, es una de las presas más antiguas dentro del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, estableciéndose dicha presa de jales en 1912. Actualmente, Dos Carlos cuenta con una cantidad de material correspondiente a 14.3 millones de toneladas, (CMRMyP, 2005). Posee una composición química correspondiente a 70.43% SiO₂, 7.32% Al₂O₃, 2.32% Na₂O, 0.08% K₂O, 0.69% CaO, 0.54% MgO, 0.73% MnO, 2.8% Fe₂O₃, 2.41% FeO, 0.53% TiO₂, 0.12 % P₂O₅, 55 ppm de Ag y 0.58 ppm de Au, (Hernández Ávila, y otros, 2012; Hernández Ávila J. , 2009; Patiño, y otros, 2007). Presentando una granulometría gruesa del orden de 60 % acumulada hasta la malla 200 (53 μm), (Hernández Ávila, y otros, 2012; Hernández Ávila J. , 2009). Dentro de las fases minerales que se han reportado hasta ahora, se presentan óxidos (Cuarzo, Hematita, Magnetita y Pírolusita), sulfuros (Pirita, Calcopirita, Galena, Esfalerita y Argentita), sulfatos (Yeso, Jarosita, Natrojarosita e Hidroniojarosita), carbonatos (Calcita), fosfatos (Berlinita), silicatos (Ferrosilita), aluminosilicatos (Ortoclasa, Albita y Anortoclasa), (Hernández Ávila J. , 2009; Ángeles Chávez, Lizárraga Mendiola, & Blanco Piñón, 2011).

Por su parte, se han realizado investigaciones e incluso patentes utilizando material procedente de presas de jales, dónde se han hecho blocks o incluso se ha propuesto como un agregado puzolánico. Jaquays describe un proceso y un producto mediante flujo de residuos que contienen bauxita que son tratados para neutralizar materiales alcalinos presentes, y el material resultante es incorporado, por ejemplo, en un material de construcción u otros materiales similares para proveer de propiedades mejoradas, teniendo como aglutinante a silicatos de calcio, (Jaquays, 2005). Anicama Acosta *et al.* reporta la formación de mezclas de cemento con agregado puzolánico (2-25 % de jal), teniendo como resultado que las mejores mezclas se encuentran entre 2 a 15 % de jal y que no afectan significativamente las propiedades mecánicas de la matriz cementante, (Anicama Acosta, 2010).

Cabe destacar que para tener un material con alto potencial puzolánico, según Montaña Cisneros *et al.*, se necesita un porcentaje en sumatoria de SiO₂ y Al₂O₃ de 70% como mínimo, (Montaña Cisneros, Robles Camacho, Corona Chávez, Martínez Medina, & Ramos Arroyo, 2006). Por lo tanto, con la sumatoria de las dos especies mencionadas, dentro de la composición química del material de Dos Carlos, se tiene un material de alto potencial puzolánico, que puede ser utilizado para la elaboración de block, siendo un agregado fino, debido a la granulometría presentada.

Por último, se definirá lo que es concreto y sus componentes (cemento, agregados fino y grueso), debido a que para efecto de esta parte de la investigación, se realizará una mezcla similar al concreto y se vibrocompactará para la formación de material de construcción en forma de block.

El concreto se define como un material compósito consistente en cemento, agregado fino, agregado grueso, agua en la proporción en masa correspondiente a 1:2:3:0.5.

Según la norma ASTM C125 y la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés), el cemento es un material inorgánico o una mezcla de materiales inorgánicos que presenta resistencia mecánica por medio de la reacción química con agua, a través de la formación de hidratos, y que es capaz de endurecer al agregar agua, (Cardarelli, 2008). El más común de los cementos hidráulicos es el cemento Portland, el cual está formado principalmente

por silicatos de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2, 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), teniendo también dentro de su composición aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), aluminoferritatetracálcica ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) y yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), (Cardarelli, 2008; Velez, 2008; Askeland, Fulay, & Wright, 2011).

Los agregados son comúnmente utilizados en una proporción del 60 al 80% del volumen total, (Cardarelli, 2008; Callister, 2007) teniendo en cuenta que el agregado grueso se utiliza para dar resistencia a la matriz y el agregado fino se utiliza para llenar los intersticios creados entre partículas de agregado grueso, teniendo un contacto interfacial bueno entre agregados, (Callister, 2007). Los agregados gruesos corresponden a material con tamaño de partícula entre 9.5 a 37.5 mm, y los agregados finos corresponden a material con tamaño de partícula menor a 9.5 mm, (Cardarelli, 2008). Entre los materiales utilizados como agregados caliza, basalto, diábasita, granito, grava, escorias de alto horno, chatarra de hierro, hematita, ilmenita, barita, pumicita, lava solidificada y coque, (Cardarelli, 2008).

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para la caracterización general del material procedente de la presa Dos Carlos por medio de Difracción de Rayos X (DRX), se tamizó la muestra a un tamaño entre 75 y 53 μm (mallas serie Tyler® 200 y 270, respectivamente). Una vez preparada la muestra a dicho tamaño se procedió a pesar 1 gramo de muestra la cual fue compactada en un portamuestras de aluminio para su posterior análisis por DRX efectuado con un difractómetro Inel modelo Equinox2000, con radiación $\text{Cu}\cdot\text{K}_1$ ($\lambda = 1.540560 \text{ \AA}$), a 30 kV, 20 mA y una velocidad de barrido de 22 $^\circ/\text{min}$. El difractograma obtenido fue posteriormente indexado por medio del software MATCH! Versión 1.10, determinando así las fases minerales presentes.

Posteriormente se realizó el análisis granulométrico por vía húmeda mediante la utilización de tamices serie Tyler® con abertura de malla de 177, 149, 105, 74, 53, 37 μm , donde se tamizó 100 g de muestra por vía húmeda, las fracciones obtenidas se secaron a temperatura ambiente y se pesaron.

Para la fabricación de block a partir del material de la presa de jales de Dos Carlos se utilizaron un agente cementante (Cemento Portland tipo II), agregados gruesos (pumicita y perlita expandida) y como agregado fino al material de la presa Dos Carlos se utilizó tal y como proviene de la presa de jales.

Por lo tanto se desarrollaron tres diferentes mezclas para la fabricación de block, a las cuales se les evaluó antes de la vibrocompactación, la plasticidad por cada mezcla, además de evaluar el costo y la existencia de reservas, del material adicionado al jal como agregado grueso (pumicita y perlita expandida), con la finalidad de abaratar costos, proveer buena plasticidad, asegurar mejor resistencia posterior al curado de la mezcla y ocupando la mayor cantidad posible de material procedente de la presa de jales.

Finalmente, se realizaron pruebas certificadas de los blocks obtenidos con las diferentes mezclas desarrolladas con el material de la presa Dos Carlos, comparados según la norma de la SCT N-CMT-2-01-002/02. Las pruebas desarrolladas fueron de dimensionamiento, absorción, y resistencia a la compresión simple. Con dichas pruebas también es posible determinar la permeabilidad y el peso volumétrico de cada uno de los blocks desarrollados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la figura 1 se muestra el difractograma de Rayos X general del material de la presa de jales de Dos Carlos, donde se observa que existen fases mayoritarias como Cuarzo, Anortoclasa,

Ortoclasa, Berlinita y Albita; fases minoritarias como Hidroniojarosita, Natrojarosita, Argentita y Gibbsita. También se presentan en el material de esta presa de jales fases traza como Jarosita de Potasio, Romboclasa Anhidrita, Tridimita, Hematita, Pirita, Cristobalita, Wustita y Magnetita.

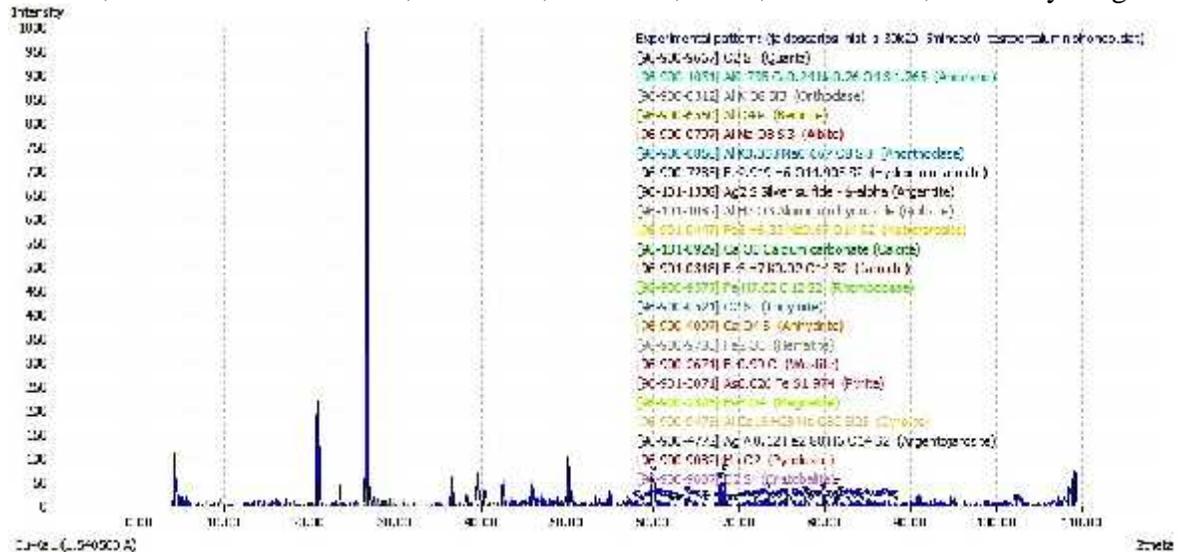


Figura 1. Difractograma de rayos X del material de la presa Dos Carlos, cuyas especies minerales principales son: Cuarzo, Anortoclasa, Ortoclasa, Berlinita y Albita. Obtenida con una radiación de Cu K₁ de longitud 1.54056 Å, un voltaje de 30 Kv, una intensidad de 20 mA y una velocidad de barrido de 22 /min.

En el Distrito Minero, estos minerales de tipo jarosítico provienen de la minas de El Cristo y Tancutín, (Hernández Ávila J. , 2009; Geyne, Fries, Segerstrom, Black, & Wilson, 1963). Así también se tiene que estos minerales jarosíticos fueron lixiviados durante el beneficio del mineral y quedaron presentes en el mineral que forma parte de la presa de jales de Dos Carlos. También cabe señalar que en debido a la composición química de las rocas encajonantes como Dacita, Traquita, Andesita, Basalto y Riolita,(CRM, 1992), tan comunes en las rocas del “Grupo Pachuca” y en donde se presenta la mineralización económica en el Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, se ha cotejado que estas rocas son de tipo ígneo (volcánico y vulcanoclástico), y con una epigenésis hidrotermal de baja temperatura y de baja profundidad, también llamado epitermalismo,(CRM, 1992), debido la presencia de Cuarzo, Tridimita, Cristobalita y de minerales del tipo feldespático como las Plagioclasas (Anortoclasa y Albita) y Ortoclasas. En el caso de minerales como la Romboclasa, Anhidrita y Gibbsita, se sugiere que en la Presa Dos Carlos se formaron estos minerales debido a una meteorización *in situ*, ya que en caso de la Romboclasa, se formó debido a la intemperización de los sulfuros y sulfosales de hierro y especialmente de la Pirita, la Gibbsita se formó por la intemperización de Plagioclasas y Ortoclasas y en el caso de la Anhidrita, se debió a la reacción química entre el CaO presente en el mineral como un aditivo para mantener el pH durante la flotación y los drenajes ácidos de mina procedentes de la hidrolisis de la Pirita. También se pudo observar la presencia de Argentita, Hematita, Wustita y Pirita que no pudieron ser lixiviadas y que quedaron como un residuo para su posterior extracción.

Por su parte, se observa en la figura 2 que el peso mayoritariamente retenido se encuentra en tamaño de partícula de 149 μm con un 19.18 %, posteriormente presenta una decrecimiento abrupto hasta 37 μm que es donde se encuentra el peso retenido mínimo que es del 4.50 % encontrándose que se puede fabricar material de construcción y cerámicos, debido a que se presentan tamaños de partícula óptimos dentro de especificaciones.

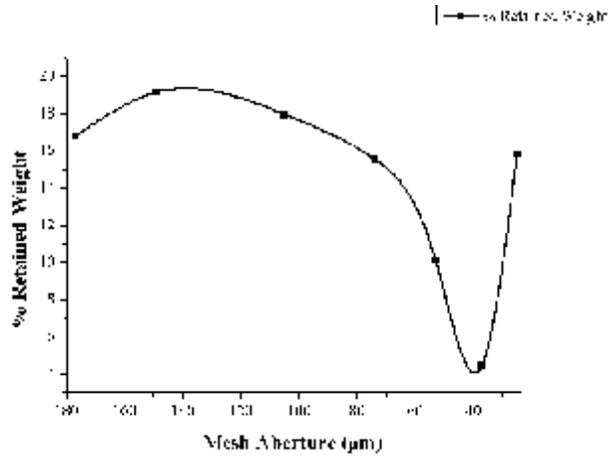


Figura 2. Distribución granulométrica del material de la Presa

Para el block realizado con material de la Presa Dos Carlos.

Para el block realizado con material de la Presa Dos Carlos se utilizó un agente cementante tipo cemento-agregado grueso-agregado fino y agua con la incorporación de material procedente de la presa de jales de Dos Carlos como agregado fino, y en el caso de agregado grueso se utilizó perlita expandida o pumicita, como se observa en la tabla 2, para la elaboración de los compósitos cerámicos se utilizó un porcentaje de jalo suficiente para proveer la mayor resistencia después del curado en el agente cementante.

Tabla 2. Composición en porcentaje en peso para fabricación de block con material procedente de la presa Dos Carlos.

Composición	Cemento	Agregado grueso	Agregado fino (Jal)	Agua
1	8.316%	13.514% Perlita	58.212%	19.958%
2	6.494%	38.961% Pumicita	38.961%	15.584%
3	6.494%	46.753% Pumicita	31.169%	15.584%

En la figura 3 se presenta la apariencia de los blocks elaborados con las proporciones especificadas en la tabla anterior, donde el agregado fino representado por el material de la presa Dos Carlos es unido a el agregado grueso mediante el silicato dicálcico, el silicato tricálcico y el aluminato tricálcico.

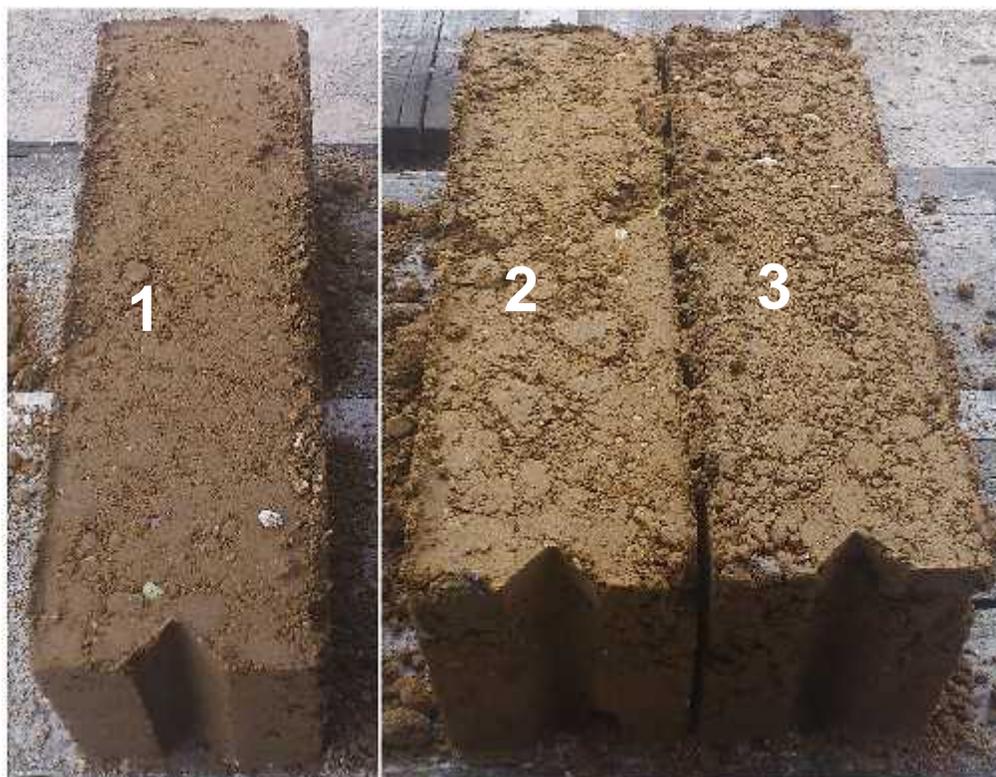


Figura 3. Blocks elaborados con material proveniente de la presa de jales Dos Carlos.

En la tabla 3 se observan las propiedades físicas obtenidas de cada uno de los blocks elaborados con material de la presa Dos Carlos, así como las dimensiones y dos de las propiedades físicas que estipula la norma SCT N-CMT-2-01-002/02, es decir la absorción y la resistencia a la compresión. En ella se observa que de acuerdo a la norma, los tres tipos de blocks se podrían utilizar para muros internos o externos, de carga y de relleno; teniendo en el caso del block 1, la necesidad de que sea resistente por un agente impermeable si se utilizara para muros externos.

Tabla 3. Propiedades físicas de los blocks realizados con material de la presa de jales de Dos Carlos y comparación con la norma SCT N-CMT-2-01-002/02.

Norma SCT N-CMT-2-01-002/02							
Longitud (cm)	Ancho (cm)		Altura (cm)	Absorción por 24 hrs. (%)		Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
39.7-40.3	13.8-14.2		11.8-12.2	17-23.5		56.0	
Compósitos con Jal							
Muestra	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Peso Volumétrico (Kg/m ³)	Absorción por 24 hrs. (%)	Permeabilidad (cm ³ /s)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	40.5	14.0	12.5	1341.1458	35.83	0.047852	76.54
2	40.6	12.2	16.0	1622.4605	23.47	0.026620	81.16
3	40.0	12.0	16.0	1236.5931	19.42	0.023148	82.5

CONCLUSIONES

Se concluye que de acuerdo a la caracterización por DRX general del material de la presa de jales de Dos Carlos, se tienen como fases mayoritarias al Cuarzo, Anortoclasa, Albita, Berlinita, Ortoclasa. Adicionalmente a estas fases mineralógicas, se presentan en menores concentraciones dentro del material de la presa Dos Carlos las siguientes fases: Cristobalita, Tridimita, Gyrolita, Jarosita de Potasio, Hidroniojarosita, Natrojarosita, Argentojarosita, Calcita, Anhidrita, Gibbsita, Pirita, Romboclasa, Argentita, Magnetita, Hematita, Wustita y Pirolusita. De estas fases presentes en el material de Dos Carlos, se tiene que las fases que generan un alto poder puzolánico y una alta resistencia son las que permanecen como fases mayoritarias, así también Cristobalita, Tridimita y Gyrolita.

En lo que se refiere a la elaboración de material de construcción en forma de block, de acuerdo a la norma SCT N-CMT-2-01-002/02, se tiene una resistencia superior a lo estipulado y en el caso de los blocks con agregado grueso de pumicita, se ha logrado una absorción similar o menor a lo estipulado a la norma, siendo que pueden ser ocupados para muros internos o externos y de relleno. Aunque en el caso del block con perlita expandida también puede tener el mismo uso, es necesario un agente impermeabilizante, debido a su mayor porcentaje de absorción.

REFERENCIAS

- Ángeles Chávez, D. E., Lizárraga Mendiola, L., & Blanco Piñón, A. (2011). Análisis Geoquímico-Mineralógico del depósito de jal Dos Carlos, Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, Hidalgo. En N. Piedad Sánchez, M. Rosales Sosa, E. R. Santoyo Gutiérrez, & M. Guevara García (Edits.), *Actas INAGEQ* (Vol. Volumen 17, pág. 146). Monclova, Coahuila, México: Universidad Autónoma de Coahuila.
- Anicama Acosta, G. A. (2010). *Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales* (6a. Edición ed.). México: CENGAGE Learning.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7a. Edición ed.). Nueva York, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Cardarelli, F. (2008). Cements, Concrete, Building Stones and Construction Materials. In F. Cardarelli, *Materials Handbook: A concise desktop reference* (2a. Edición ed., pp. 967-981). Londres, Reino Unido: Springer.
- CMRMyp. (2005). *Resumen General de presas de Jales*. Pachuca de Soto: CMRMyp.
- CRM. (1992). *Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo*. México: CRM.
- Crystal Impact. (2010). *Match!, Versión 1.10*. Bonn, Alemania.
- Geyne, A. R., Fries, C. J., Segerstrom, K., Black, R., & Wilson, R. F. (1963). *Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico*. México: CRM.
- Hernández Ávila, J. (2009). *Cinética de molienda y recuperación de Ag mediante procesos convencionales y no convencionales de las escombreras de la industria minero-metalúrgica del Estado de Hidalgo*. Pachuca de Soto, Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Hernández Ávila, J., Salinas Rodríguez, E., Patiño Cardona, F., Rivera Landero, I., Flores Badillo, J., Trápala Pineda, N. Y., . . . Reyes Domínguez, I. A. (2012). *Tile Production using Wastes from Mining Industry of the Mining District Pachuca Real del Monte*. EUA: The Mineral, Metals & Materials Society.

- Jaquays, C. D. (28 de abril de 2005). *Patente n° US20050087107A1*. EUA.
 - Montañó Cisneros, E., Robles Camacho, J., Corona Chávez, P., Martínez Medina, M., & Ramos Arroyo, Y. R. (2006). Caracterización mineral y geoquímica de los jales del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua. Reutilización potencial de los desechos mineros. En E. A. Aguilar, J. Lemus, E. Bedolla, & C. A. León (Edits.), *Memorias del 3er. foro de Ingeniería e Investigación en Materiales* (Vol. Volúmen 3, págs. 198-203). Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
 - Patiño, F., Hernández, J., Rivera, I., Salinas, E., Longoría, L. C., & Gonzalez, J. M. (2007). Characterization and kinetics of the grinding of the Dos Carlos burrows in the state of Hidalgo. *International Precious Metals Institute*.
 - Romero, A. A., Medina, R., Puente, L., Flores, S. L., Guadalupe, E., de La Cruz, E., & Ramírez, V. (2008). Los residuos sólidos mineros del proceso de flotación de minerales en la cuenca del río Santa-Áncash. En *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* (Vol. Volumen 11, págs. 14-18). Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
 - Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricación de ladrillos y baldosas. En *Industrial Data* (Vol. Volumen 13, págs. 75-82). Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
 - SCT. (2002). *Norma SCT N-CMT-2-01-002/02*.
- Velez, M. (2008). Concrete and Cement. En J. F. Shackelford, & R. H. Doremus (Edits.), *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing* (págs. 135-151). New York, EUA: Springer.

Espectroscopia de impedancia electroquímica del deterioro de concretos modificados con ceniza volante, microsílíce y ceniza de bagazo de caña de azúcar

A. N. Arballo-Sandoval¹, R. E. Núñez Jaquez^{1*}, G. J Fajardo-San Miguel², C. P. Barrios-Durstewitz¹, J. H. Castorena-González¹.

¹Facultad de Ingeniería Mochis. Universidad Autónoma de Sinaloa. Fuente de Poseidón y Pról. Ángel Flores S/N. Fracc. Las Fuentes. Los Mochis, Sinaloa, México. C.P. 81223

²Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Universidad S/N. Cd. Universitaria. San Nicolás de Los Garza, Nuevo León. México. C.P. 66451.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar la velocidad de corrosión en mezclas ternarias de concreto reforzado a las cuales se les reemplazó el 20% en peso de cemento con ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), ceniza volante (CV) y microsílíce (MS). Se elaboraron veintitún probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura, con una varilla inmersa, tres especímenes sin reemplazo, 9 con sustitución de microsílíce y ceniza de bagazo de caña de azúcar y 9 con sustitución de ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar, posteriormente se colocaron en una solución salina al 3,5% en peso, en ciclos de humectación y secado, se realizaron pruebas de resistencia a la polarización e impedancia electroquímica. De igual forma se elaboraron veintitún probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro x 5 cm de altura a las que se le realizó la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloruro. En los resultados se muestra que los especímenes en los que se sustituyó el 5% de CBCA y el 15% de microsílíce presentan las menores velocidades de corrosión y el mejor comportamiento.

Palabras clave: Corrosión, Puzolana, Cloruros, Resistencia a la Polarización, Impedancia Electroquímica..

Autor de contacto: , R.E. Núñez Jaquez (ing_ronunez@hotmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla en diferentes proporciones de agregados (finos y gruesos) y pasta. La pasta está compuesta por cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando un material semejante a una roca debido a las reacciones químicas generadas entre sus componentes [1]. Por otra parte el concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más utilizados, esto se debe al uso de dos materiales que complementan significativamente sus propiedades: acero y concreto que reunidos en un material mixto, aportan la resistencia a la flexión del primero y la buena resistencia a la compresión del segundo. Sin embargo, en los últimos años el deterioro de estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran importancia. La corrosión del acero de refuerzo es conocida como uno de los mayores problemas, por tanto, se ha convertido en un importante tema de investigación [2,3].

Por otra parte el cemento Portland genera en la actualidad diversos problemas, entre los que destaca el alto grado de contaminantes que se emiten a la atmosfera en su fabricación (gases de efecto invernadero, especialmente CO₂ y NO_x), así como algunas limitaciones tecnológicas, relacionadas con la durabilidad de los concretos. De ahí la importancia de desarrollar nuevos materiales cementantes que permitan reemplazar en determinadas aplicaciones al cemento Portland, sin perder las propiedades mecánicas del mismo, pero mejorando el impacto medioambiental [4]. La industria del cemento, se ha enfocado a la utilización de aglomerantes económicos y eco-eficientes. La producción de cemento Portland genera aproximadamente entre el 7 y 8% de CO₂ mundial (gas de efecto invernadero). Con el propósito de reducir dichas emisiones, se han desarrollado materiales de construcción eco-eficientes, los cuales son una alternativa viable a los cementos convencionales. La principal alternativa sugerida es el uso de materiales puzolánicos que mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto [5].

Los materiales puzolánicos son productos naturales o artificiales, silíceos o sílico aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas. Presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker. Engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se está haciendo alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas [6]. Diversos materiales puzolánicos, son utilizados en sustitución parcial de cemento portland en pastas, morteros o concretos [7]. El uso de puzolanas en morteros y concretos se ha convertido en algo habitual debido a que mejora las

propiedades mecánicas y aumenta la durabilidad ante agentes agresivos. Esto se atribuye a dos procesos: a) la formación de productos de hidratación adicionales debidos a la reacción de la puzolana con el hidróxido de calcio y b) la reducción de la permeabilidad por el efecto del llenado de poros con los productos formados por la reacción puzolánica [8] En los últimos años ha habido un aumento significativo en la producción de concretos compuestos que incorporan cemento portland y dos materiales puzolánicos (concretos ternarios) [9]. Dentro de estos sistemas existen varios estudios en los que se mezclan diferentes materiales o residuos, entre ellos se encuentran: cemento portland (CP)/microsilice (MS)/ceniza volante (CV); CP/escoria/CV; CP/cverbos en cenizas de residuos/CV; CP/caliza/escoria; CP/escoria/puzolana natural [10].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Elaboración de especímenes

Se realizaron probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura. A todos los especímenes se les embebió una varilla de acero 1018, 3/8 de pulgada de diámetro, la cual tiene una longitud de 15 cm, fueron limpiadas y en la parte central se encintaron 10 cm, para cubrir el resto con pintura epóxica, posteriormente se retiró la cinta y la parte sin cubrir fue la que quedo expuesta al proceso de corrosión, dentro del concreto ternario. Una vez transcurridos 28 días de curado los especímenes se colocaron en un recipiente que contenía solución salina (3.5% en peso de NaCl), y se monitoreo cada semana la velocidad de corrosión por medio de la técnica de resistencia a la polarización e impedancia electroquímica.

Se realizaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro x 5 cm de altura. Una vez transcurridos 28 días de curado los especímenes se sometieron a una prueba de permeabilidad rapida a los iones cloruro.

2.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica

El monitoreo de los especímenes se realizó por medio de un potenciostato galvanostato Field Machine marca ACM Instruments, como electrodo de referencia un electrodo de Plata/Cloruro de plata, la varilla inmersa como electrodo de trabajo y alrededor del espécimen una placa metálica de acero inoxidable como contra electrodo. Las pruebas de impedancia se realizaron con un rango de frecuencia de 0.1 Hz hasta 100 kHz, la amplitud de 10 mV rms, con 100 puntos de lectura.

A través de dicha técnica se obtendrá un circuito eléctrico equivalente, que nos permita obtener las densidades de corriente de corrosión.

2.2.1 Criterios de evaluación

Tabla II. Clasificación de i_{corr} en términos de vida útil

I_{corr} (~A/cm ²)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable

0.1 – 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevado
>1	Muy elevado

2.3 Permeabilidad rápida a los iones cloruro

Un espécimen saturado en agua, 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, es posicionado en una celda conteniendo una reserva de fluidos en ambos lados. Para el RCPT una reserva es llenada con una solución de 3 % NaCl y la otra con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. Los iones cloro cargados negativamente migraran hacia la terminal positiva. Entre más permeable sea el concreto, más iones cloro viajaran a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente es medida por 6 horas.

2.3.1 Criterios de evaluación

Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulombs que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de Coulombs se utilizan para clasificar el concreto según la tabla III.

Tabla III. Criterios de evaluación para permeabilidad

Coulombs	Clase de permeabilidad	Típico de
> 4000	Alta	w/c >0.5
4000 – 2000	Moderada	w/c = 0.4 o 0.5
2000 – 1000	Baja	w/c < 0.4
1000 – 100	Muy baja	Concreto modificado con látex
< 100	Insignificante	Concreto polimérico

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1. Espectroscopia de impedancia electroquímica

3.2.1 Diagramas de Nyquist

Se puede observar que en los especímenes sin sustitución (MB) se presenta una menor resistencia del electrolito y aquellos con una mayor resistencia son los especímenes con 5% de CBCA y 15% Microsílice (C5S15). Se observa también que con el paso del tiempo, la resistencia del electrolito en todos los especímenes de mezclas ternarias presenta un aumento. Apreciamos dos semicírculos que nos indican dos resistencias del material, una debido al electrolito y la otra debida seguramente al concreto, los especímenes 5% de CBCA y 15% Microsílice (C5S15)

presentan un mayor radio en el segundo semicírculo debido a una mayor resistencia por parte de la matriz cementante de la mezcla.

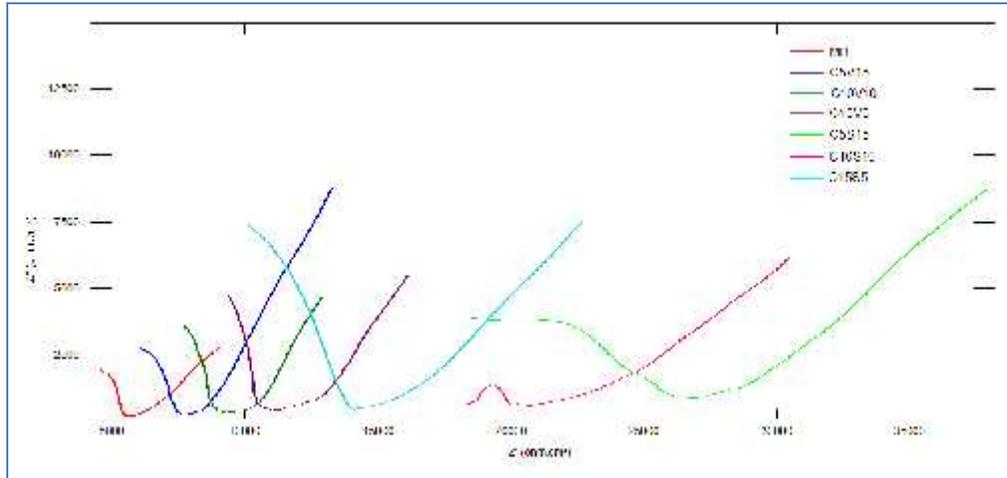


Figura 1. Diagrama de Nyquist a 0 días de exposición

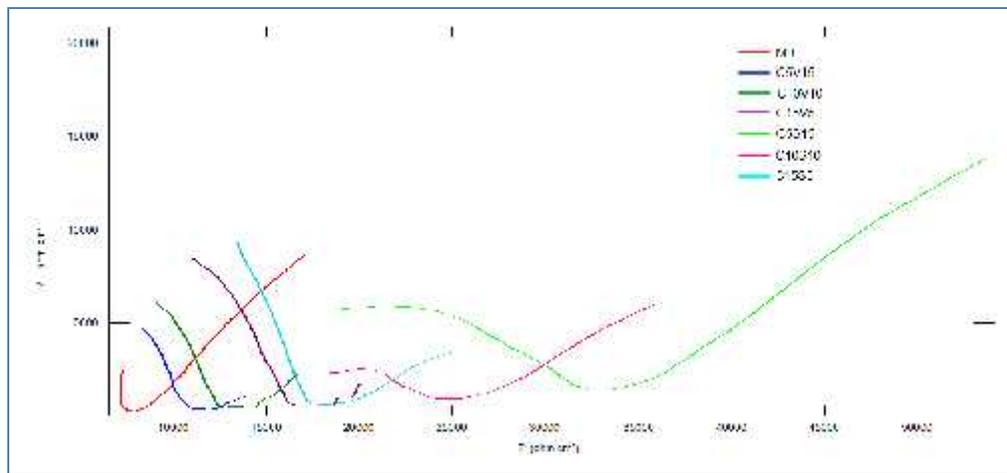


Figura 2. Diagrama de Nyquist a 98 días de exposición

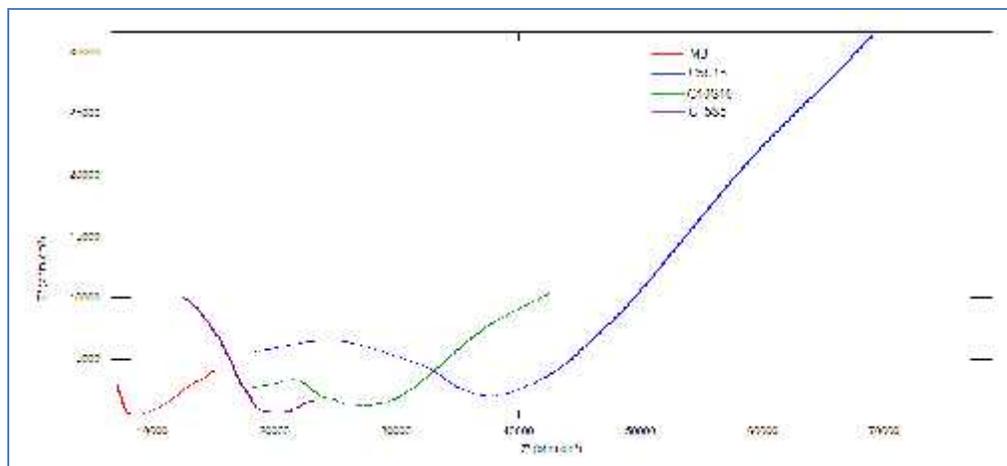


Figura 3. Diagrama de Nyquist a 189 días de exposición

3.2.2 *Diagramas de Bode*

A continuación se muestran los diagramas de Bode a) Angulo y b) Impedancia de fase para el espécimen con y sin adición. En el diagrama de Bode de ángulo de fase se aprecia que en todos los casos el ángulo es menos a 45 grados lo que indica un posible proceso capacitivo. En el diagrama de Bode de Impedancia se aprecia un aumento en la resistencia al electrolito con el paso del tiempo, atribuida únicamente al concreto.

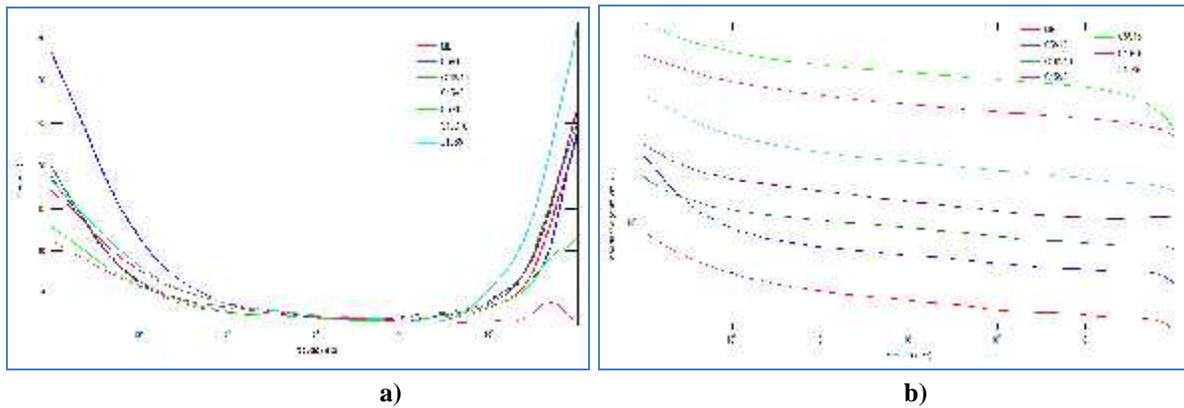


Figura 4. Diagrama de Bode a) Angulo de fase y b) Impedancia para 0 días de curado

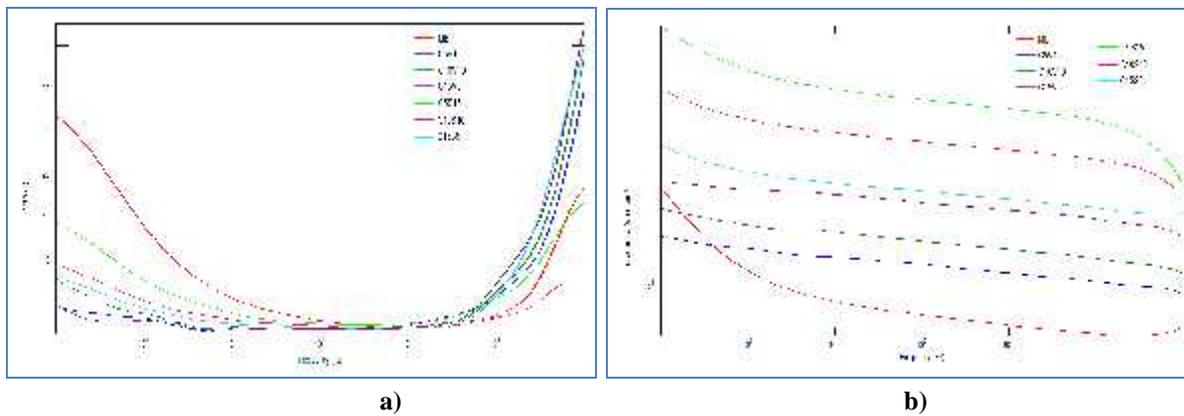


Figura 5. Diagrama de Bode a) Angulo de fase y b) Impedancia para 98 días de curado

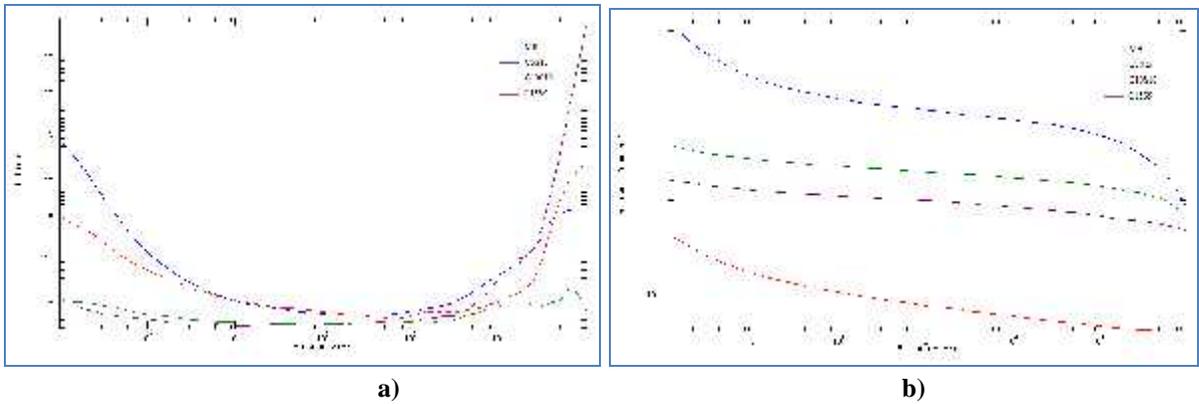


Figura 6. Diagrama de Bode a) Angulo de fase, b) Impedancia para 189 días de curado

3.2.3 Circuito eléctrico equivalente

El circuito eléctrico que se ajusta a lo resultados experimentales obtenidos es el siguiente:

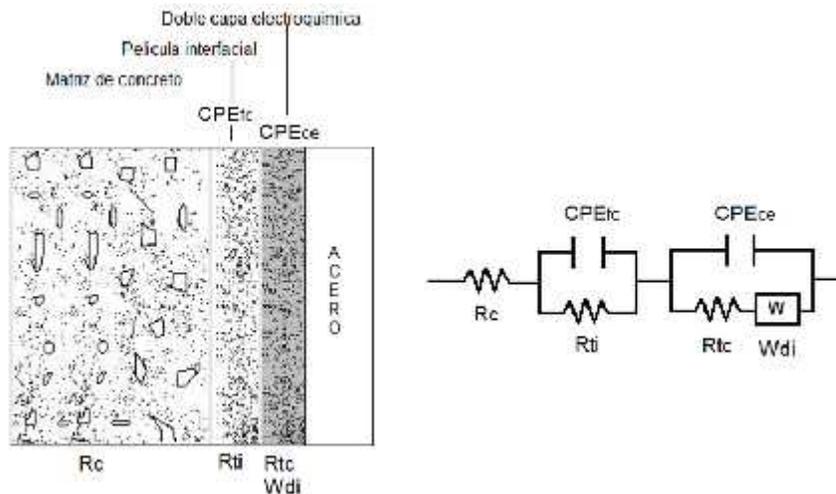


Figura 7. Circuito eléctrico equivalente obtenido a través de EIS

De su aplicación se obtuvieron las siguientes densidades de corriente de corrosion:

Se observa que en todo momento la mezcla blanca (MB) presenta valores de densidad superiores a las mezclas con sustitucion, de ellas la que contiene 5% de CBCA y 15% Microsilíce (C5S15) presenta una estabilidad mayor, asi como valores de densidad de corrosion mas bajos con respecto al resto.

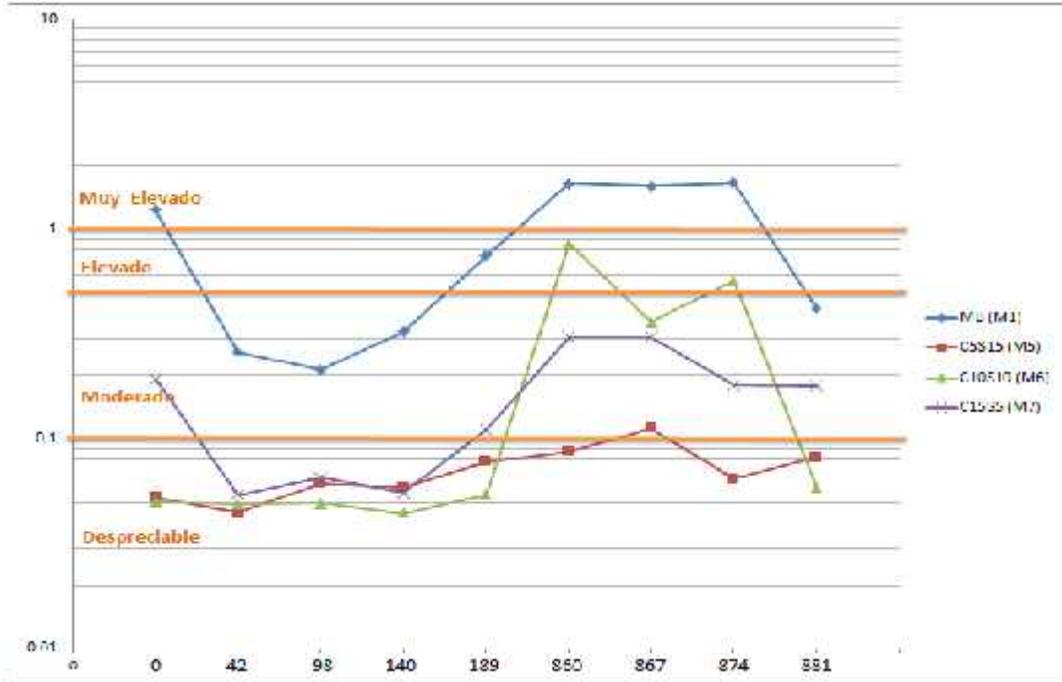


Figura 8. Valores promedio de potenciales de corrosión de los especímenes con CBCA y MS. Se puede observar que las mezclas con sustitución presentan valores de densidad de corrosión superiores a la mezcla blanco, sin embargo, hacia el final las mezclas 5% de CBCA y 15% Ceniza Volante (C5V15) y 10% de CBCA y 10% Ceniza Volante (C10V10) tienden a presentar un mejor desempeño, además de un comportamiento más estable con respecto al resto.

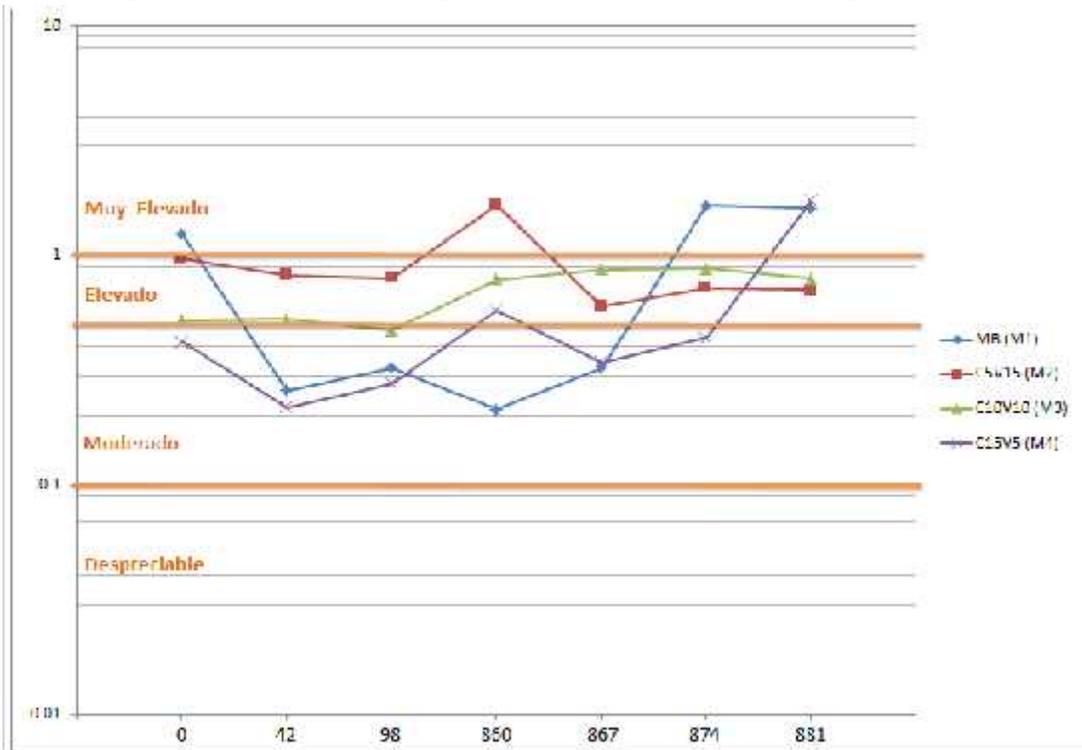


Figura 9. Valores promedio de potenciales de corrosión de los especímenes con CBCA y CV

3.3 Permeabilidad rápida a los iones cloruro

La figura 11 muestra que las probetas 100% CPO presenta un tipo de permeabilidad a los iones cloro, alto, mientras que las muestras de concretos ternarios presentan una permeabilidad moderada o baja. Se observa que para las tres muestras que contienen ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar se encuentran dentro de una permeabilidad moderada. Mientras que las muestras con sustitución de microsíllice y ceniza de bagazo de caña de azúcar presentan una permeabilidad baja y aquellas con sustitución (S5S15) presentan una permeabilidad muy baja.

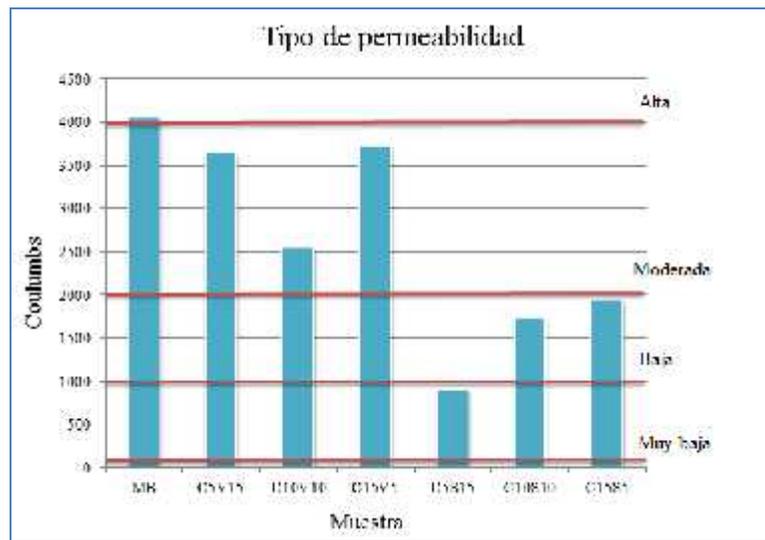


Figura 11. Tipo de permeabilidad a los iones cloro de los especímenes

4. CONCLUSIONES

Por lo anterior se puede concluir que los especímenes que presentan un mejor comportamiento son aquellos conocidos como C5S15 (5% CBCA – 15% MS), C10S10 (10% CBCA y 10% MS) y C5V15 (5% CBCA y 15% CV), donde el nivel de corrosión varía de moderado a elevado, mientras que aquellos especímenes sin sustitución muestran un nivel de corrosión muy elevado, sin embargo se muestra también que los especímenes conocidos como C15S5 (15% CBCA – 5% MS) muestran un comportamiento similar a los especímenes sin sustitución, se estima que dicho comportamiento es debido a la CBCA, ya que este material tiende a variar su reactividad puzolánica según la temperatura de calcinación, dicho esto, la CBCA obtenida para este proyecto no tiene un grado de calcinación uniforme.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ingenio Azucarero de Los Mochis, en especial al Ing. Jorge Francisco Parra Pit, por las facilidades prestadas para la donación de la Ceniza de Bagazo de Caña, a Concretos Premezclados de Chihuahua (COPRECHISA), por la donación del cemento portland ordinario y a la Universidad Autónoma de Sinaloa, por medio de la Dirección General de Investigación y Posgrado, por el apoyo económico brindado a través de Proyecto PROFAPI 2013/125 para el desarrollo de este trabajo

6. REFERENCIAS

- [1] José Luis Chan Yam, Rómel Solís Carcaño y Eric Iván Moreno. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*. 7(2) 39-46, 2003.
- [2] Angélica del Valle Moreno; Tezozómoc Pérez López; Miguel Martínez Madrid. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 182, 2001.
- [3] P. Antonaci, C.L.E. Bruno, M. Scalerandi y F. Tondolo. Effects of corrosion on linear and nonlinear elastic properties of reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 51 96-103, 2013.
- [4] C. Pastor, A. Fernandez-Jimenez, T. Vazquez y A. Palomo. Hidratación del cemento de aluminato de calcio en condiciones de muy elevada alcalinidad. *Materiales de construcción*. 59(293) 21-34, 2009.
- [5] Moussa Hamidi, Larbi Kacimi, Martin Cyr y Pierre Clastres. Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. *Construction and building materials*. 47 1268-1277, 2013.
- [6] Tobon J. I. Puzolanas en los alrededores de Irra. *Dyna*. 129 77-83, 2000.
- [7] Guilherme Chagas Cordeiro, Eduardo de Moraes Reao Fairbairn; Romildo Días Toledo Filho, Caracterización de ceniza de bagazo de caña de azúcar para empleo como puzolana en materiales cementicios. *Quim. Nova*. 32(1) 82-86, 2009.
- [8] J. M. Cruz, J. Paya, L. F. Lalinde, I. C. Fita, Evaluación de las propiedades eléctricas de morteros de cemento con puzolanas. *Materiales de construcción*. 61(301) 7-26, 2011.
- [9] S.K. Antiohos, V.G. Papadakis, E. Chaniotakis y S. Tsimas. Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes. *Cement and Concrete Research*. 37 877-885, 2007.
- [10] Suárez Silgado S. Tesis: Mezclas binarias y ternarias basada en cenizas volantes. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas. Universidad Politécnica de Catalunya. 27, 2010

Resolución de la ecuación de Nernst-Planck mediante funciones de base radial: electro-migración y difusión de iones cloruro en el concreto

M. S. Flores Cortez^{1, *}, J. A. Muñoz Gómez², C. P. Barrios Durstewitz¹, R. E. Núñez Jaquez¹, J. H. Castorena González¹

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N, C. U., C.P. 8223, Los Mochis, Sinaloa, México.

²Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional # 151, Autlán, Jalisco, México.

RESUMEN

El transporte de iones como el ion cloruro a través del concreto ha sido motivo de estudio, debido a que el ingreso de éstos, afecta la vida útil de la estructura. El mecanismo de transporte iónico queda descrito por la ecuación de Nernst-Planck y para resolver el problema se recurre a técnicas numéricas como el Método de Diferencias Finitas (MDF) o Elemento Finito (MEF) los cuales requieren de un proceso de mallado y un mayor costo computacional. En este trabajo se aplicaron métodos relativamente nuevos como el método de Funciones de Base Radial (FBR) y el Método de Solución Fundamental (MSF), los cuales no requieren de una malla para resolver el problema del transporte iónico.

Palabras clave: migración, difusión, simulación, funciones radiales.

Autor de contacto: , C. P. Barrios Durstewitz (carlosbarri@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de iones como el ion cloruro a través del concreto ha sido motivo de estudio, debido a que el ingreso de éstos, afecta la vida útil de la estructura (Liu, 2014, Li, 2012 y Conciatori, 2010). Por tal motivo se ha prestado atención al estudio del transporte de iones a través de los poros del concreto. El mecanismo de transporte iónico queda descrito por la ecuación de Nernst-Planck (Wang, 2012, Toumi, 2007, Truc, 2000, Lizarano, 2009 y Yoon, 2012) en donde se han hecho esfuerzos para encontrar una solución analítica a esta ecuación, quedando limitados a casos de geometrías muy simples, ya que para el caso donde se considera al concreto como un material multi-fásico formado por la pasta, los agregados y la zona de transición interfacial (ZTI), no existe solución analítica.

Cuando un campo eléctrico es aplicado, el movimiento de los iones cloruro es debido a dos fuerzas de conducción, difusión y migración. Esto puede declararse que:

$$J_T = J_M + J_D \quad (1)$$

Donde J_T es el flux total, J_M es el flux debido a la migración y J_D es el flux debido a la difusión. El flux debido a la difusión puede ser determinado de la primera Ley de Fick:

$$J_D = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

Donde D es el coeficiente de difusión de cloruro del concreto, C es la concentración de cloruro, y x es una variable de posición. Para determinar el flux debido a la migración, se utiliza la relación de Nernst-Planck para derivar la ecuación:

$$J_M = \frac{zFU}{RT} C \frac{U}{L} \quad (3)$$

Donde z es la valencia del cloruro (Eq. (1)), F es la constante de Faraday (9.648 104 J/Vmol), U es la diferencia de potencial a través de la muestra, R es la constante universal de los gases (8.314 J/molK), T es la temperatura, y L es la longitud de la muestra. Sustituyendo las Eqs. (2) y (3) en la Eq. (1) resulta en la ecuación diferencial:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{zFU}{RT} C \frac{U}{L} \quad (4)$$

Resolviendo para el estado no estacionario, concentración de superficie constante, condiciones de contorno de profundidad infinita resultan en la solución numérica:

$$C(x, t) = \frac{C_s}{z} \left(e^{ax} \operatorname{erfc} \left(\frac{x+at}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-at}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (5)$$

Donde C_s es la concentración de superficie, t es el tiempo, $a = zFU/RTL$ y erfc es la función de error complementaria.

Este modelo no toma en cuenta la influencia del cloruro atrapado ni la de otros iones. Otros modelos basados en la ecuación de Nernst-Planck han sido propuestos para tomar en cuenta la influencia de otros iones que pueden estar presentes en la solución de poro, pero esto generalmente incrementa la complejidad del modelo y requiere información adicional que normalmente no está disponible (Stanish, 2004).

Para resolver este problema se recurre a técnicas numéricas como el Método de Diferencias Finitas (MDF) y el Método de Elementos Finitos (MEF), los cuales son los esquemas numéricos más tradicionales para resolver Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP's) como es el caso de la ecuación de Nernst-Planck (Presuel-Moreno, 2004). Estos métodos en el pasado han mostrado buenos resultados de tal forma que en la actualidad se siguen usando, pero existe el inconveniente de que estos métodos requieren de un proceso de mallado en el dominio del problema para encontrar una solución aproximada. Esto requiere de un mayor costo computacional ya que el

mallado es considerado como el cuello de botella en estos métodos debido a que se consume alrededor del 70% del tiempo de procesamiento en la generación del mallado. Con el fin de reducir el tiempo de procesamiento han surgido nuevos métodos numéricos conocidos como métodos meshless o métodos libres de malla. Con estos métodos se elimina el proceso de mallado y se intercambia por la colocación de unos cuantos nodos dispersos en la frontera y el dominio del problema. Dentro de estos métodos se encuentran los métodos de Funciones de Base Radial (FBR) (La Rocca, 2005) y el Método de Solución Fundamental (MSF)(Yan, 2013).

Método de Funciones de Base Radial

El método de funciones de base radial (FBR) es una versión generalizada del método multicúbico (MQ) desarrollado en 1986 por Hardy. Hardy desarrolló el método MQ para resolver un problema de cartografía. Es decir, dado un conjunto escaso de medidas dispersas de algunos puntos fuente en una superficie topográfica (e.g. medidas de elevación del parque nacional de las montañas rocosas), construir una función continua satisfactoria que represente la superficie.

Dado un conjunto de puntos $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ con $x_i \in R^d$ y sus correspondiente valores $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_N)$ con $f(x_i) \in R$ siendo $f: R^d \rightarrow R$. El problema de interpolación multivariada con nodos distribuidos de manera no uniforme consiste en determinar una función continua o suficientemente diferenciable $s: R^d \rightarrow R$ tal que

$$s(x_i) = f(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Para resolver el problema anterior se supone que la función s es una combinación lineal de funciones de base radial

$$s(x) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\|x - x_j\|), \quad x \in R^d \quad (7)$$

Donde $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_N]^T$ es el vector de incógnitas, ϕ corresponde a la función radial y $\|\cdot\|$ denota la norma euclidiana.

El sistema matricial resultante de la ecuación (7) queda expresado como

$$\begin{pmatrix} \phi(\|x_1 - x_1\|) & \dots & \phi(\|x_1 - x_N\|) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(\|x_N - x_1\|) & \dots & \phi(\|x_N - x_N\|) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x_1) \\ \vdots \\ f(x_N) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Escribiendo en una forma más compacta

$$A\lambda = f \quad (9)$$

Donde $A_{i,j} = \{\phi(\|x_i - x_j\|)\}_{i \leq i, j \leq N}$ en $R^{N \times N}$ y $f, \lambda \in R^N$. Para determinar la solución del sistema lineal de ecuaciones (9) requerimos que la matriz A sea no singular, y los coeficientes quedan determinados por

$$\lambda = A^{-1}f \quad (10)$$

Una vez calculados los coeficientes λ el siguiente paso es interpolar sobre los puntos en los cuales se desea obtener la solución (Grady, 2003).

Para problemas dependientes del tiempo se resuelve el siguiente problema de interpolación:

$$\ddot{u}(x, t) = \sum_{j=1}^N \lambda_j(t) \phi(\|x - x_j\|), \quad (11)$$

Donde los coeficientes $\lambda_j(t)$ ahora dependen del tiempo. De este modo se puede dar solución a Ecuaciones Diferenciales Parciales EDP's dependientes del tiempo, como el caso de la ecuación de Nernst-Planck. Aquí se discretiza el espacio mediante FBR y posteriormente se avanza el problema en el tiempo mediante un integrador numérico, como el método de Euler o los métodos de Runge-Kutta para Ecuaciones Diferenciales Ordinarias EDO's este método es conocido como

el método de líneas, ya que se convierte la EDP en una EDO en donde los coeficientes de interpolación se van determinando en cada paso del tiempo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se desarrollaron códigos en computadora usando el software MATLAB 2007 en donde se usó el esquema numérico de Funciones de Base Radial con núcleo Multicuadrado (FBR MQ) para resolver la ecuación de Nernst-Planck en estado no estacionario para simular el transporte de iones en una prueba de migración a través de una muestra de concreto de 35mm de espesor y 100mm de diámetro colocada entre dos reservorios, uno con una solución 0.1 M de Cloruro de Sodio que sirve como cátodo y el otro reservorio conteniendo agua destilada el cual sirve como ánodo como se muestra en el esquema de la Figura 1 (Krabbenhoft, 2008).

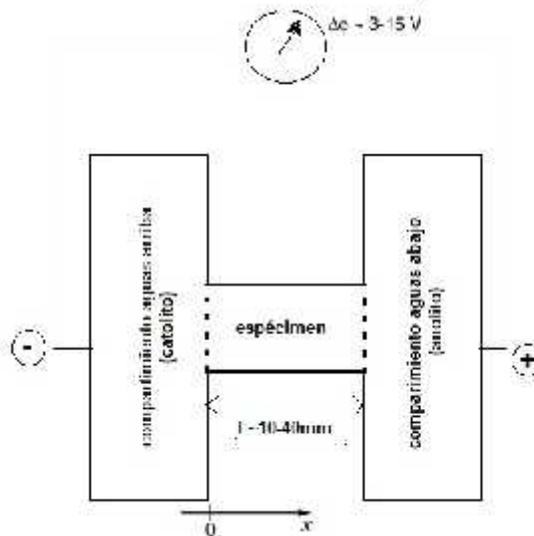


Figura 1. Prueba de migración de cloruros

Al aplicar una diferencia de potencial entre ambos compartimientos y luego aproximando el campo eléctrico como

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{\Delta\phi}{L} = \text{constante}$$

Donde L es la longitud de la muestra.

El flux de iones cloruro ($z = -1$) es dado por

$$j = -D \left(\frac{dc}{dx} - kc \frac{\Delta\phi}{L} \right)$$

Donde introducimos la constante $k = F/RT = 38.963V^{-1}$ (a 25 °C) y requiriendo la ecuación del balance de masa obtenemos la siguiente ecuación diferencial parcial lineal

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - Dk \frac{\Delta\phi}{L} \frac{\partial c}{\partial x}$$

Donde D es el coeficiente de difusión del ion cloruro en este caso se consideró como $D = 2.032E-10$ cuyo dato fue sacado de la literatura (Liu, 2012).

Si nombramos las constantes β y μ nos queda

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \beta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

Cuya ecuación corresponde a la ecuación de advección-difusión. Tanto los valores del término difusivo como el del término convectivo, caracterizan esta ecuación diferencial parcial. Definiendo el número de Péclet $P_e = \mu/\beta$, se observa que cuando el término difusivo domina, se obtiene un número de Péclet bajo y la ecuación es parabólica. Si consideramos en el compartimiento aguas arriba una determinada solución de cloruro de sodio y en el otro compartimiento agua destilada y considerando que ambos compartimientos son de profundidad infinita resulta en la solución analítica:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left(e^{ax} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + aDt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - aDt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right)$$

Donde C_0 es la concentración de superficie, t es el tiempo, $a = zF\Delta\phi/RT$ y erfc es la función de error complementaria.

Para resolver la ecuación de Nernst-Planck dependiente del tiempo se utilizó el núcleo radial multicuádrico para discretizar el espacio y el método de Euler para discretizar el tiempo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procede a resolver numéricamente por el método de FBR con núcleo multicuádrico el problema de migración de cloruros para una concentración de 0.1M de cloruro de sodio, una diferencia de potencial de 15 V, coeficiente de difusión $D=2.032E-10$, una longitud de la muestra de 35 mm y un incremento de tiempo de 1 segundo.

En la figura 3 se muestra el perfil de concentración de cloruro en un tiempo de 1 hora, considerando un parámetro de forma $c=200$ y un número total de nodos de $N=40$. Para este caso tenemos un número de Péclet de $1.6698E4$ lo cual es un valor alto, lo que indica que la ecuación está gobernada por el término convectivo, que en este caso queda dominado por la diferencia de potencial aplicado.

En la figura 4 se muestra la distribución del error obtenido entre la solución analítica y la solución aproximada mediante FBR MQ obteniéndose un error máximo absoluto de $6.9603E-4$.

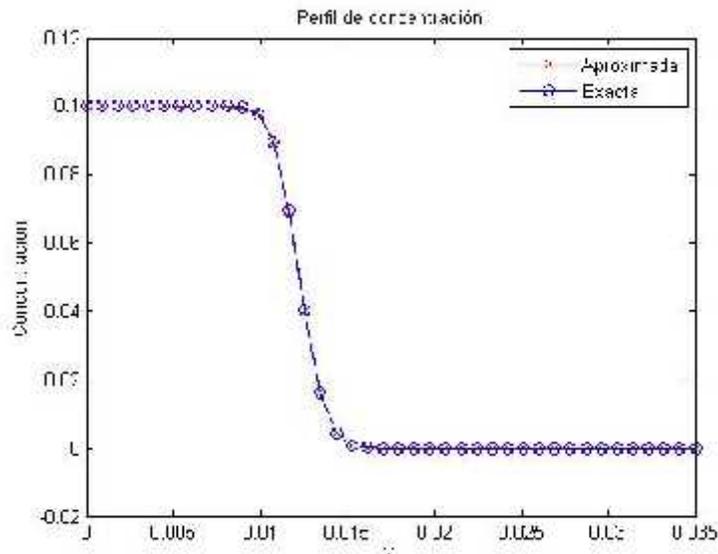


Figura 3. Comparación entre la solución aproximada y la solución analítica con un parámetro $c=200$ y $N=40$.

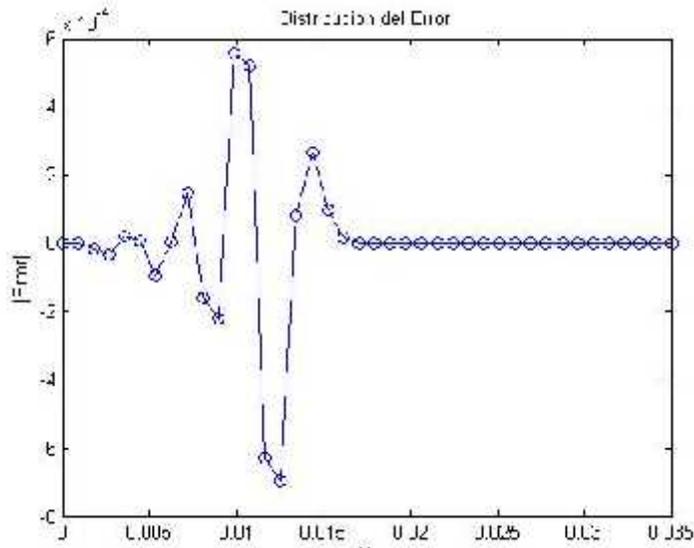


Figura 4. Distribución del error entre la solución aproximada y la analítica con un parámetro $c=200$ y $N=40$. Ahora veremos cómo varía la solución para diferentes niveles de tiempo. Usando los mismos parámetros de c y número de nodos, el resultado se ilustra en la figura 5, en donde se puede apreciar que a medida que pasa el tiempo la muestra va alcanzando la concentración del compartimento con la solución de cloruro de sodio.

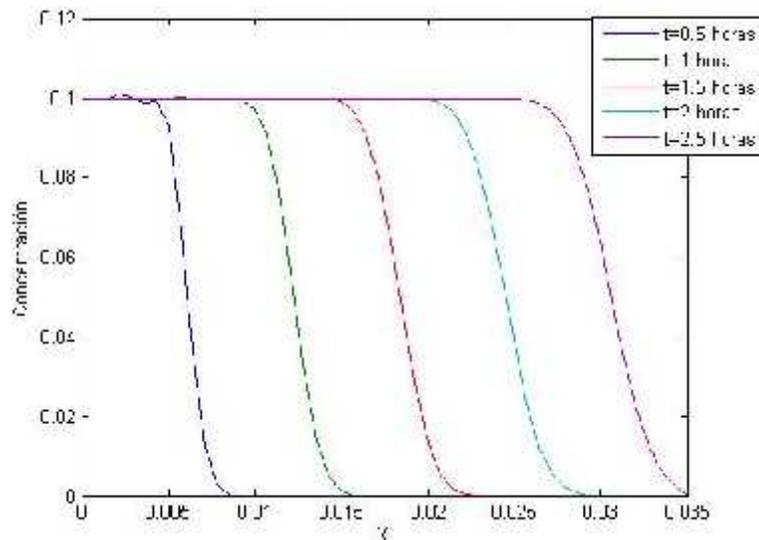


Figura 5. Perfiles de concentración a diferentes niveles de tiempo usando una diferencia de potencial de 15 V, $N=40$ y $c=200$.

Ahora analizaremos cómo se comporta la solución si decrece el número de Péclet, en este caso con una diferencia de potencial de 0.1 V. como se puede apreciar en la gráfica de la figura 6 se requiere de más tiempo para que la muestra se sature totalmente, esto es debido a que el termino difusivo es predominante.

Enseguida analizaremos el error máximo absoluto para diferentes número de Péclet considerando la solución numérica y exacta para un tiempo $t=5$ horas, un parámetro $c=200$ y $N=40$ nodos. El resultado se ilustra en la figura 7.

Como se puede observar en la figura 8 el error es menor si el número de Péclet es menor, esto se debe al cambio que se da en la solución al pasar de un estado predominantemente parabólico a uno predominantemente hiperbólico.

Para analizar la convergencia usaremos c-refinamiento considerando $N=40$ y variando el parámetro c y luego analizaremos la convergencia usando h-refinamiento en donde se dónde se mantendrá fijo el parámetro c y se variará el número de nodos en ambos casos usarán los parámetros de 15V y tiempo de solución $t=2$ horas.

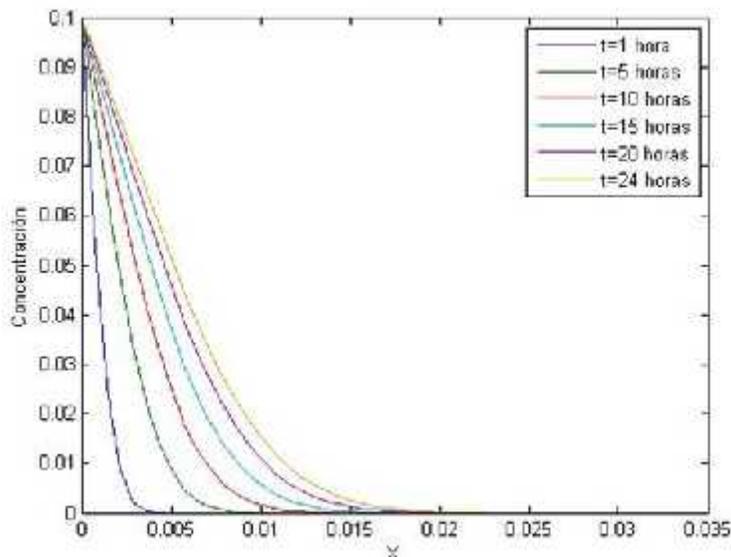


Figura 6. Perfil de concentración a diferentes tiempos usando una diferencia de potencial de 0.1 V.

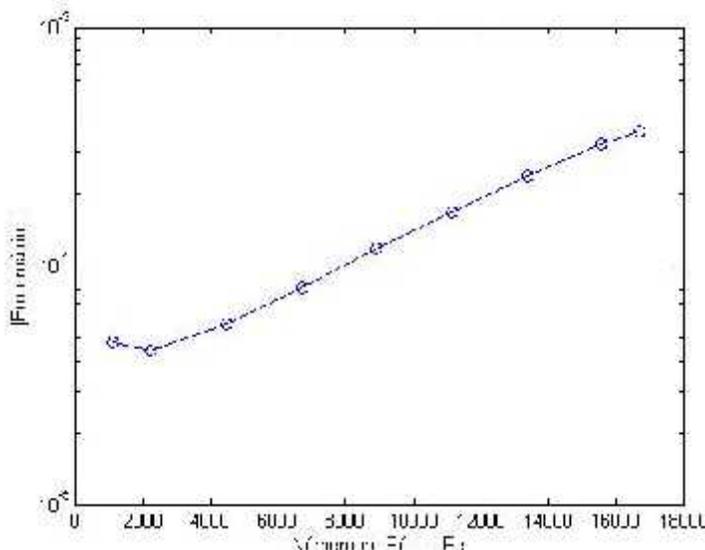


Figura 7. Error máximo absoluto para diferente número de Péclet.

En la figura 8 se observa la convergencia c-refinamiento en donde se observa que la ir incrementando el parámetro c el error decrece. Del mismo modo en la gráfica de la figura 9 se observa que la incrementar el número de nodos el error también decrece, para este caso se eligió

un parámetro de forma fijo de $c=200$. Con este ejemplo se vemos que con el método FBR MQ se puede resolver cualquier EDP dependiente del tiempo con una muy buena aproximación.

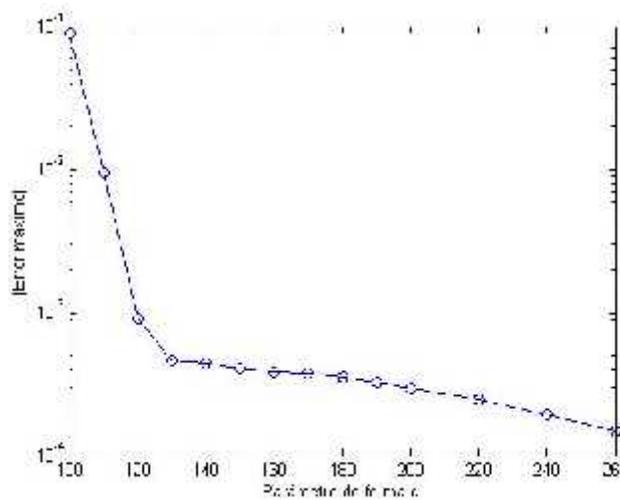


Figura 8. c-refinamiento variando el parámetro c con un número $N=40$ nodos con una diferencia de potencial de 15 V para un tiempo $t=2$ horas.

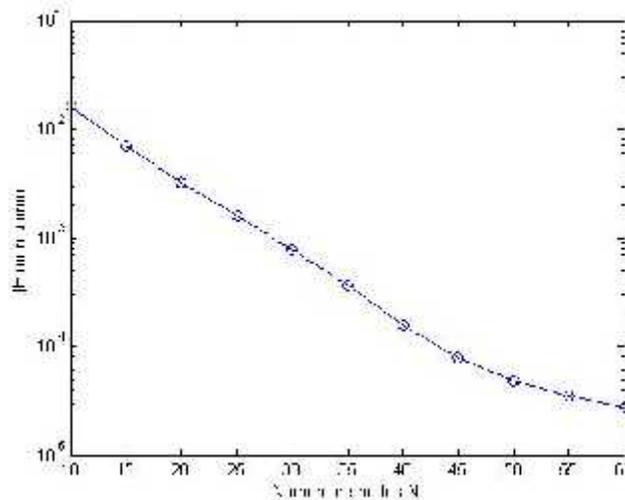


Figura 9. h-refinamiento variando el número de nodos con un parámetro de forma fijo de $c=200$ y una diferencia de potencial de 3 V para un tiempo $t=2$ horas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró que se puede resolver la ecuación de Nernst-Planck mediante Funciones de Base Radial con núcleo multicuadrático para el transporte de iones en el concreto. Cuyos resultados fueron muy similares a los obtenidos por solución analítica de dicha ecuación. Esto confirma que usando los métodos libres de malla como es el caso de FBR se puede dar solución a la Ecuación Diferencial Parcial que describe el transporte iónico a través del concreto.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada No. 417513, a la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Universidad de Guadalajara.

6. REFERENCIAS

- Conciatori, D., Laferrière, F., Brühwiller, E., (2010). Comprehensive modelling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state of real climate, *Cement and Concrete Research*, V. 40, pp. 109-118.
- Grady, B., (2003). *Radial Basis Functions: Numerical and Analytical Developments*, Universidad de Colorado, Departamento de matemáticas aplicadas.
- Krabbenhoft, K., Krabbenhoft, J., (2008). Application of the Poisson-Nernst-Planck equations to the migration tests, *Cement and Concrete Research*, V. 38, pp. 77-88.
- La Rocca, A., Power, H., (2005). Free mesh radial basis function collocation approach for the numerical solution of system of multi-ion electrolytes, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, V. 64, pp. 1699-1734.
- Li, L. Y., Xia, J., Lin, S. S., (2012). A multi-phase model for predicting the effective diffusion coefficient of chloride in concrete, *Construction and Building Materials*, V. 26, pp. 295-301
- Liu, Q. F., Li, L. Y., Easterbrook, D., Yang, J., Li, L. Y. (2012). Multi-phase modelling of ionic transport in concrete when subjected to an externally applied electric field, *Engineering Structures*, V. 42, pp. 201-212.
- Liu, Q. F., Xia, J., Easterbrook, D., Yang, J., Li, L. Y., (2014). Three-phase modelling of electrochemical chloride removal from corroded steel-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, V. 70, pp. 410-427.
- Lizarano, J. M., Claisse, P., (2009). Optimización de las propiedades de transporte iónico del concreto y simulación del ensayo ASTM C1202, *Dyna*, V. 160, pp. 185-194.
- Presuel-Moreno, F., Liu, Y., Wu, Y. Y., (2013). Numerical modelling of the effects of rebar presence and or multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured via the Wenner method, *Construction and Building Materials*, V. 48, pp. 16-25.
- Stanich, K., Hooton, R. D., Thomas, M.D.A. (2004). A novel method for describing chloride ion transport due to an electric gradient in concrete: Part 1. Theoretical description. *Cement and Concrete Research*, V. 34, pp. 43-49.
- Toumi, A., Francois, R., Alvarado, O. (2007). Experimental and numerical study of electrochemical chloride removal from brick and concrete specimens, *Cement and Concrete Research*, V. 37, pp. 54-62.
- Truc, O., Olliver, J. P., Nilsson, L. O. (2000). Numerical simulation of multi-species transport through saturated concrete during a migration test-MsDiff code, *Cement and Concrete Research*, V. 30, pp. 1581-1592.
- Wang, Y., Li, L. Y., Page, C. L. (2001). A two-dimensional model of electrochemical chloride removal from concrete, *Computational Materials Science*, V. 20, pp. 196-212.
- Yan, L., Yang, F. (2013). A Kansa-type MFS scheme for two-dimensional time fractional diffusion equations, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, V. 37, pp. 1426-1435.
- Yoon, S., Oh, S. G., Ha, J., Monteiro, J. M. (2012). The effects of surface treatments on rapid chloride permeability tests, *Materials Chemistry and Physics*, V. 135, pp. 699-708.

Desempeño anódico de pastas de cemento conductor con fibras de carbono tratadas de forma térmica

M. A. Flores Cortez¹, R. E. Núñez Jaquez^{1*}, C. P. Barrios Durstewitz¹, M. S. Flores Cortez¹, J.H. Castorena González¹

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N Fracc. Las Fuentes, C.U. Los Mochis, Sinaloa, México.

RESUMEN

Los materiales cementantes conductores (PCC) están dentro de los materiales multifuncionales, la conductividad se da mediante la adición de fibras de carbono. Se han utilizado diferentes tratamientos superficiales para mejorar la débil unión entre la fibra y la matriz de cemento mejorando así las propiedades del compuesto. El tratamiento más común implica la oxidación, formando grupos funcionales que contienen oxígeno en la superficie. Se aplicó un tratamiento térmico en aire. Se realizó una caracterización electroquímica a las fibras tratadas superficialmente en una solución de poro y posteriormente se elaboraron pastas de cemento con dichas fibras. Las pastas de cemento conductoras y las fibras tratadas fueron evaluadas mediante las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y voltametría cíclica (CV) y se realizaron mediciones de potenciales y resistividades de las muestras de PCC.

Palabras clave: Fibra de carbono, Tratamiento superficial, Caracterización electroquímica, EIS, CV.

Autor de contacto: , R. E. Núñez Jaquez (dr.rnunez@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el control de la corrosión: protección catódica, realcalinización y extracción electroquímica (Pérez, 2010). Estas técnicas se caracterizan por aplicar una polarización catódica al acero de refuerzo en un rango de 20 mA/m^2 a 1 A/m^2 , para lograr esto se requiere de la instalación de un electrodo auxiliar que cumpla la función de ánodo. Los materiales que generalmente se emplean para esta aplicación como ánodos son: aleaciones de hierro, magnesio, aluminio o zinc, como también mallas de titanio activado (Pourgharibshahi, 2014), dichos materiales resultan costosos, por ello se ha propuesto el empleo de pastas de cemento conductoras (PCC) como ánodos debido al bajo costo de los materiales y mejor compatibilidad con el concreto (Jing, 2010). En los materiales cementantes conductores, la conductividad eléctrica se da mediante la adición de fibras conductoras como las de carbono en la mezcla. Para mejorar la unión entre las fibras y la pasta de cemento se han aplicado diferentes tratamientos superficiales (TS). El tratamiento superficial más común implica la oxidación, formando grupos funcionales que contienen oxígeno (Sánchez, 1991). La oxidación se puede conseguir mediante tratamiento térmico en aire, oxígeno (O_2), ozono (O_3), tratamiento químico (por ejemplo, ácido nítrico), oxidación anódica y tratamiento de plasma. (Jing, 2010).

Gomis et al. (Gomis, 2015) Encontraron un tratamiento con ozono a la fibra de carbono para aumentar la concentración de oxígeno en la superficie y cambiar oxígeno en la superficie de C-O a C=O, aumentando el grado de dispersión de las fibras en la pasta de cemento. Cañón et al. (Cañón, 2013) Aplicaron una pasta de cemento conductor como un ánodo en la técnica de extracción electroquímica de cloruros con una eficiencia similar a un ánodo convencional. Százdi et al. (Százdi, 2002) demostraron que la superficie de fibras de carbono oxidadas electroquímicamente tuvo un aumento de la superficie oxigenada, debido principalmente a la formación de grupos funcionales carboxilo (COOH) o éster (COOR). Florian et al. (Florian, 2003) En compuestos reforzados con fibras de carbono observaron la oxidación de este material a temperaturas arriba de los $400 \text{ }^\circ\text{C}$, presentando un rango de temperaturas de 400 a $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

La mayoría de los tratamientos superficiales en las fibras se han desarrollado para matrices poliméricas. Poca atención se le ha dado previamente al tratamiento de la superficie de las fibras de carbono para la matriz de cemento (Ma, 2013).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.1. Tratamiento superficial a la fibra de carbono

Se tomó la fibra de carbono y se le aplicó el tratamientos superficial: un tratamiento térmico en aire. El tratamiento térmico se aplicó en un horno a una temperatura de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ durante una hora

1.2. Caracterización a la fibra con tratamiento

Previo al tratamiento superficial se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la temperatura a la cual se llevó a cabo el tratamiento térmico. Se tomó una muestra de la fibra con tratamiento para verificar la oxidación de la fibra mediante la técnica de espectroscopia de infrarojo (IR) y la fibra natural para observar .

1.3. Caracterización electroquímica

1.3.1. Preparación de Electroodos

Para la evaluación electroquímica de las fibras, se elaboraron probetas cilíndricas de una pulgada de diámetro, exponiendo la fibra en la cara inferior ocupando toda el área y por el otro extremo el contacto de la fibra.

Los ánodos de pasta de cemento conductora (PCC) primeramente se realizó el diseño de mezclas y posteriormente se elaboraron las probetas las cuales fueron hechas de cemento CPC 30R, agua destilada y las fibras tratadas superficialmente, se fabricaron de forma cilíndrica con un diámetro de dos pulgadas y una altura de 8 cm, se colocó un electrodo de grafito de un cuarto de pulgada y 10 cm de longitud, embebiendo 7 cm en el centro de la probeta y dejando expuesto 3 cm como contacto.

En la Tabla 1 se muestra la nomenclatura que se le dio a cada una de las muestras a analizar, esto dependiendo de las 3 variables como lo son: tratamiento superficial a la fibra (térmico y natural: como se recibió la fibra), el % de fracción volumétrica de fibra de carbono y la densidad de corriente anódica aplicada.

Tabla 1 Nomenclatura de las muestras.

Clave	Tratamiento	% vol. de fibra de carbono	Densidad de corriente mA/cm ²
N1-0	Natural	1	0
T1-0	Térmico		
N0.6-0	Natural	0.6	100
T0.6-0	Térmico		
N1-100	Natural	1	500
T1-100	Térmico		
N0.6-100	Natural	0.6	1000
T0.6-100	Térmico		
N1-500	Natural	1	1000
T1-500	Térmico		
N0.6-500	Natural	0.6	1000
T0.6-500	Térmico		
N1-1	Natural	1	1000
T1-1	Térmico		
N0.6-1	Natural	0.6	1000
T0.6-1	Térmico		

1.3.2. Caracterización electroquímica

Las mediciones se realizaron en una celda electroquímica de tres electrodos: de trabajo, de referencia y auxiliar, nuestro electrodo de trabajo son las probetas de PCC y las probetas unicamente de fibra, como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de calomel y como electrodo auxiliar fue una malla de titanio activado para el caso de las probetas de PCC y una barra de grafito para el caso de las probetas unicamente de fibra, el electrolito utilizado fue una solución saturada de hidróxido de calcio.

Las utilizaron las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y voltametría cíclica (CV), los parámetros en las técnicas fueron: para EIS una amplitud de 100 mV, un barrido de frecuencias de 100 KHz a 0.1 Hz con 60 puntos. Para CV los parámetros fueron: -1000 a 1000 mV el barrido de potencial y una velocidad de barrido de 200 mV/s. La evaluación de la fibra de carbono por CV se llevo acabo en una solución 6 mM de ferrocianuro de potasio $[K_3Fe(CN)_6]$ como especie electroactiva y el electroilto de soporte una solución 1M de nitrato de potasio.

1.4. Polarización de las muestras de PCC

El arreglo experimental utilizado para someter a una polarización anódica los especimnes de pasta de cemento conductor se puede observar en la figura 1, como cátodos se utilizaron láminas de acero inoxidable, se conectó cada espécimen por medio del contacto de grafito a una caja de resistencias conectado a una fuente de poder en la salida positiva y las láminas de acero conectadas a la salida negativa, se vertió el electrolito el cual consistio de una solución saturada de hidróxido de calcio. Las densidades de corriente que se aplicaron fueron de 0 mA/m², 100 mA/m², 500 mA/m² y 1000 mA/m². El tratamiento anodico se aplico durante 50 días.

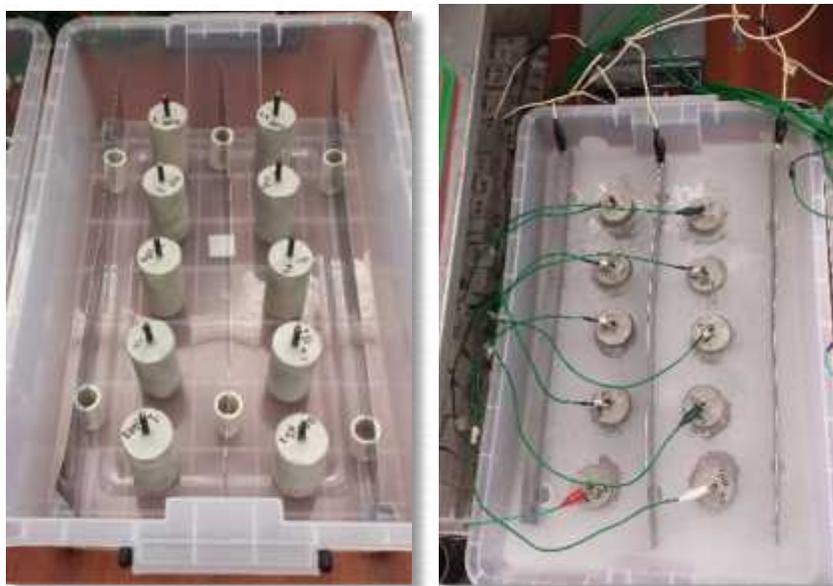


Figura 1. Arreglo experimental.

1.5. Mediciones de Potenciales y conductividades de las muestras

1.5.1. Potenciales

Los potenciales en las muestras fueron tomados durante la polarización que se aplicó a las muestras, la medición se llevo a cabo con un multímetro digital colocando la terminal positiva en el contacto de las muestras (electrodo de grafito) y la terminal negativa a un electrodo de referencia de calomel saturado el cual era introducido en la solución que contenía a las muestras.

1.5.2. Conductividades

Las obtener las conductividades de las muestras se llevo a cabo primeramente la medición de las resistividades aparentes de cada una de ellas mediante la técnica de las cuatro puntas, se obtuvo un factor de forma para determinar las resistividades reales, posteriormente se calcularon las conductividades.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestra el termograma obtenido con el cual se determinó la temperatura a la que se aplicó el tratamiento térmico a la fibra de carbono, el termograma muestra un leve caída de masa y posteriormente un incremento, lo que nos indica que se está oxidando nuestra fibra, se observa que a una temperatura de 500 °C se da el mayor incremento de productos.

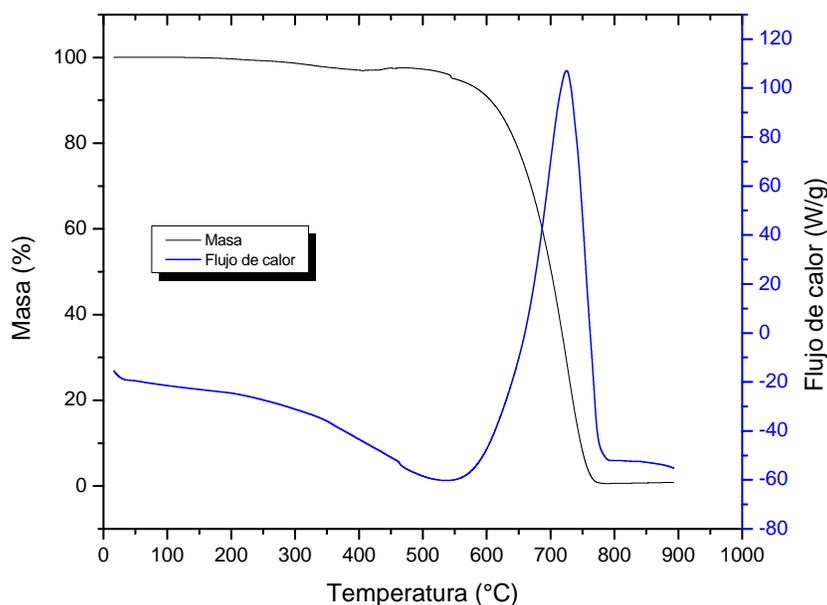


Figura 2. Termograma de la fibra de carbono para determinar temperatura de oxidación.

En la Figura 3 se muestran los espectros de infrarojo de la fibra sin tratamiento y con tratamiento superficial en los que se observan algunos cambios en las bandas características de la fibra sin tratamiento, con esto se logró verificar que la oxidación de las fibras se llevó a cabo, también se muestra una tabla en la que aparecen los diferentes grupos funcionales y su longitudes de onda que se presentaron en algunos de los casos.

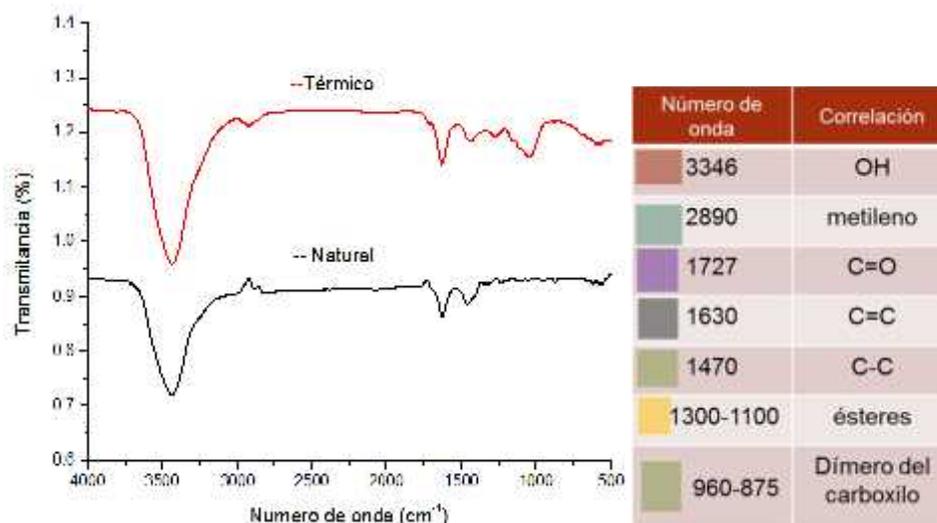


Figura 3. Espectros de infrarojo de la fibra con los diferentes tratamientos y grupos funcionales con sus respectivas longitudes de onda que se pudieron presentar en algunos de los casos.

En el voltagrama Figura 4 se puede apreciar como la fibra con el tratamiento térmico un mayor pico tanto para el pico de reducción y de oxidación debido al proceso que se llevan a cabo mediante esta técnica, el comportamiento que mostró la fibra tratada fue mejor que la fibra sin tratar, con esto se puede apreciar una mejor polarización.

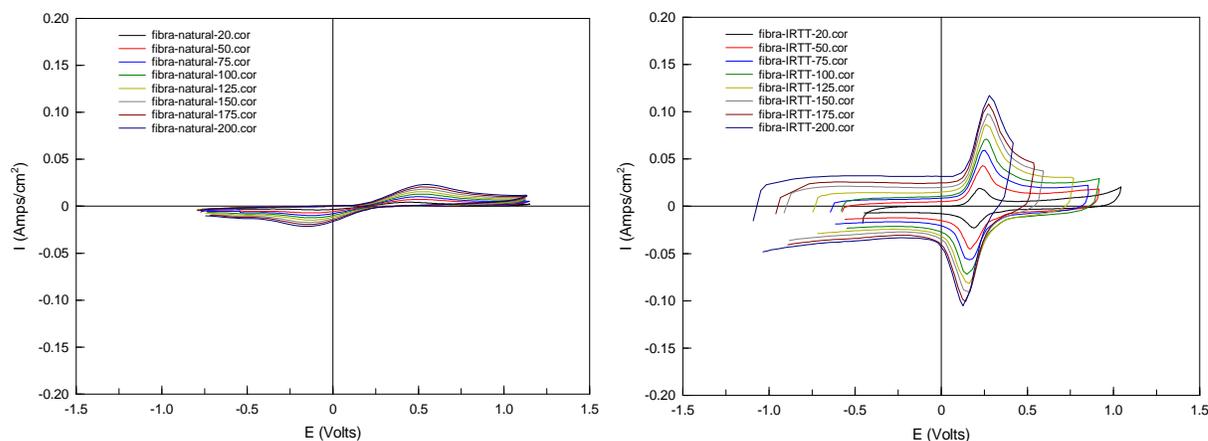


Figura 4. Voltagrama de las fibras natural (izq) y con tratamiento termico (der).

En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos mediante la voltametría cíclica para las fibras con los diferentes tratamientos aplicados en ella.

Tabla 2 Valores de voltametría cíclica (velocidad de barrido 200mV/s).

Tipo de tratamiento	Razón entre picos de corriente I_a/I_c	Separación de los picos E (mV)	k_s (cm/s)
Natural	1.09	700.26	irreversible
Térmico	1.12	152.87	0.0033

En las siguientes figuras se muestran las mediciones de EIS realizadas a los especímenes de PCC con los diferentes tratamientos y con dos fracciones de volumétricas de fibra, de 1 y 0.6 % durante el curado que se le dio a los especímenes, aplicando la técnica después del desmolde, a los 7, 14 y 28 días de curado, Figura 5 mediciones para la fibra sin tratamiento, A fibra con 1% de fracción volumétrica de fibra y B con el 0.6%. Figura 6 mediciones para la fibra con el tratamiento térmico, A fibra con 1% de fracción volumétrica de fibra y B con el 0.6%. Se observa la influencia del curado en las pastas, con ello se logra ver que el curado no tiene mucha influencia, solo en algunos de los casos se presenta un ligero cambio, pero este no es muy significativo.

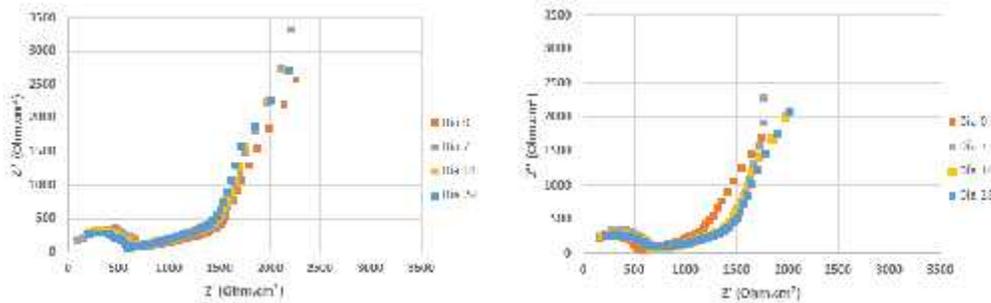


Figura 5. Fibra sin tratamiento, (izq.) 1% de fracción volumétrica de fibra y (der.) con 0.6%

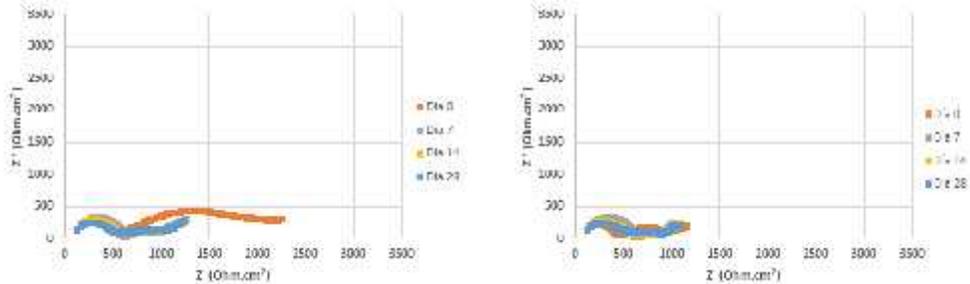


Figura 6. Fibra con tratamiento térmico, (izq.) 1% de fracción volumétrica de fibra y (der.) con 0.6%

En las siguientes figuras se muestran los graficos de los potenciales y las corrientes de las muestras de PCC respecto al tiempo de exposición en los diferentes niveles de potencial y fracción de volumen de fibra de carbono, Figura 7 se muestran los potenciales de las muestras sin polarizar, en la Figura 8 se muestran los potenciales y corrientes en las muestras con una polarización de 100 mA/m², Figura 9 potenciales y corrientes de las muestras en una polarización de 500 mA/m² y en la Figura 10 se muestran los potenciales y corrientes de las muestras a una polarización de 1000 mA/m².

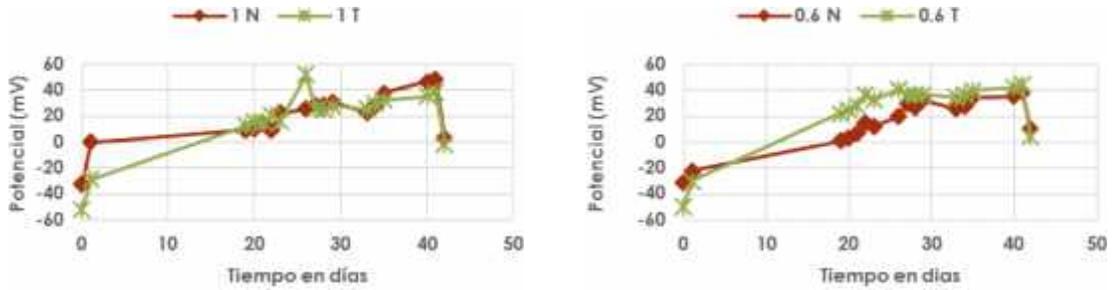


Figura 7. Potenciales de las muestras de PCC sin polarizar.

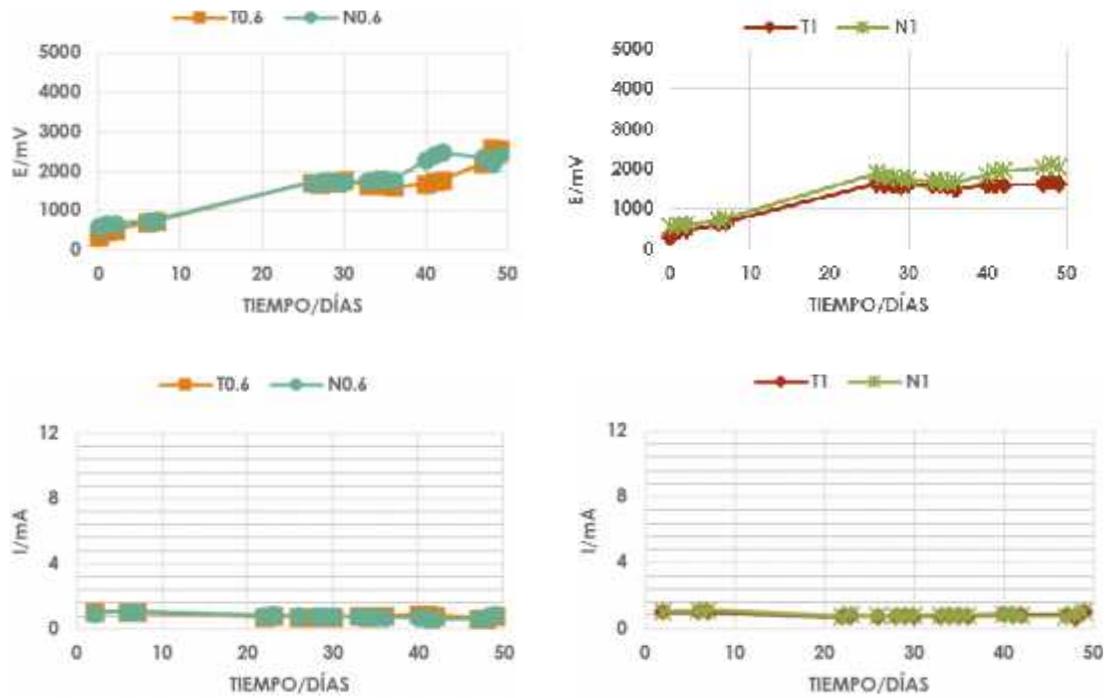
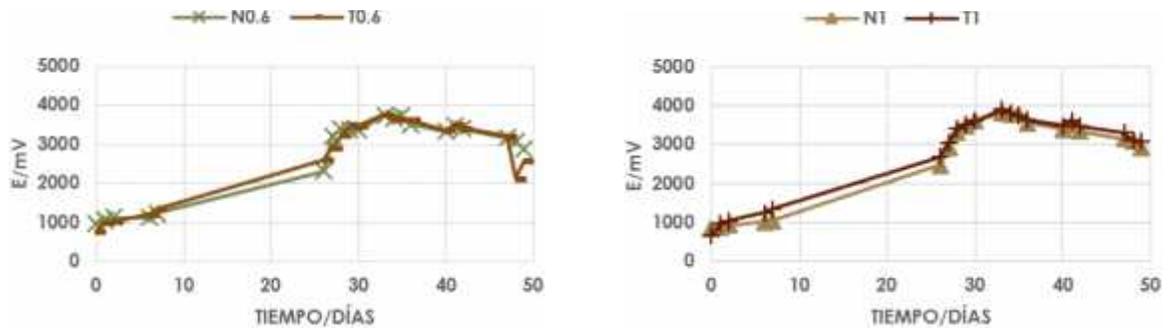


Figura 8. Potenciales y corrientes de las muestras de PCC con polarización de 100 mA/m².



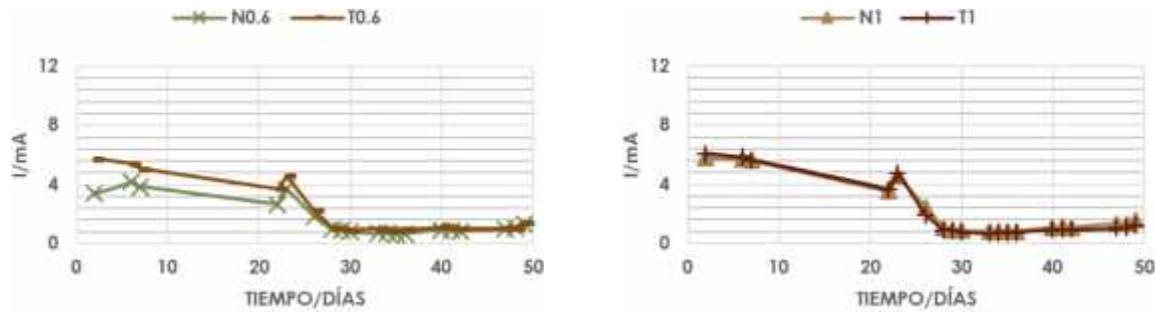


Figura 9. Potenciales y corrientes de las muestras de PCC con polarización de 500 mA/m².

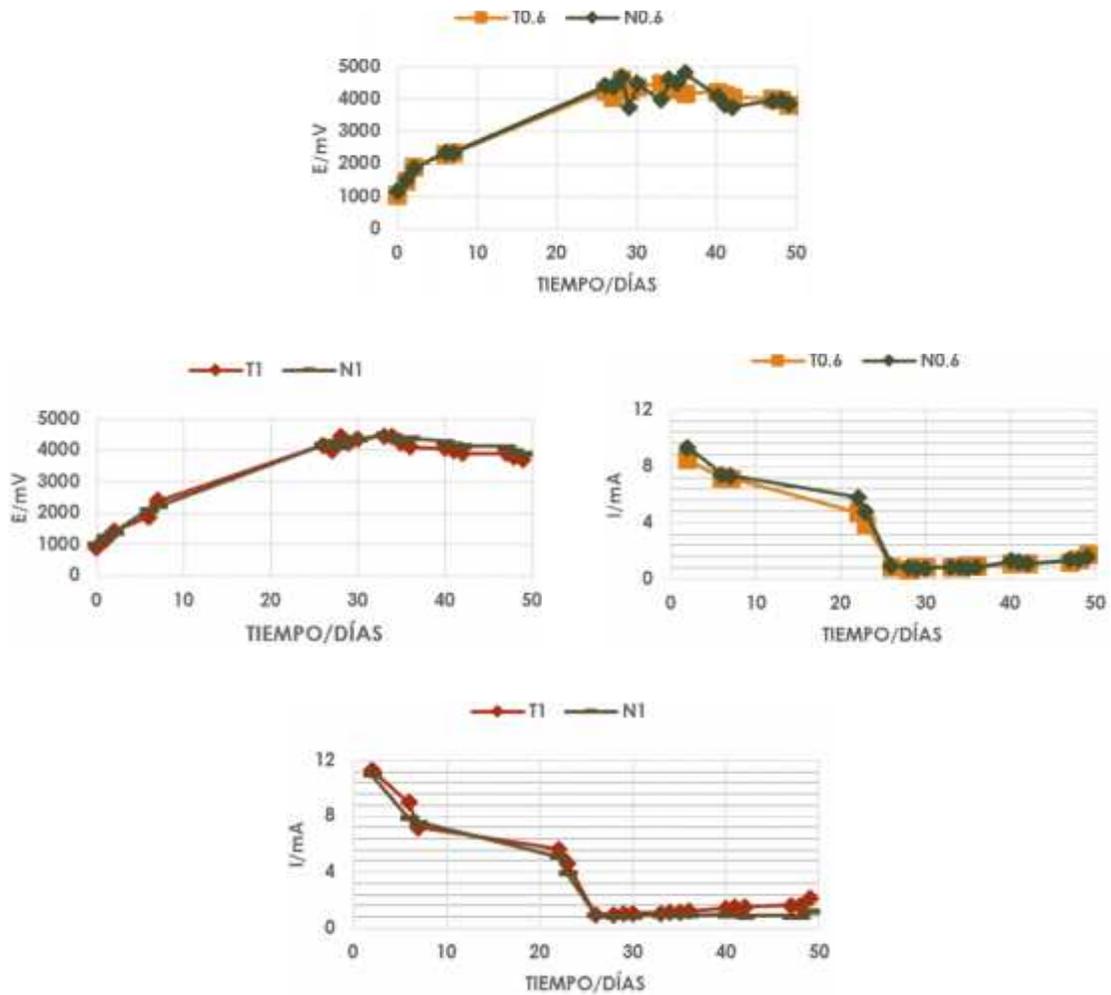


Figura 10. Potenciales y corrientes de las muestras de PCC con polarización de 1000 mA/m².

En la Tabla 3 se presentan los valores de conductividad después de los 50 días de tratamiento anódico de cada una de las muestras. Las mediciones se realizaron mediante la técnica de las cuatro puntas.

Tabla 3 Conductividades electricas de las pastasa de cemento.

Muestra	Conductividad eléctrica(mS/m)			
	J (mA/m ²)			
	0	100	500	1000
N1	239.5058	1.3281	1.2174	0.8594
N0.6	298.1603	2.0291	1.4609	1.2174
T1	251.8940	1.8493	0.8594	1.4609
T0.6	317.6055	2.3950	1.1238	2.0871

4. CONCLUSIONES

Se logró modificar la superficie de la fibra mediante los tratamientos químicos superficiales aplicados, observando mediante los espectros de infrarojo el incremento de la intensidad y la aparición de algunas bandas, presentando una mayor modificación en su superficie la fibra con el tratamiento térmico. Por lo tanto se obtuvo un comportamiento distinto en cada una de ellas.

La resistencia no se ve modificada en el curado que se aplicó a las pastas, por lo que el curado no tiene mucha influencia sobre las pastas, por lo que las PCC podrían aplicarse sin ninguna clase de curado sobre ellas.

Durante la polarización las muestras se volvieron mas resistivas al aumentar el potencial y disminuir el paso de corriente, debido a la posible formación de nuevas fases y reacciones que se llevaron a cabo dentro de los especímenes.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero para la realización de esta investigación mediante el proyecto de Ciencia básica con clave CB-2012-183747..

6. REFERENCIAS

- [1] A. Pérez, M. A. Climent, and P. Garcés, “Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete using a conductive cement paste as the anode,” *Corros. Sci.*, vol. **52**. Pp. 1576–1581., (2010).
- [2] M. Pourgharibshahi and M. Meratian, “Corrosion morphology of aluminium sacrificial anodes,” *Mater. Corros.*, vol. **65**: pp. 1188–1193., (2014).

- [3] X. U. Jing and Y. a O. Wu, "Conductive Mortar as Anode Material for Cathodic Protection of Steel in Concrete," *Wuhan Univ. Technol.*, pp. 883–888., (2010).
- [4] M. L. Sánchez Paradela and V. Sánchez Gálvez, "Comportamiento A Tracción De Cementos Reforzados Con Fibras De Vidrio," *Inf. construcción*, **vol. 43**. (1991).
- [5] J. Gomis, O. Galao, V. Gomis, E. Zornoza, and P. Garcés, "Self-heating and deicing conductive cement . Experimental study and modeling," *Constr. Build. Mater.*, **vol. 75**, pp. 442–449, (2015).
- [6] A. Cañón, P. Garcés, M. A. Climent, J. Carmona, and E. Zornoza, "Feasibility of electrochemical chloride extraction from structural reinforced concrete using a sprayed conductive graphite powder-cement paste as anode," *Corros. Sci.*, **vol. 77**, pp. 128–134, (2013).
- [7] L. Százdi, J. Gulyás, and B. Pukánszky, "Surface characterization of electrochemically oxidized carbon fibers: surface properties and interfacial adhesion," *Compos. Interfaces*, **vol. 9**, pp. 219–232, (2002).
- [8] M. Florian and J. C. Bressiani, "Kinetic study by TGA of the effect of oxidation inhibitors for carbon Á carbon composite," *Mater. Sci. Eng.*, **vol. 358**, pp. 298–303, (2003).
- [9] Y. J. Ma, J. L. Wang, and X. P. Cai, "The Effect of Electrolyte on Surface Composite and Microstructure of Carbon Fiber by Electrochemical Treatment," *int. J. Electrochem. Sci.*, **vol. 8**, pp. 2806–2815, (2013)

Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones parciales de metacaolín y ceniza de bagazo de caña.

Expositor: S.C. Arguello Hernández¹, Responsable: W. Martínez Molina¹, E. M. Alonso Guzmán¹, H. L.

Chávez García¹, C. Lara Gómez¹, C. Bernabé Reyes¹, M. Arreola Sánchez¹, J.I. Escalante García²

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México. E-mail: sandy_360_7@hotmail.com

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México. e-mail: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

1. RESUMEN

Reducir sensiblemente el problema de la huella de carbono, para lograr un ahorro energético y una menor afectación al ambiente. Las sustituciones a morteros base cemento Portland (CP), se realizaron para mejorar mediante una dosificación, sus propiedades físico-mecánicas; la base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Puzolánico” en el cemento. Los morteros se sometieron a pruebas destructivas: compresión, tensión, flexión y adherencia; así como no destructivas: velocidad de pulso ultrasónico (vp), resistividad eléctrica (r), densidad (d) y gravedad específica (ge). Las edades de prueba fueron 14, 28, 45, 90 y 180 días. Primero se comparó los resultados de las sustituciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso de la masa de CP con respecto a un mortero CONTROL (cemento-arena-agua) (ASTM C-109 , 2002). Se elaboró un estudio comparativo del empleo de pruebas destructivas y no destructivas para predecir el comportamiento mecánico del mortero. Dichas correlaciones se hicieron con el algoritmo LARS, el cual nos proporciona las variables de acuerdo a su orden de importancia. En las sustituciones de metacaolín (MK) y ceniza de bagazo de caña (CBC), 15 y 20% se incrementa las propiedades mecánicas (Arguello Hernández, 2012). Las pruebas de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, nos indican de manera indirecta la porosidad del material (Chávez García , 2011) y fueron los parámetros de mayor importancia en la predicción del comportamiento del mortero a través de correlaciones.

Palabras clave: Morteros, sustituciones, puzolanas, correlaciones.

2. OBJETIVOS:

Diseñar, elaborar y evaluar en una mezcla de mortero la incorporación de materiales puzolánicos como un sustituto parcial del cemento portland, sus propiedades físico-mecánicas, correlacionando los resultados de las pruebas destructivas con las no destructivas por medio de un modelo matemático para predecir la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura del mortero estudiado, a partir de los datos de las pruebas no destructivas aplicadas en este trabajo. Especificar los ensayos de acuerdo a su importancia al momento de hacer las correlaciones, así mismo el % de confiabilidad de cada correlación. Obtener el % óptimo a sustituir para cada uno de los materiales.

3. INTRODUCCIÓN

La protección del medio ambiente ha sido de gran importancia en los últimos años. El empleo de cemento involucra una contaminación hacia el medio, un sorpresivo 5% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo son producidas por esta industria, sin embargo, no existe otro material con las características del cemento para el área de la construcción, es el ligante universal por excelencia, por lo que su producción es indispensable para satisfacer la demanda de la población. Surge la necesidad de disminuir los efectos negativos que produce el uso del cemento. Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto (Águila et al, 2008).

La base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Puzolánico” en el cemento. Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento Portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

El mortero se puede definir como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland y otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecer presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto (Sánchez de Guzmán, 2006). Una manera de reducir el consumo de cemento en la elaboración de los morteros es sustituir parte de este, por diferentes materiales, para la presente investigación: Metacaolín y ceniza de bagazo de caña.

De los ensayos realizados, de acuerdo a su naturaleza se clasifican en: No Destructivas y

Destructivas; las primeras se realizan a los materiales, para determinar cierta característica física, mecánicas o química del material en cuestión y no alteran de forma permanente sus propiedades, ya sean éstos: metales, plásticos (polímeros), cerámicos o compuestos; se tiene la posibilidad de repetir un sin número de veces la prueba, y por tanto, de reducir el número de las muestras, pero además posibilitan para realizar un análisis estadístico confiable, los reglamentos vigentes hablan de 30 especímenes, los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada. En esta investigación las pruebas no destructivas fueron: velocidad de pulso,

resistividad eléctrica, densidad y gravedad específica.

En el caso de las pruebas destructivas permite determinar el parámetro a medir mediante la rotura de probetas: cubo-compresión simple (NMX-C-083-2004), prisma-flexión (ASTM-C-348-97), briqueta-tensión y losa revestida para realizar la prueba de adherencia (ASTM-C-1583-04). El comportamiento de un mortero frente a los distintos esfuerzos es variable y complejo.

Los modelos de regresión multi-variable pueden ser implementados más fácilmente y además la estadística del modelo puede proveer información de cómo cada variable influye en la predicción (Chávez, 2011). El modelo seleccionado, LARS, está dentro de los modelos de regresión multivariable, su algoritmo nos proporciona las variables de acuerdo a su orden de importancia, esto lo determina gracias a que cuando obtiene la predicción de un espécimen usa los datos de todos los especímenes restantes que tiene para obtener dicha predicción, esto le permite definir que variables son más importantes que otras en la predicción.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Estudio de los materiales:

En primer lugar, se tamizó la arena, proveniente del río Huajúbaro perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán, México, entre las mallas 16 y 30, se verificó su calidad.

Los materiales de sustitución CBC, y MK fueron caracterizados mediante pruebas de tamaño de partícula, análisis en el MEB para determinar la morfología de partícula y por fluorescencia de rayos X (FRX, Tabla 1) en que se determinó la composición química.

Tabla 1. Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X.

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	TOTAL	SO ₃
MK	49.75	1.53	44.71	0.51	0.01	0.16	0.04	0.23	0.14	0.03	0.77	97.89	
CBC	60.04	0.43	6.83	3.15	0.13	1.83	1.64	0.45	1.86	0.79	23.6	100.14	
30 R RS	27.93	0.2	6.44	2.22	0.08	1.3	49.77	0.67	1.26	0.12	5.12	95.11	3.37

La ceniza de bagazo de caña (CBC) se obtuvo del ingenio azucarero localizado en el municipio de Taretan, en el estado de Michoacán, Ilustración 1. El tratamiento al que se sometió fue de secado y cribado, utilizando las partículas que pasan la malla ASTM No. 200 (0.074 mm) para la elaboración del mortero.

El metacaolín (MK) utilizado para la investigación se obtuvo de un proceso industrializado, adquirido en sacos de 50 kg.



Ilustración 1 Obtención de la ceniza de Bagazo de caña.

Etapa preliminar

La consistencia normal (CN) de una pasta se obtiene cuando al agregar un porcentaje de agua, respecto a la cantidad de cementante seco (cemento o cemento + adición), se obtiene una penetración de 10 ± 1 mm en la pasta de cemento utilizando la aguja de 1mm del aparato de Vicat, (NMX-C 057, 2010).

Tiempos de fraguado es mediante la utilización del Aparato de Gillmore. El tiempo de fraguado inicial es el tiempo transcurrido desde que se agrega el agua a la pasta hasta que la aguja de menor masa deja huella apreciable sobre la superficie. La determinación del tiempo de fraguado inicial sigue el mismo procedimiento utilizando la aguja con masa mayor (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011).



Ilustración 2 Método de mezclado mediante espas de acero.

(Cruz L., 2012), (NMX-C-085)

Elaboración y diseño de mezcla. El mezclado de los morteros se realizó en una cubeta de plástico de 19 litros, utilizando un taladro con potencia de 750w y 3500 RPM con accesorio de espas mezcladoras como se muestra en la ilustración 2. El tiempo de mezclado fue de 3 minutos, previo a la elaboración de los especímenes.

Se realizó la prueba de fluidez para determinar la cantidad de agua necesaria para obtener un valor de fluidez de $110\% \pm 5\%$ (ASTM C 109 M, 2002) La prueba de fluidez consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, sobre la mesa de fluidez; el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 20 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte

superior, después se le dan a ésta capa otros 20 golpes con el pisón, posteriormente se enrasa el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 25 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos.



Ilustración 3 Prueba de fluidez

La ilustración 3 muestra la realización del ensayo.

Se elaboraron los especímenes: cubos de 5cm de arista (ASTM C 109 M, 2002), prismas de 4x4x16cm y briquetas en forma de maní.

Se procedió a realizarse los ensayos No destructivos: velocidad de pulso ultrasónico (vp), resistividad eléctrica (r), gravedad específica (ge) y densidad (d).

Y los ensayos destructivos: compresión simple (ilustración 4), flexión (ilustración 5) y tensión

directa.



Ilustración 5 Espécimen colocado en la platina, para compresión simple. ASTM-C-109/2002.

Ilustración 4 Espécimen marcado a una pulgada y en el centro del claro, para flexión. ASTM C 348-97, 2002.



Posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento en las losas (ASTM-C-1583-2004), registrándose como carga de ruptura, también se observó y registró el tipo de falla (ilustración 6). Las fallas pueden ser de 4 tipos: A. En el sustrato. B. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento. C. En el material de reparación o revestimiento. D. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de

acero.

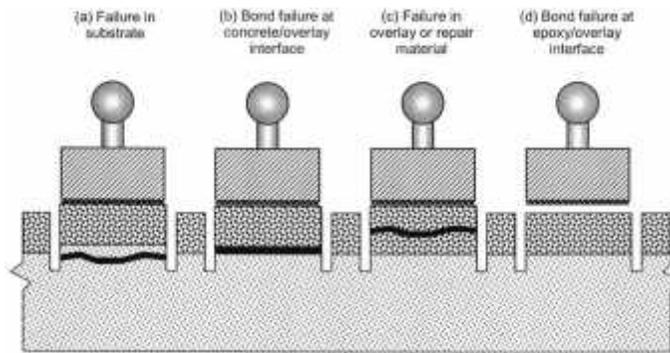


FIG. 3 Schematic of Failure Modes

Ilustración 6 Tipos de falla

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la etapa preliminar, en la tabla No. 2, se presentan los resultados de la consistencia normal y de los tiempos de Fraguado. La norma NMX-C-021 especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado, 90 min mínimo para fraguado inicial y 1080 máximo para fraguado final.

Finalmente se determinó un rendimiento de cementante de 0.47g/cm^3 . Con la prueba de fluidez se obtuvo una relación agua/cemento 1.01. La relación cemento/arena utilizada es 1:2.75, especificada en la norma (ASTM C 109 M, 2002).

Para morteros de albañilería sin adiciones la norma mexicana establece que la resistencia a compresión de los morteros a 7 días debe ser de 4.4 MPa, y de 7.8 MPa a 28 días, como mínimo en ambos casos (NMX-C-021-ONNCE., 2004). Los resultados de la resistencia a la compresión se muestran en la ilustración 7.

Tabla No. 2. Resultados de Consistencia Normal y Tiempos de Fraguado.

Materiales	Consistencia normal %	Tiempos de fraguado		
		Inicial (min)	Final (min)	
CONTROL	36	263	540	
MK	5%	36.00	155	502
	10%	39.00	161	506
	15%	43.00	164	537
	20%	45.00	182	564
	30%	52.00	191	623
CBC	5%	37.54	427	732
	10%	44.44	424	813
	15%	49.80	393	750
	20%	60.42	412	868
	30%	73.81	547	1016

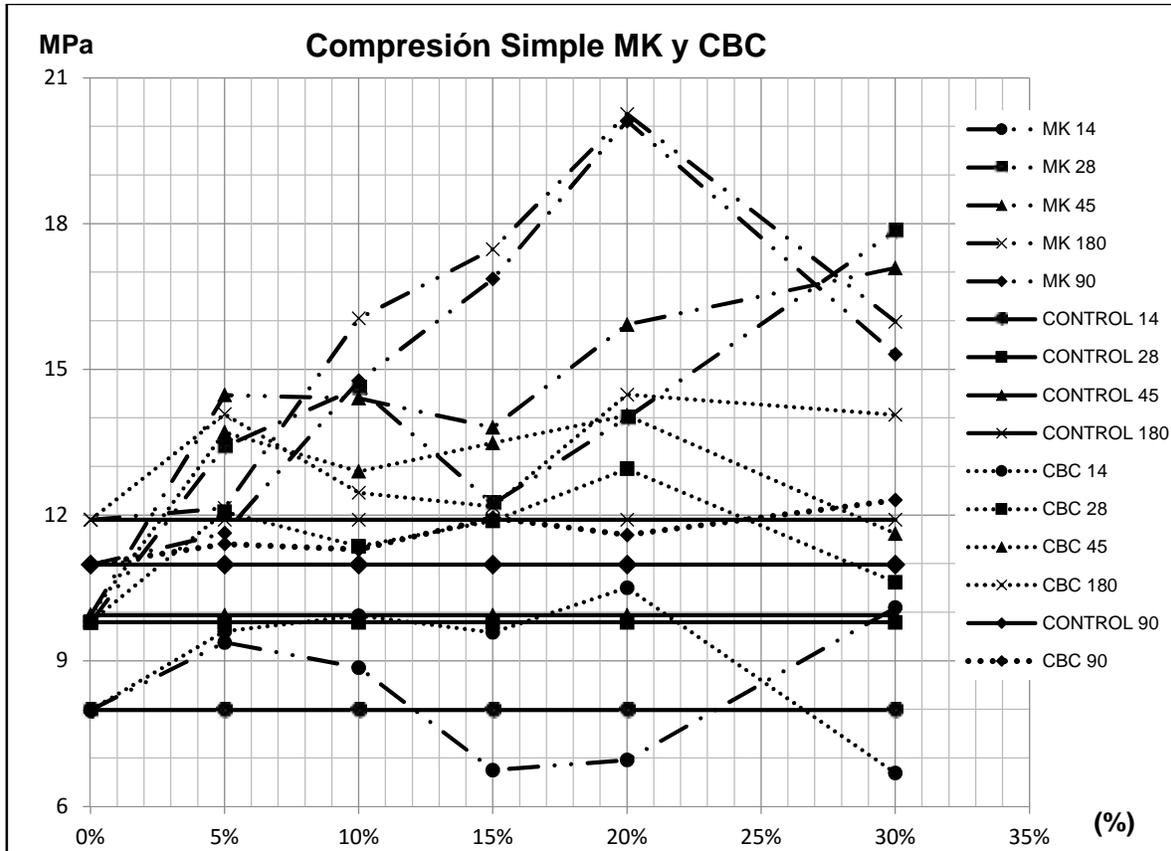


Ilustración 7 Resultados de la prueba de compresión simple.

Un criterio de evaluación, utilizando como parámetro la velocidad de pulso ultrasónico, se presenta en la tabla 3. Este criterio especifica como material de análisis al concreto hidráulico. Sin embargo, el concreto hidráulico a su vez nos puede ubicar en el rango de calidad del mortero que estamos estudiando al ser evaluado con la vp. Los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico se muestran en la ilustración 8.

Tabla 3. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (CYTED-DURAR, 1998).

Velocidad de Propagación	Calidad del Concreto
<2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001-4000 m/s	Alta
>4000 m/s	Durable

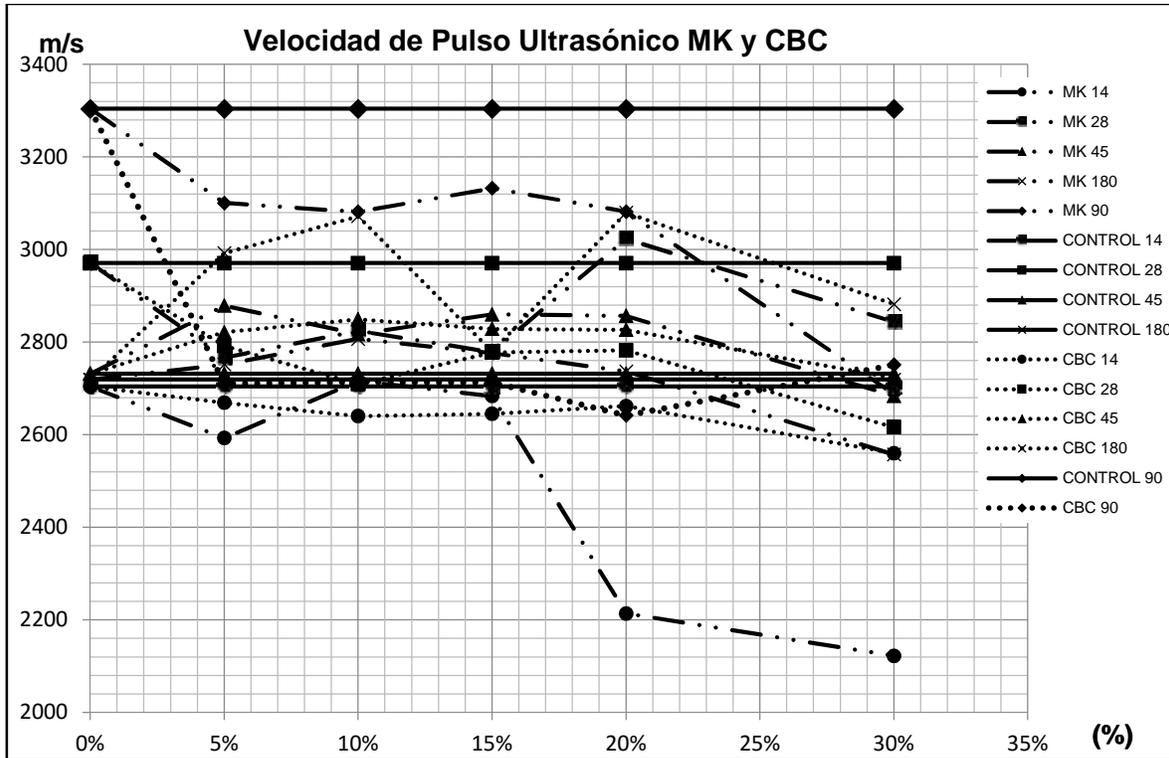


Ilustración 8 Resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico

No existe un criterio general para determinar los valores de resistividad que definan el estado de corrosión de una armadura. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se pueden utilizar los parámetros de la tabla 4 para estructuras de concreto armado (CYTED-DURAR, 1998). Los resultados de la prueba de resistividad eléctrica se muestran en la ilustración 9.

Tabla 4. Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto. (CYTEDDURAR, 1998)

Valor	Criterio
>200K -cm	Poco Riesgo
200 > >10K -cm	Riesgo Moderado
<10K -cm	Alto Riesgo

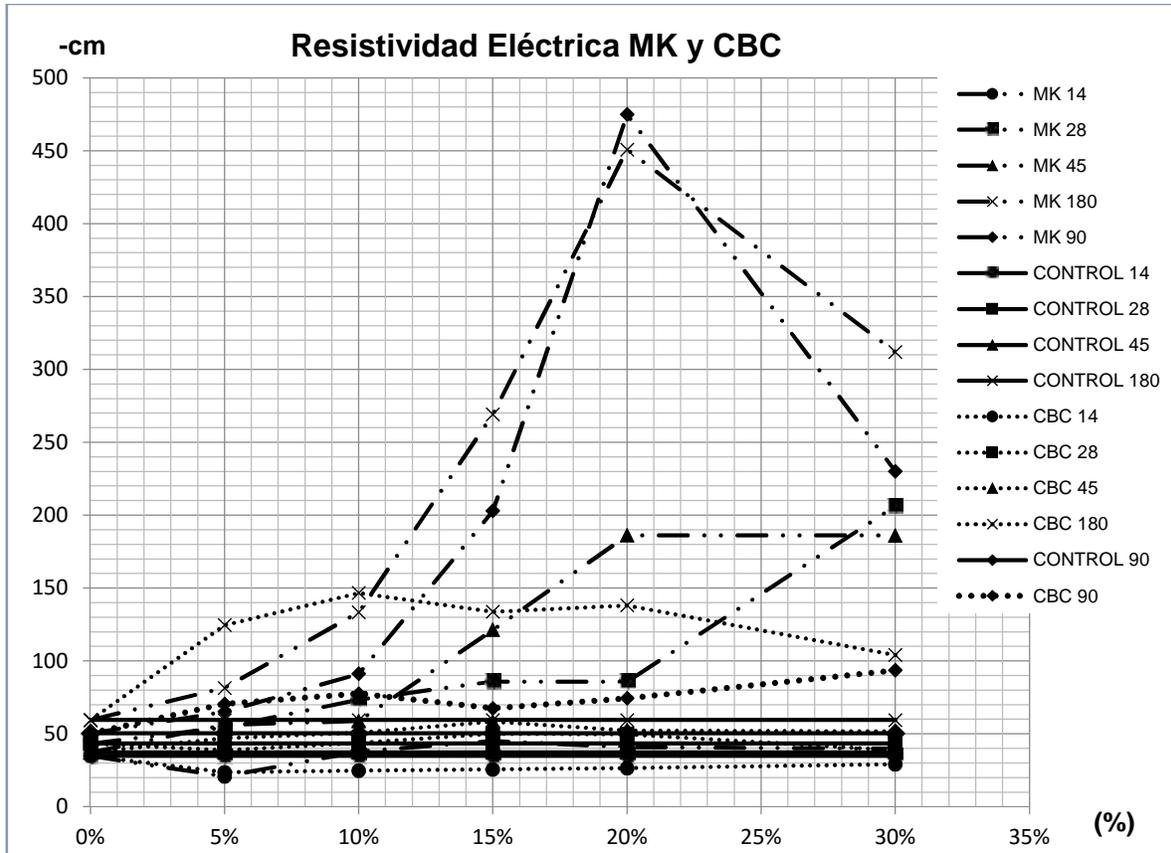


Ilustración 9 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica

Modelos resultantes por orden de importancia de forma descendente es decir de mayor a menor importancia. Son 6 modelos y corresponden 2 por material, uno para predecir el esfuerzo a compresión (C) y el otro para la predicción del esfuerzo a flexión (F).

ECUACIONES PARA PREDECIR LOS ESFUERZOS A COMPRESIÓN SIMPLE	
$0.0529538879129vp - 964.250305725466m + 0.2631831998582e + 145.924740590103ge - 0.4644415661317r - 0.0248495746354d = 0.846773895742933$	C CONTROL
$890.430475651599m + 0.0609669467833vp + 0.1160440613784e + 30.3278162107418\%a - 0.1662288024604d + 0.2541046039053r + 2.742996389013ge = 0.82441855405591$	C MK
$4.00549104m*d - 12.7439509ge - 0.9270374d - 7680.59376m - 0.00018392vp^2 + 1.20160829vp + 0.00032074r^2 + 0.00962556e - 0.00095257vp*r + 2.70857855r + 15.1867806\%a = 0.803880030415513$	C CBC

Tabla 5. Ecuaciones para predecir los esfuerzos a compresión simple



Ecuaciones para predecir los esfuerzos a flexión	
$0.0000000001r^3*vp^3 + 0.2926160256r*e - 0.00027663874r*vp^2 - 0.0001589416vp*e - 0.01564875876vp*r^2 + 10595.3488538729m - 0.20058229561r^3 - 3779.36677209789r + 0.00000188662vp^3 + 17.15961790446vp - 0.01196093321vp^2 - 12.02153457047e + 2.08599454132r*vp + 48.24659270977r^2 = 0.902999752941448$	F CONTROL
$0.992830750119r*m + 0.00000146207vp*e + 0.000000035824r^3 - 0.453768162063r*%a - 0.793151433757vp*m - 0.000061382586r^2 + 0.309230475513r - 0.738340173622vp - 0.036364593262e + 313.823661568343%a - 0.000042835729r*e + 0.000386464055vp^2 - 0.000205003364r*vp + 2216.99037365069m - 0.107200524602vp*%a - 0.000000042571vp^3 = 0.790268818635849$	F MK
$-0.000037375618076r^3 + 0.011868r^2 - 0.000073970738269vp^2 - 0.00145081vp*r + 0.000000016977591vp^3 + 0.08753669vp + 1.22482457m - 0.02862285e + 3.39684226r + 12.9322657%a = 0.81497303$	F CBC

Tabla 6. Ecuaciones para predecir los esfuerzos a flexión

Los valores de confiabilidad se muestran en la tabla 7; entre más se aproxime el factor de correlación al valor de 1 las predicciones serán más exactas.

Factores de confiabilidad de las correlaciones		
Material	Cubos	Prismas
CONTROL	0.847	0.903
CBC	0.804	0.815
MK	0.824	0.790

Tabla 7. Factores de confiabilidad de las correlaciones

6. CONCLUSIONES

En la mayoría de los modelos los parámetros de mayor importancia fueron la velocidad de pulso y la resistividad. Nuestros factores de correlación son un poco bajos en comparación a los presentados por los trabajos mencionados sin embargo nuestro modelo puede ser aplicado con materiales locales y obtener resultados confiables, de acuerdo a las condiciones planteadas en esta investigación.

Aunque en este caso tenemos una variante muy importante a analizar, esta es la actividad puzolánica, que se manifiesta en el comportamiento del espécimen a lo largo del tiempo. Es un poco difícil de predecir, ya que varía de un material a otro, inclusive varía de un porcentaje a otro utilizando los mismos materiales. En general los materiales que han presentado buenos resultados, incluso han superado al testigo en cuanto a resistencia a carga axial son el MK hasta un 15% de sustitución y la CBC en un 5% y 20%, en el resto de los materiales por lo general el 5% de sustitución ha sido el óptimo. Se concluye que este trabajo es solo una pequeña aportación de todos los parámetros que se debería ahondar en su investigación, para poder utilizar alguno de estos materiales como sustituto parcial del cemento, en base a un diseño por durabilidad.

7. AGRADECIMIENTOS

LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”, FACULTAD INGENIERÍA CIVIL, UMSNH.

8. REFERENCIAS

- [1]. Águila I.; Soso M., (2008), Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Universidad Central de Venezuela: Revista de la Facultad de Ingeniería 4, págs. pp.51-62.
- [2]. Arguello Hernández, S. C. (2012). "Análisis comparativo entre técnicas no destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus". Tesis de maestría, UMSNH, Morelia, Michoacán.
- [3]. ASTM C 109M, (2002). I. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). U.S.A.
- [4]. Bernabé Reyes C. (2015). “Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación. Tesis de maestría, Morelia: UMSNH, Morelia, Michoacán.
- [5]. Chávez García, H. L. (2011). Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos locales y cemento CPC30R RS. Tesis de doctorado, CIDEM, Morelia, Michoacán.
- [6]. Cruz L. (2012), Comportamiento Mecánico del Carbón Mineral y de la Escoria de Alto Horno en Morteros como sustituto parcial del cemento, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán México.
- [7]. Escalante, J.I.; Navarro, A.; Gómez, L. Y. (2011). “Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza”. Revista ALCONPAT: pp. 156-169.
- [8]. Navarro L. M.; Martínez, W.; Espinoza, J. A. (2011). Análisis de Materiales (Tercera edición ed.). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [9]. Sánchez de Guzmán D., (2006), Concretos y morteros, Colombia, Instituto del Concreto.

Evaluación electroquímica de concreto reforzado con acero galvanizado expuesto a un suelo fino tipo MH en presencia de NaCl

A. Landa-Gómez¹, A. Landa-Sánchez¹, J.F. Olguin-Coca², E. Maldonado M¹, F.H. Estupiñán-López³, C. Gaona-Tiburcio³, F. Almeraya-Calderón³, **M. A. Baltazar-Zamora¹**

Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana Xalapa, Veracruz, México.

Grupo o Departamento, Escuela o Facultad, Universidad o Institución, Ciudad, País.

Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, U.A.E.H, Pachuca, Hgo., México

UANL. FIME - CIIIA. San Nicolás de los G., Nuevo León, México

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en analizar el comportamiento electroquímico del concreto reforzado expuesto a un suelo fino tipo MH de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el concreto se elaboró con dos tipos de cemento CPC 30R RS y el CPC 30R, el acero de refuerzo fueron barras de acero galvanizado y acero AISI 1018, el arreglo experimental simula elementos de las estructuras que se encuentran en contacto con el subsuelo, como son las cimentaciones de la mayoría de las Obras civiles como Puentes, Edificios, Pavimentos, etc. Los especímenes fueron fabricados con una mezcla de concreto de relación $a/c= 0.65$, la cual se diseñó de acuerdo al método del ACI 211.1. El suelo en donde se colocaron los especímenes se contaminó con 1%, 2% y 3% de NaCl. Los resultados obtenidos después de más de 240 días de exposición demostró que la eficiencia anticorrosiva del acero galvanizado disminuye de acuerdo al incremento de la concentración de NaCl presente en el suelo.

Palabras clave: Suelo Fino, Corrosión, Concreto, Cloruros, Potencial de Corrosión

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las estructuras de concreto reforzado es reconocido como un problema de gran importancia tanto económico como social, en los últimos 40 años se ha trabajado arduamente en tratar de mitigar los efectos de dicho fenómeno, se tiene innumerables trabajos en todo el mundo que tratan el problema de diferentes perspectivas, desde innovación en la tecnología del concreto, materiales alternativos como refuerzo, así como del cemento, adiciones especiales de inhibidores, entre otros, así también estudios de diferentes medios, marino, urbano, tanto reales y simulados [1-4]. Pero es un hecho real de que hay poca información del proceso de corrosión en concreto reforzado cuando este se encuentra en contacto con el subsuelo, como una pila de un puente, una zapata de un edificio, como una losa de cimentación de una planta núcleo eléctrica etc. Por lo anterior el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento electroquímico de concreto reforzado enterrado en un suelo tipo MH, contaminado con cloruros simulando las condiciones mencionadas anteriormente, además de la posibilidad de que esté presente estas sales agresivas en diferentes porcentajes, todo lo anterior con el fin de tener información que contribuya a construir estructuras más durables desde sus cimentaciones.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño y proporcionamiento de la Mezcla de Concreto

El diseño y dosificación de la mezcla de concreto utilizada en la presente investigación fue acorde a lo indicado en el método del ACI 211.1 [5], el cual considera varios pasos, y en donde es indispensable conocer las características físicas de los agregados finos y gruesos, así como la calidad o la resistencia mecánica ($f'c$), el revenimiento (trabajabilidad o consistencia) de la mezcla de concreto. Dicho método permite llevar a cabo la dosificación o cantidad de materiales a utilizar para obtener un concreto acorde a los requerimientos específicos requeridos. La Tabla I resume las características físicas de los materiales utilizados en la investigación, las pruebas se realizaron de acuerdo a las normas ONNCCE.

Tabla I. Caracterización física de los agregados

Propiedades físicas de los materiales	Agregado	Agregado
	Grueso	Fino
	Natural	
Masa específica seca (Mes) gr/cm^3	2.41	2.52
Masa Volumétrica Varillada (Mvv) Kg/cm^3	1382	
Absorción (A) %	3	2.77
Módulo de Finura		2.4
Tamaño Máximo Nominal	$3/4''$	

La Tabla II muestra la dosificación obtenida para una mezcla de concreto de relación $a/c = 0.45$ utilizada en la presente investigación. Se hicieron dos mezclas con esta dosificación debido a que

se utilizaron tipos de Cemento Portland, CPC 30R RS y CPC 30R [6], que son de uso común en estructuras como cimentaciones, zapatas, etc.

Tabla II. Proporcionamiento de las mezclas de concreto para 1 m³

Materiales en Kg	Relación a/c=0.65
Agua	161.83
Cemento	316
Agregado Grueso	956
Agregado Fino	966

Caracterización del Concreto en Estado Fresco y Endurecido

De acuerdo a los ensayos de la normativa ONNCCE [7-10], se determinaron las características del concreto en estado fresco y así como su resistencia mecánica, las pruebas y los resultados de ellas se enlistan en la Tabla III.

Tabla III. Propiedades físicas y mecánicas de los concretos empleados.

Parámetro	Rel. a/c= 0.65
Revenimiento	11 cm
Temperatura	22.5 °C
Masa volumétrica	2216 kg/m ³
Resistencia a compresión	272 kg/cm ²

Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

Como anteriormente se mencionó se emplearon dos tipos de acero de refuerzo, acero AISI 1018 y acero galvanizado, ambos de 3/8", en el centro de los especímenes se colocó una barra de acero inoxidable como electrodo auxiliar. Las dimensiones de los especímenes y el arreglo de las barras embebidas en ellos se observa en la Figura 1.

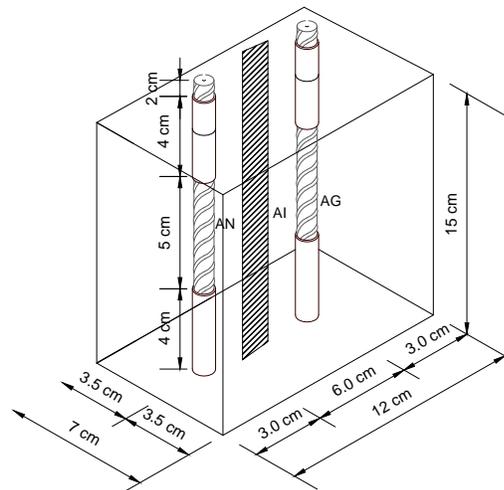


Figura 1. Dimensiones de los especímenes de prueba.

Las varillas de acero AISI 1018 y galvanizado fueron limpiadas para retirar cualquier impureza que en ellas estuviese presente, posteriormente se delimito el área a evaluar y el resto se cubrió con una pintura anticorrosiva. La fabricación de los especímenes de prueba y su etapa de curado se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 [11]. A cada uno de los especímenes se le asignó una nomenclatura, en función de sus variables, la cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla IV. Nomenclatura de especímenes de prueba.

Relación a/c=0.65	
61NRC	61NRG
61NRSC	61NRSG
62NRC	62NRG
62NRSC	62NRSG
63NRC	63NRG
63NRSC	63NRSG

- 6 indica concreto de relación a/c= 0.65
- 1%, 2% y 3% indican el porcentaje de agente agresivo en el suelo
- N significa NaCl como agente agresivo en el suelo de estudio.
- RS Elaborado con cemento CPC 30R RS y R con cemento CPC 30R.
- G para el refuerzo de acero Galvanizado y C para el acero 1018.

Posteriormente para determinar el tipo de suelo en el cual los especímenes se encuentran, se realizó la caracterización física de este, y de acuerdo a los resultados se determinó que se trata de una arena mal graduada SP de acuerdo al SUCS [12], después se colocaron los especímenes en suelo contaminado con 1, 2 y 3% de NaCl para evaluar su corrosión, simulando un medio agresivo en las cimentaciones de las estructuras de concreto como puentes, edificios etc.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Potencial de Corrosión

El monitoreo de potencial de corrosión de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C876-09 [13] así como su interpretación, solo agregando un rango más de acuerdo a la literatura [14], ver tabla 3.

Tabla 3. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO₄	Probabilidad de Corrosión
< - 500	Corrosión Severa
< -350	90% de Prob. de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Prob. de Corrosión

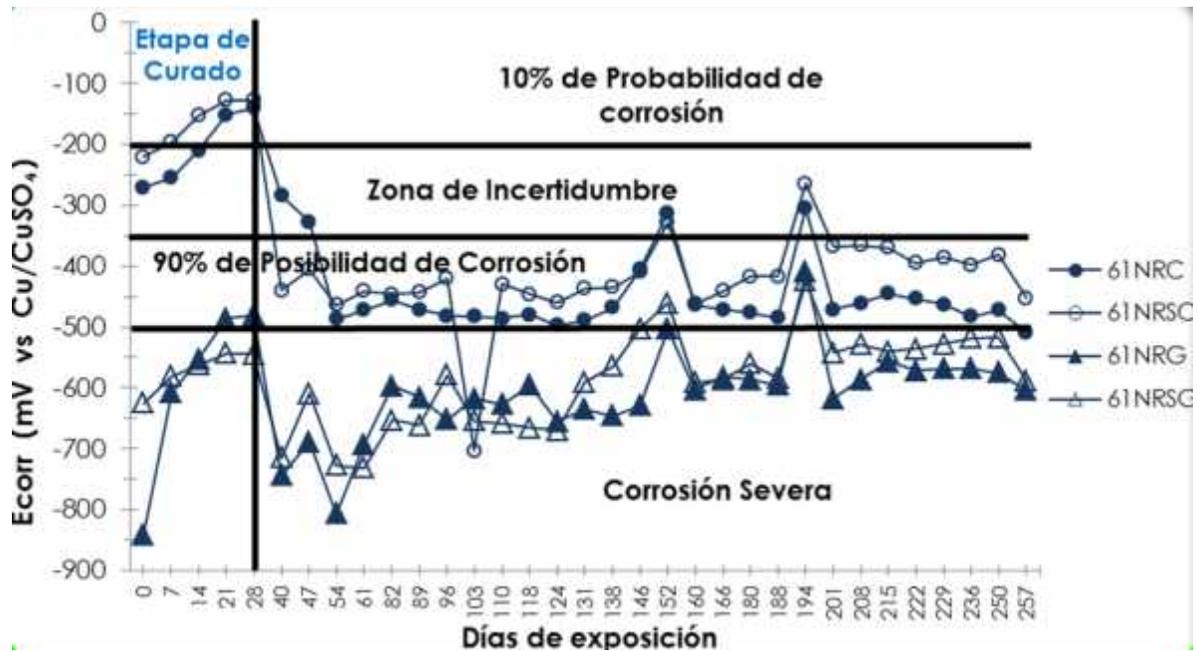


Figura 2. E_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 1% de NaCl.

En la figura 2 se observa el comportamiento del potencial de corrosión E_{corr} , de los especímenes expuestos a un suelo MH contaminado con 1% de NaCl. Se tiene que todos los especímenes al entrar en contacto con el medio agresivo presentan valores más negativos de E_{corr} , sin embargo los especímenes reforzados con acero AISI 1018, 61NRC y 61NRSC, presentan casi durante todo el tiempo de exposición valores de E_{corr} que indican un 90% de probabilidad de corrosión acorde a la norma ASTM C-876-09, presentando valores un menos negativos el espécimen 61NRSC elaborado con cemento resistente a sulfatos. Para el caso de los especímenes con refuerzo de acero galvanizado presentan valores de hasta -700 mV para el día 60, para llegar a valores de entre -550 y -600 mV al final del monitoreo, indicando una corrosión severa.

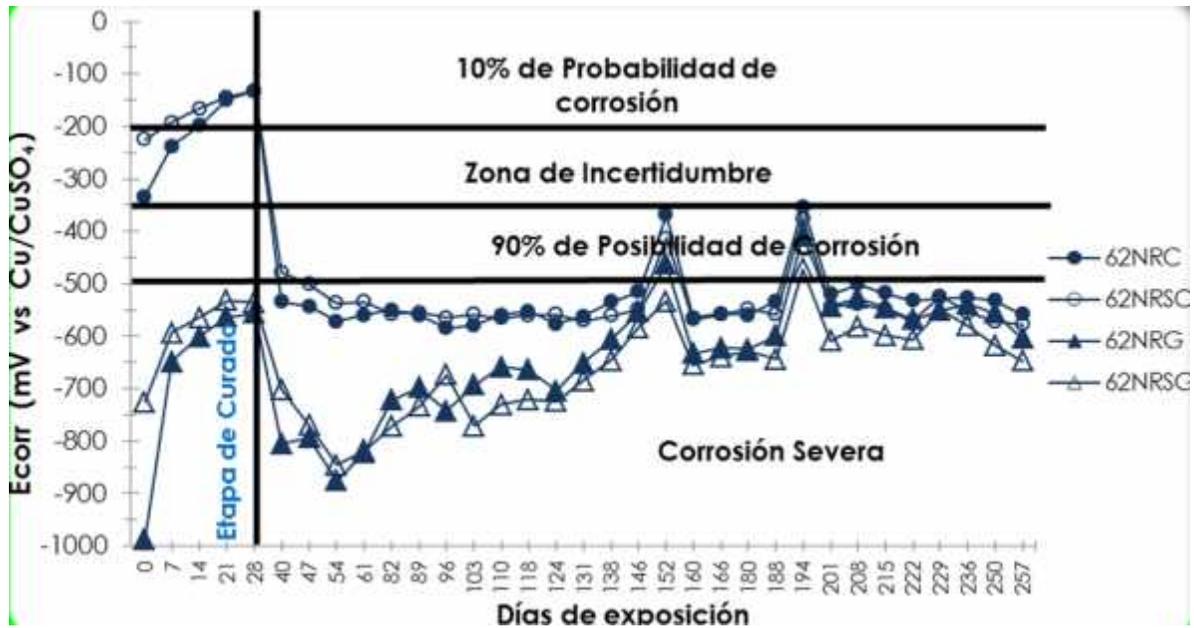


Figura 3. E_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 2% de NaCl.

En la figura 3 se tiene el comportamiento de los potenciales de corrosión E_{corr} , de los especímenes expuestos a un suelo MH contaminado con 2% de NaCl. Se presenta al igual que los especímenes analizados en la figura 2, que al entrar en contacto con el medio agresivo presentan valores más negativos de E_{corr} , con valores menos negativos de los especímenes reforzados con acero AISI 1018, 62NRC y 62NRSC, con valores que indican sin embargo una corrosión severa, valores de E_{corr} entre -550 y 600 mV, en el caso de los especímenes con refuerzo de acero galvanizado presentan valores de hasta -900 mV para el día 54 para después con el paso del tiempo presentar valores de -600 mV en los últimos 50 días de monitoreo, indicando una tendencia a una menor corrosión.

Para el caso de los resultados presentado en la figura 4, cuando en el suelo presenta la más alta concentración de agente agresivo, 3% de NaCl, lo que se puede destacar es el mejor desempeño que presentan los especímenes elaborados con cemento resistente a sulfatos 63NRSC y 62NRSG, que hasta el día 138 de exposición, presentando potenciales de corrosión menores que los especímenes elaborados con cemento normal, y notándose una diferencia importante en los reforzados con acero galvanizado, presentando en el día 103 un E_{corr} de -1050 mV el espécimen elaborado con cemento normal contra un E_{corr} de -700 mV para el elaborado con el cemento resistente a sulfatos para el mismo tiempo de exposición.

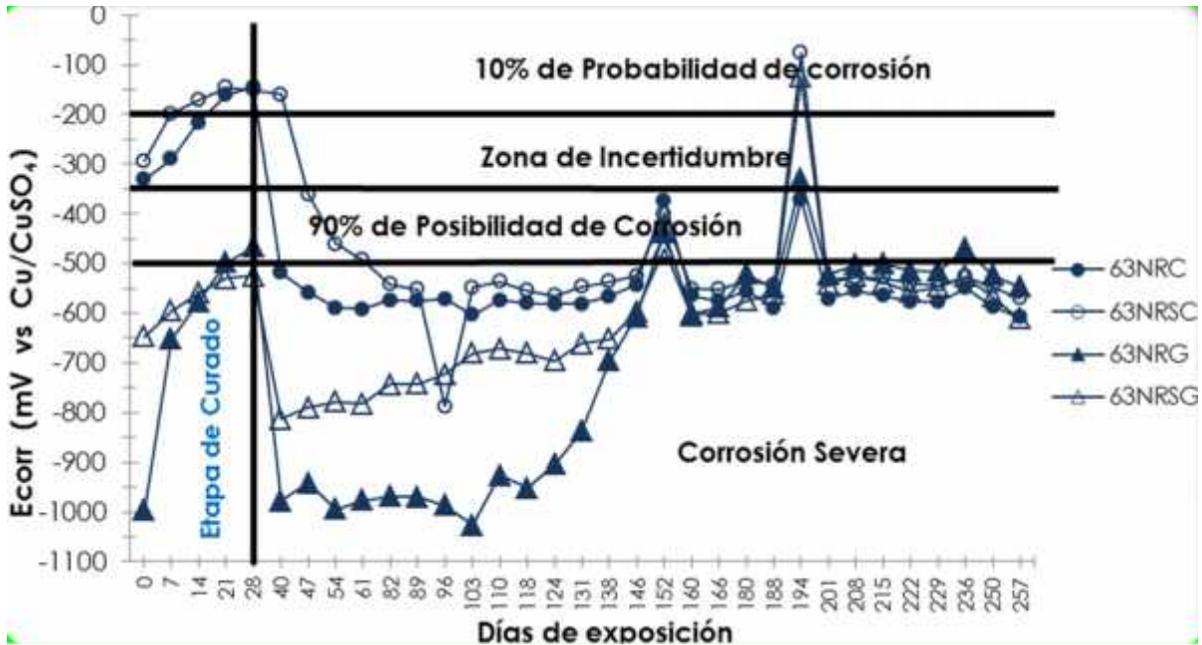


Figura 4. E_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 3% de NaCl.

Cinética de Corrosión mediante LPR

El criterio que se empleó para evaluar el nivel de corrosión fue mediante la técnica de RPL y la interpretación de los resultados fue de acuerdo al Manual de la Red DURAR [15], dicho criterio indica cuatro niveles de corrosión, ver tabla 4.

Tabla 4. Nivel de Corrosión de acuerdo a la I_{corr} .

Velocidad de Corrosión (I_{corr}) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Nivel de Corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5-1	Elevada
> 1	Muy Elevada

En la figura 5 podemos observar el comportamiento de cinética de corrosión de los especímenes expuestos a un suelo tipo MH con 1 % de NaCl como agente agresivo, se tiene que desde el inicio del contacto con el medio agresivo, y después de 40 días de exposición todos los especímenes presentan valores de icor que indican niveles de corrosión de elevada, para después de 60 días presentar valores de i_{corr} mayores a $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, que indican una velocidad de corrosión muy elevada, de acuerdo al manual DURAR, esto hasta el día 180 de exposición en donde los especímenes 61NRSC, 61NRSG disminuyen su icor a niveles de corrosión elevado hasta el final del monitoreo con valores que van de $0.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, relacionándose este comportamiento al tipo de cemento resistente a sulfatos que se utilizó para estos dos especímenes.

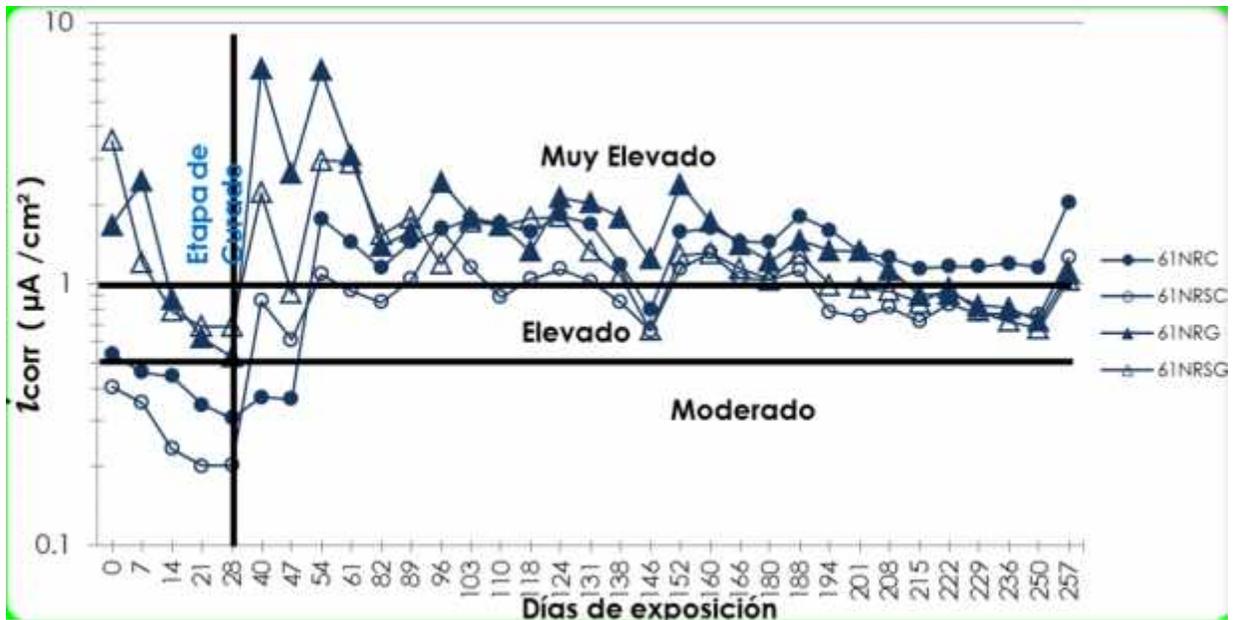


Figura 5. I_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 1% de NaCl.

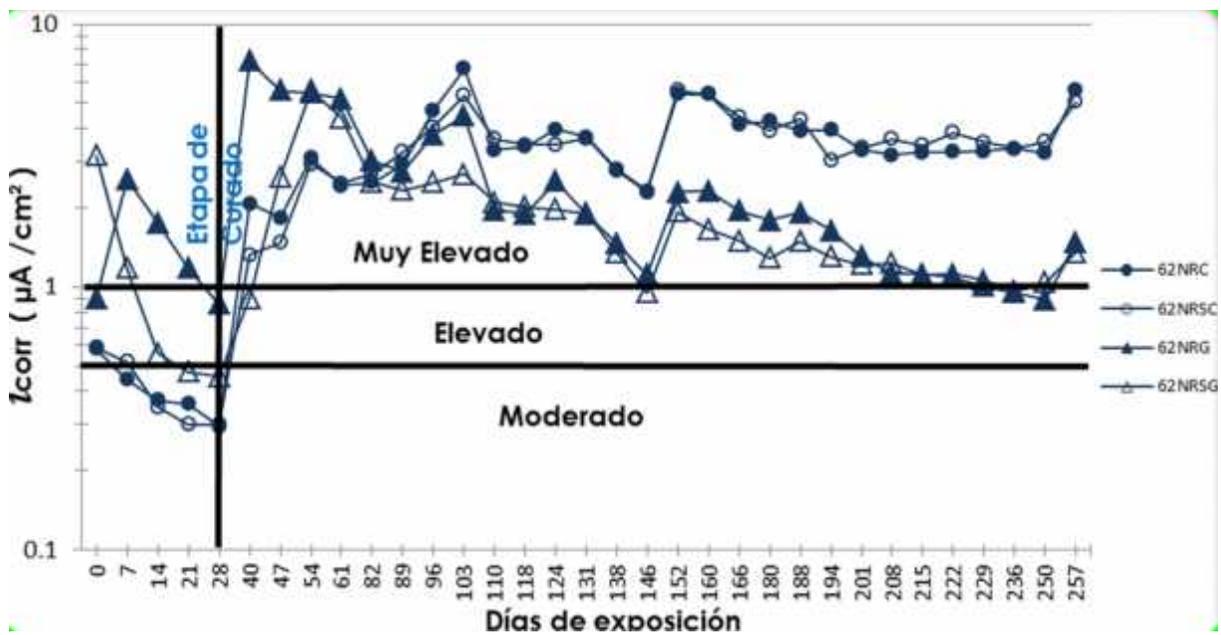


Figura 6. I_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 2% de MgSO4.

Para el caso de los especímenes expuestos a un suelo MH con 2% de NaCl, se tiene como lo muestra la figura 6 que a partir del día 40 todos los especímenes presentan valores de icor mayores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, coincidiendo todos los especímenes en el día 80 con valores de icor de $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ indicando un nivel de corrosión muy elevada, para después evidenciarse la eficiencia del galvanizado con respecto al acero AISI 1018, ya que los especímenes 62NRG y 62NRSG, disminuyeron su I_{corr} del día 80 al día 146 hasta un valor de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, de ahí se presenta un periodo de activación de 60 días, para reportar al final del monitoreo valores de icor menores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que indica de acuerdo al manual DURAR un nivel de corrosión elevada, sin embargo para los especímenes reforzados con acero AISI 1018, 62NRC y 62NRSC sus valores en todo el

periodo de exposición no son menores a $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, llegando hasta valores de $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ que indica un nivel de corrosión muy elevada y en campo se traduciría a una intervención casi inmediata para la rehabilitación de la estructura.

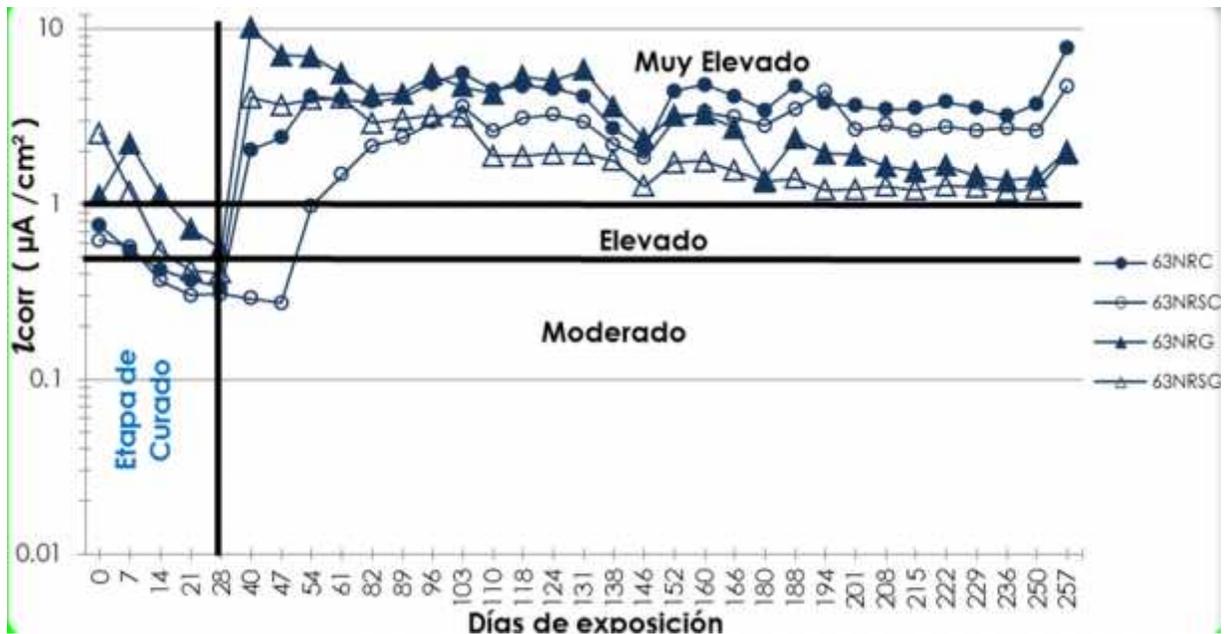


Figura 7. I_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 3% de NaCl.

En la figura 7 se observa como cuando el suelo en donde se encuentran expuestos los especímenes su concentración es de 3% de NaCl, todos los especímenes presentan un nivel de corrosión de muy elevado, presentando el mejor desempeño el espécimen 63NRSG, Galvanizado y elaborado con cemento resistente a sulfatos, con valores a lo largo de todo el monitoreo de 1.8 a $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, así también el espécimen 63NRG, que presenta después del día 166 valores de icor de $1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, se evidencia la eficiencia parcial del acero galvanizado para las condiciones de experimentación, para el caso de los especímenes con acero de refuerzo AISI 1018 el que presenta valores entre 3 y $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta el final del monitoreo es el elaborado con cemento normal 63NRC, y el elaborado con cemento resistente a sulfatos reporta valores de icor que van de 2 a $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, mostrándose también en estos la influencia positiva hasta cierto punto del uso del cemento resistente a sulfatos CPC 30R RS.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de la presente investigación podemos concluir que el NaCl que pudiera estar presente en el suelo, es muy agresivo para la corrosión de estructuras de concreto reforzado que se desplanten en él, teniendo de acuerdo a lo demostrado en esta investigación problemas de corrosión desde concentraciones de 1% de NaCl, y que al incrementarse a 2 y 3 % dicha concentración, se presentan niveles de corrosión elevadas. Se puede concluir que la determinación de iones o agentes agresivos presentes en el suelo debe ser determinada para poder diseñar estructuras que puedan resistir el ataque de dichos agentes y contribuir a incrementar la durabilidad de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

M.A. Baltazar-Zamora agradece al Sistema Nacional de Investigadores de CONACYT-México por el apoyo a la realización del proyecto. Se agradece también a C.M. Hernández-Domínguez, E. González V., y a ASPHALTPAVE S.A. de C.V. por el apoyo técnico.

REFERENCIAS

- ACI, 2004. Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1, p. 29. Ed. IMCYC, México.
- ASTM C 876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, ASTM Volume 03.02, 2009.
- Braja M. Das, Principio de Ingeniería de Cimentaciones, Ed. Thomson, México, 2006.
- G. Santiago-Hurtado et al., (2016). Electrochemical Evaluation of a Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Exposed to Chlorides. *Int. J. Electrochem. Sci.*, (11), 2994-3006-.
- G. Santiago-Hurtado et al., (2016). Electrochemical Evaluation of Reinforcement Concrete Exposed to Soil Type SP Contaminated with Sulphates. *Int. J. Electrochem. Sci.*, (11), 4850-4864.
- G. Santiago-Hurtado, M.A. Baltazar-Zamora, A. Galindo D, J.A. Cabral M, F.H. Estupiñan, P. Zambrano Robledo, C. Gaona-Tiburcio, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013, 8, 8490.
- NMX-C-159-ONNCCE-2004, “Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio”, México.
- NMX-C-414-ONNCCE, Cementos, ONNCCE S. C., México. (2004).
- Red DURAR, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado, CYTED Program, Rio de Janeiro, (1997).
- ASTM C 1064 / C1064M – 08, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. ASTM, USA. (2008).
- H. Won-Song and V. Saraswathy, “Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review” *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.2, Pág. 1-28, Rep. de Serbia, 2007.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002, Determinación de la Resistencia a la Compresión de cilindros de concreto - Método de prueba, ONNCCE S. C., México. (2010).
- NMX-C-156-2010-ONNCCE, Determinación de Revenimiento en Concreto Fresco, ONNCCE S. C., México. (2010).
- NMX-C-162-ONNCCE-2014, Determinación de la masa unitaria, cálculo de rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico, ONNCCE S. C., México. (2014).
- O. Troconis de Rincón et. al., (2016). Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long-Term Exposure. *Corrosion*, 6(72), 824-833.

Correlación empírica de las pruebas de absorción capilar y profundidad de carbonatación en morteros base cal adicionados con aditivo orgánico.

J.A. Velázquez Perez¹, E. M. Alonso Guzmán¹, W. Martínez Molina¹, H. L. Chávez García¹, C. Lara Gómez¹, M. Arreola Sánchez¹, R. Ruiz Ruiz¹, S. C. Arguello Hernández¹, A. A. Torres Acosta², A. L. Del Valle Moreno².

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mújica S/N, Morelia, Michoacán, México

² Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, 76703.

Autor de contacto: E. M. Alonso Guzmán¹. (eliamercedesalonso@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

Los morteros con cal como aglomerante se han utilizado a lo largo de los últimos milenios para la construcción, pavimentación y acabados de edificios [Maravelaki et al 2005, Tunc, Caner, 2006, Schueremans et al 2011] Hoy en día existen una gran cantidad de edificios antiguos que requieren de restauración o reconstrucción para poder preservarlos y conservarlos en buenas condiciones. Uno de los parámetros críticos para hacer compatible el mortero con la piedra es la permeabilidad de dicho mortero que depende a su vez de la conectividad de los poros y de la permeabilidad que estos presenten [Isebaert et al 2014, Isebaert et al 2015].

La carbonatación cambia la microestructura del mortero, no solamente mejora las propiedades mecánicas, sino también afecta la estructura de los poros y por tanto también las características del transporte de agua [Peroni et al 1981, Maravelaki 2003]. La carbonatación es el proceso mediante el cual la cal reacciona con el CO_2 para formar carbonato de calcio; para que se produzca la carbonatación la presencia de agua es esencial ya que requiere la dilución del CO_2 [Johannesson 2001], en este proceso existen etapas importantes[9] como una primera aproximación, la difusión de CO_2 aparece como una de las etapas más importantes porque puede ser el factor limitante ya que está influenciada por la microestructura del mortero debido a que la difusión está en función del diámetro de poro [Arandigoyen, Alvarez 2006], la dilución de CO_2 en el agua de los poros del mortero, la reacción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la precipitación de CaCO_3 sólido [Robert et al 2007].

La presente investigación se centra en las mejoras que pueden aportar algunas adiciones a las propiedades de los materiales de construcción las cuales pueden ser porosidad, resistencia, adhesión, permeabilidad, color, textura, elasticidad, estabilidad volumétrica, densidad, plasticidad, trabajabilidad, fraguado y durabilidad. El efecto de estos aditivos se ha cuantificado de manera parcial bajo pruebas no destructivas y destructivas de las cuales estudiaremos absorción capilar, profundidad de carbonatación y resistencia a la adherencia.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales empleados y diseño de mezclas.

Cuando se diseña un material para determinada aplicación, deben tenerse en cuenta varios factores. El material debe adquirir las propiedades físicas y mecánicas mínimas necesarias, indicadas en los reglamentos de construcción vigentes, debe ser capaz de procesarse en la forma deseada y debe proporcionar una solución económica para el problema de diseño. No existe un método universalmente aceptado para el diseño de mezclas de mortero, la dosificación está usualmente basada en la trabajabilidad o reología de la mezcla, aproximadamente $100\pm 10\%$. Debido a que nos rige la trabajabilidad, se le realizó la prueba de fluidez en estado fresco a cada mezcla además de que se observó la apariencia, consistencia, y se elaboraron recubrimientos de losa y por medio de estas determinar cuál de las mezclas fue la que presento menor agrietamiento.

Los materiales empleados en el presente estudio fueron:

- 1.- Arena de río. Para poder iniciar las mezclas se cribó arena del Río Lerma (pasa malla 8, retiene mala 200, ASTM) el banco está ubicado en la ribera cercana a la zona de Puruándiro, México, para garantizar su alto contenido de sílice y se caracterizó según la normativa vigente para su uso en construcción.
- 2.- Conglomerante.. En nuestro caso se usó la cal grado industrial, sus yacimientos están ubicados en Piedras de Lumbre, Municipio de Jungapeo, Michoacán, México.
- 3.- Aditivos. El aditivo utilizado fue: Cerveza en dos porcentajes 25% y 50% como sustitución del líquido de amasado, el cual depende de la cuantificación de la fluidez en la mezcla fresca; en la literatura se ha encontrado una serie de materiales que fueron utilizados por nuestros ancestros para sus construcciones es que nosotros utilizamos la cerveza tratando de simular la urea que fue uno de dichos materiales.
- 4.- Solvente. Agua potable de la red municipal, con el cual se le otorgó trabajabilidad a la mezcla de mortero de cal.

Elaboración de especímenes. Para cada mezcla se elaboraron especímenes cúbicos [ASTM C109/109M-02], prismáticos [ASTM C348-02], cilíndricos y briquetas [Navarro et al 2007]. Las mezclas se realizaron con una relación Cal-Arena de 1:2.5 en peso.

Pruebas realizadas. Se realizó la prueba de fluidez para determinar la cantidad de agua óptima para la mezcla según la normativa [ASTM C-230, ASTM C-305]. Posteriormente se realizó el ensayo para porosidad en especímenes con edad de 350 días de acuerdo a la metodología propuesta por Fagerlund [Carpio et al 1998] que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes: m (resistencia a la penetración del agua), K (coeficiente de absorción capilar), e (porosidad efectiva).

Para la realización de la prueba de adherencia [ASTM C 1583. 2004] y carbonatación se elaboraron muretes de tabique de 2 m x 2 m, se realizaron perforaciones a los aplanados de cada mezcla correspondientes se procedió a pegar unos discos de acero inoxidable, los cuales sirvieron para realizar la prueba de resistencia a la adherencia, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel.

Para la prueba de carbonatación se requirió instrumentos de medición y solución indicadora acido-base (fenolftaleína) se tomaron probetas de los aplanados y posteriormente se les realizó un corte transversal para aplicarles la solución de fenolftaleína una vez hecho esto, se tomaron las dimensiones de la zona incolora que nos indicó la profundidad de la carbonatación. El tiempo de exposición de la superficie a evaluar no podrá ser mayor a 15 minutos [Red tematica xv].

Una vez obtenidos los datos de los resultados se procedió a su análisis y la búsqueda de correlación entre las pruebas mencionadas anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1.- Porcentaje de fluidez en las diferentes mezclas.

Mezcla	% de adición	Relación A/C	Fluidez (%)
Testgo	0	1.20	99
Cerveza	25	1.00	85
Cerveza	50	1.00	85

En la tabla 1, se muestra que la fluidez de las mezclas que fueron modificadas con un aditivo presentan un comportamiento muy parecido al del testigo, siendo ligeramente menor las adicionadas con cerveza y con esto nos percatamos que tiene un adecuado comportamiento de trabajabilidad.

La figura numero 1 nos muestra el comportamiento de las mezclas respecto a la posible correlación, que para este caso no es un resultado concluyente ya que no existe ninguna tendencia entre profundidad de carbonatación y absorción capilar.

En la figura número 2 de igual manera que en la figura 1, tampoco se aprecia alguna correlación entre profundidad de carbonatación y la absorción capilar.

Por lo tanto de los resultados obtenidos simplemente se puede decir que se observó que las adiciones de cerveza pueden contribuir a la mezcla a tener una porosidad relativamente menor que el testigo y con una existencia muy poca en cuanto a diferencias de porosidad respecto a cada porcentaje de adición. Respecto a la prueba de carbonatación ambas mezclas resultaron con un valor menor de profundidad de carbonatación que la mezcla testigo.

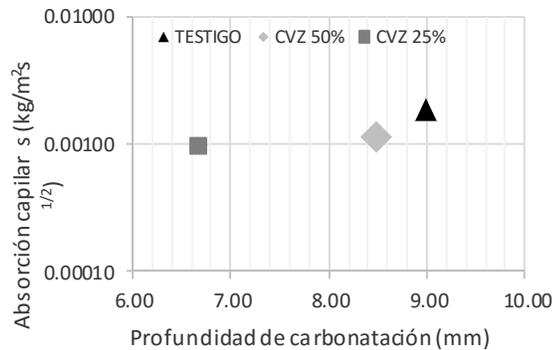


Figura 1.- Correlación entre absorción capilar y profundidad de carbonatación.

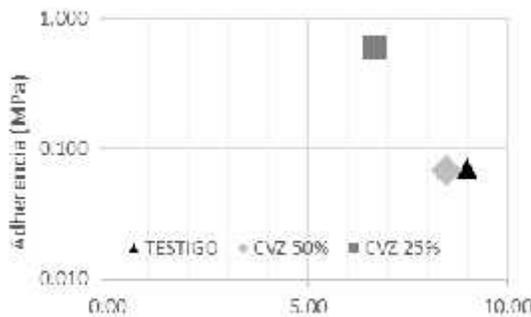


Figura 2.- Correlación entre adherencia y profundidad de carbonatación.

4. CONCLUSIONES

Podemos decir que adiciones en alto porcentaje reducen la absorción capilar alrededor de un 30% comprado con la muestra testigo pero a su vez el avance de carbonatación se mantiene muy similar al testigo por lo que podría inferirse que no se menguarían las reacciones de carbonatación en la cal, lo cual nos llevaría un buen desempeño mecánico.

Cabe mencionar que estos resultados forman parte de una investigación más detallada de la cual aún se están realizando pruebas que serán complementarias a las presentadas en este trabajo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la sección de resistencia de materiales del laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas de la FIC-UMSNH y al cuerpo académico CAC-UMSNH-147

6. REFERENCIAS

ASTM C-305: “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”.

B. Johannesson, P. Utgenannt, Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 925–931.

Isebaert A, Van Parys L, Cnudde V (2014) Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone—a review. *Constr Build Mater* 59:39–50. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.020

M. Arandigoyen, J.I. Alvarez, Carbonation process in lime pastes with different wáter/binder ratio. *Construction materials*, vol. 56, 281, 5-18. January- March 2006. ISSN 0465-2746.

Maravelaki-Kalaitzaki P, Bakolas A, Karatasios I, Kilikoglou V (2005) Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cem Concr Res* 35:1577–1586. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.001

Maravelaki-Kalaitzaki P, Bakolas A. Moropoulou physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cem Concr Res* 2003;33:651–61.

Navarro Sánchez L. M., Martínez Molina W., Espinoza Mandujano A., Análisis de Materiales. Segunda edición, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. 2007

Norma ASTM C109/109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

Pore-related properties of natural hydraulic lime mortars: an experimental study A. Isebaert . W. De Boever . F. Descamps . J. Dils . M. Dumon . G. De Schutter . E. Van Ranst . V. Cnudde . L. Van Parys Received: 17 April 2015 / Accepted: 22 July 2015 / Published online: 31 July 2015 _ RILEM 2015

Red tematica xv.b durabilidad de la armadura. cyted programa iberoamericano de ciencia y tecnologia para el desarrollo subprograma 15.

Robert M. Lawrence, Timothy J. Mays, Sean P. Rigby, Peter Walker, Dina D' Ayala. Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1059–1069.

S. Peroni, C. Tersigni, G. Porraca, S. Cerea, M. Forti, F. Guidobaldi, P. Rossi-Doria, A. De Rege, D. Picci, F.J. Pietrafitta, G. Benedetti, Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes, mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings Symposium 3–6/11/1981, ICCROM, Rome, 1981, pp. 63–99.

Schueremans L, Cizer O, Janssens E, Serre G, Van Balen K (2011) Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: research and practice. *Constr Build Mater* 25:4338–4350. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.01.008

ASTM C 1583. (2004). standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method). estados unidos.

ASTM C-230: “Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement”

Juán José Carpio y miembros de la Red DURAR., 1998, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión En Estructuras de Hormigón Armado. Segunda Edición. Agosto, ISBN 980-296-541-3, pp.117-119

Norma ASTM C348-02, Historical Standard: ASTM C348-02 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortar

Tunc,oku SS, Caner-Saltık EN (2006) Opal-A rich additives used in ancient lime mortars. *Cem Concr Res* 36:1886–1893. doi:10.1016/j.cemconres.2006.06.012

Efecto mecánico de sustituciones de perlita expandida en morteros base cemento portland.

M. Arreola Sánchez¹, W. Martínez-Molina², E. M. Alonso-Guzmán², H. L. Chávez García², C. Lara-Gómez², J. I. Escalante-García³, C. Bernabé¹, J.A. Velazquez Perez⁴, R. Ruiz Ruiz⁴, S. C. Arguello-Hernández¹.

¹Laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

²Cuerpo Académico Consolidado CAC-147-UMSNH, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

³Cinvestav, I.P. N., Unidad Saltillo, Carretera Saltillo-Monterrey, Km 13, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

⁴Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

1. INTRODUCCIÓN

Es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos que reduzcan el impacto medio ambiental de las actividades de construcción con cemento portland. Entre las diversas rutas posibles, está el desarrollo de cementos compósitos (Malhotra, 1996), además, con la intención de proveer durabilidad al concreto y mortero, mejorando sus propiedades mecánicas, físicas o químicas. En diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas (Márquez et al, 2010; Águila, 2008).

Los materiales de construcción incorporados con materiales porosos tales como perlita expandida, de espuma de plástico y cenizas volantes expandidas se han utilizado durante mucho tiempo. Estos materiales porosos tienen una estructura de poros interconectados y son estables químicamente. Además, son económicos y son recursos abundantes (Cabeza et al, 2007).

La adición de perlita expandida “PE”, agregado liviano, se sabe que reduce significativamente la densidad de los morteros a base de cemento y mejorar sus propiedades térmicas (Demirboga, 2003), resistencia a la congelación-descongelación (Demirboga, 2004) y las propiedades acústicas (Yilmazer, 2005). La perlita es una forma amorfa de magma riolítica o dacítico que contiene 2-5% de agua (Mladenovic et al, 2004). Su uso en los elementos estructurales se ha promovido en los miembros de carga dinámica, donde en el consiguiente descenso en el peso del concreto se espera para limitar los daños durante los terremotos (Topcu y Isikdag, 2008), sobre todo después de refuerzo adecuado con fibras. En la mayoría de los estudios, la perlita se ha utilizado como un reemplazo para el cemento Portland, como un relleno microscópico ligero o para reemplazar una porción de la arena. Si bien se reconoce su actividad puzolánica, su papel en morteros ligeros es en gran parte la de un agregado inerte (Torres y García, 2009).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1 Diseño de mezclas y pruebas realizadas.

Con base en estudios previos, se determinó el diseño de mezclas a realizar para la experimentación, dicho diseño se muestra en la Tabla 1. La relación agua/cementante se fijó en 1.01 (que fue la necesaria para que la mezcla testigo cumpliera con la fluidez) en cada una de las mezclas se cuidó que se cumpliera con la fluidez del testigo. La fluidez de todas las mezclas se determinó según el procedimiento de la norma ASTM C 1437 – 01.

Tabla 1. Diseño de mezclas a analizar.

Parámetro	Sustituciones para PE					
	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	5	10	15	20	30
Relación a/c	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Relación arena/c	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

Para el análisis de la resistencia a carga axial se siguió la norma ASTM C 109M. Para la resistencia a la flexión de los morteros se siguió la norma ASTM C 348 – 02; ambas pruebas se ejecutaron utilizando la máquina universal Tinius Olsen. Para la prueba de tensión, se siguió el procedimiento descrito el Manual de Análisis de Materiales, 2013 de la facultad de ing. Civil de la U.M.S.N.H., tercera edición, usándose la máquina Michaelis.

Para la realización de la prueba no destructiva de Velocidad de Pulso se siguió la norma ASTM C 597 – 02. Después de la elaboración del número correspondiente de especímenes para cada sollicitación, las edades de prueba especificadas fueron de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días.

2.2 Caracterización de PE y cemento empleados.

Cemento empleado: El cemento para esta investigación fue CPC 30R RS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004). La forma de las partículas del cemento CPC (Figura 1) es muy similar al de los materiales y cenizas de origen mineral, solo que en el caso del CPC se observa una mayor variedad de tamaños.

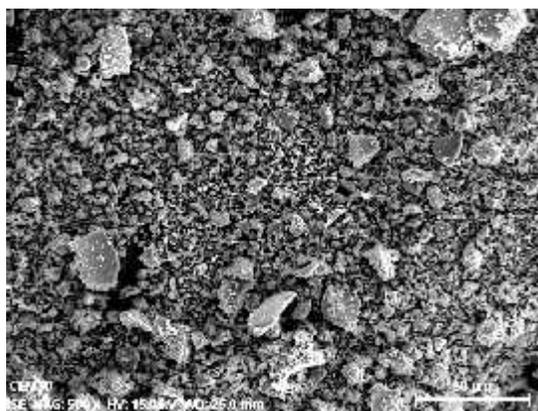


Figura 1. Forma de partículas del cemento CPC.

Perlita Expandida: La PE fue proporcionada por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V. misma que la tiene clasificada como “MICROSIL 325 S”, es decir que pasa la malla N° 325, según la ficha técnica del producto. En la figura 2, se aprecia una forma esférica hueca de las partículas de PE, lo cual se debe al efecto del calentamiento y la migración del agua contenida en la perlita mineral.

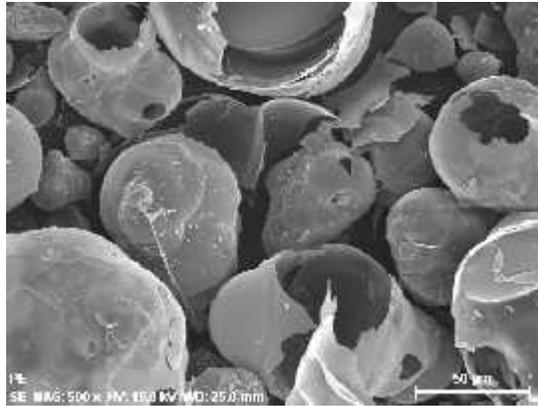


Figura 1. Morfología de partículas de la Perlita Expandida (PE).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Resistencia a compresión.

En la figura 3 se puede apreciar el desempeño a compresión de las cinco diferentes sustituciones de PE en las mezclas de mortero, en dicho comportamiento se puede destacar que ningún porcentaje de sustitución logra superar al mortero testigo, solo los porcentajes de 5 y 10% presentan una resistencia ligeramente por debajo del mismo pero con una tendencia a superarlo en edades mayores a los 360 días.

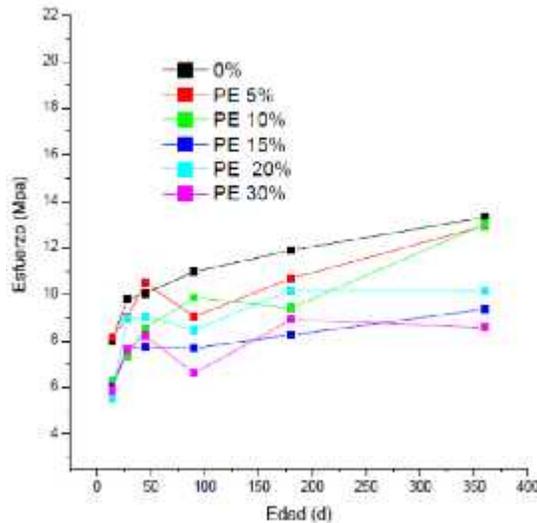


Figura 3. Resistencia a compresión de PE.

3.2 Resistencia a flexión.

A diferencia de la prueba de compresión, en el desempeño a flexión de las mezclas de estudio se logra un MR mayor al testigo con el 5% de sustitución de PE desde la edad de 90 días y con una marcada tendencia a la alza en las dos edades posteriores.

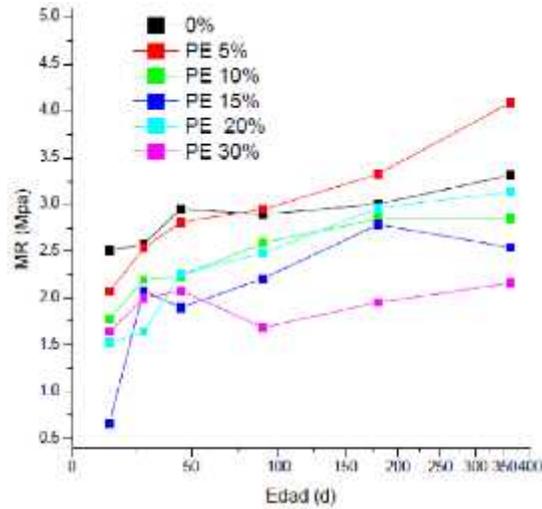


Figura 4. Módulo de Ruptura de la PE.

3.3 Resistencia a tensión.

Para el caso de la prueba de tensión directa (figura 5), se observa mucha variabilidad en los resultados de las diferentes mezclas. Destacando la mezcla de 10% de sustitución, misma que presenta un desempeño consistentemente a la alza y supera a la mezcla testigo a la edad de 360 días.

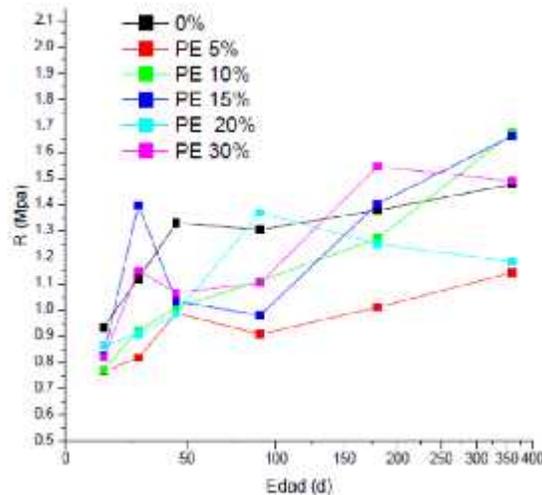


Figura 5. Resistencia a la tensión directa de la PE.

3.4 Resistencia a la adherencia o tracción.

Al igual que en la prueba de tensión directa, en la prueba de adherencia (figura 6) se observa mucha variabilidad en los resultados y de nueva cuenta la única mezcla que muestra un desempeño consistente y ligeramente superior al testigo en casi todas las edades de prueba es la de 5% de sustitución de PE.

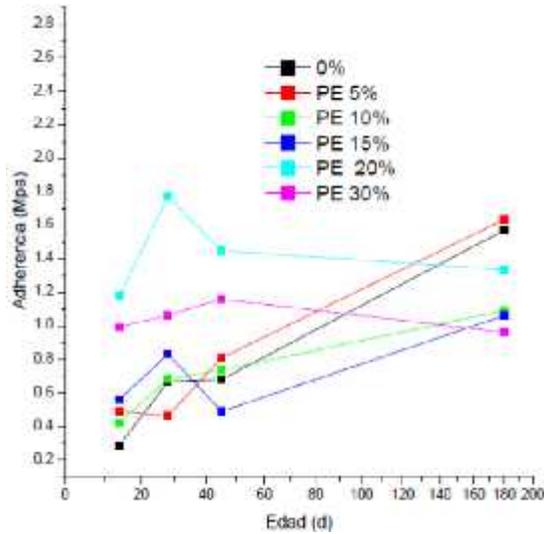


Figura 6. Tensión por adherencia de la PE.

3.5 Velocidad de pulso ultrasónico.

En la figura 7 se muestran los resultados de la prueba de Velocidad de pulso ultrasónico, los cuales son coherentes con los resultados de la prueba de compresión simple dado que ningún porcentaje de sustitución logra mejorar el desempeño de la mezcla testigo, salvo el 5% de sustitución que presenta resultados iguales al mismo.

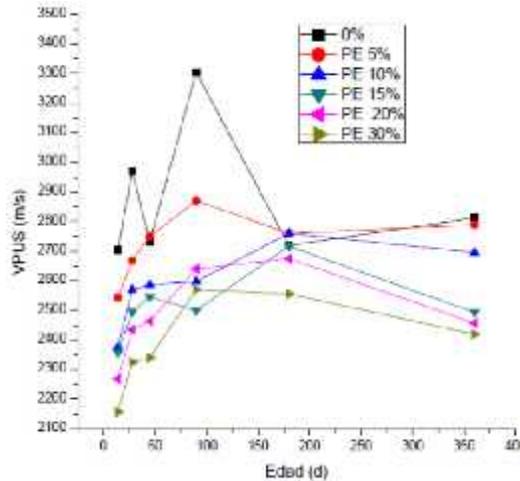


Figura 7. Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

3.6 Resistividad eléctrica.

En la figura 8 se observan los resultados de resistividad eléctrica, en los cuales se puede observar un mejor desempeño de las mezclas con sustitución de PE a edades superiores a los 90 días aunque el testigo muestra mucha variabilidad.

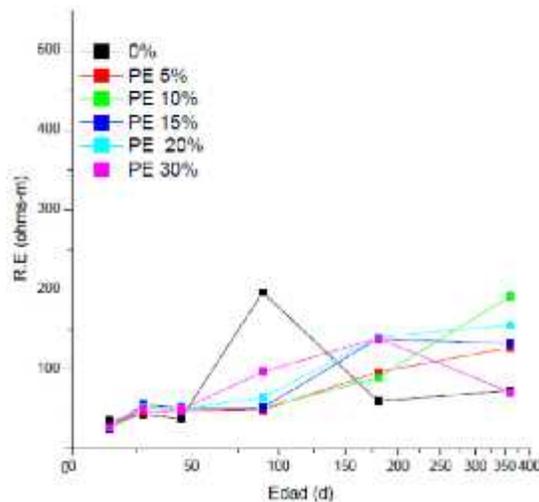


Figura 8. Resistividad eléctrica.

4. CONCLUSIONES.

En general no se observó incremento en las propiedades mecánicas ni físicas. En la prueba de compresión simple, que podría ser la prueba mecánica más importante, no se observó ninguna mejora con la presencia de PE pero en la sollicitación de flexión si se obtuvieron resultados favorables en la mezcla de 5% de sustitución de PE.

Por tal motivo el porcentaje de sustitución que presentó el mejor comportamiento fue el 5% de PE, ya que a la edad de 360 días logró superar al testigo en varias sollicitaciones.

Será necesario realizar estudios más detallados tanto físicos como pruebas de durabilidad para poder determinar mejor las aportaciones y/o efectos de la sustitución de PE en mezclas base cemento Portland.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Sección de Resistencia de Materiales del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la FIC-UMSNH.

6. REFERENCIAS

Cabeza, LF., Casellon ,C., Nogues, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O. “Use of microencapsulated PCM in concrete”. Walls for energy savings 39, 2007: 113–119.

Demirboga, R., Gül, R. “Durability of mineral admixture lightweight aggregate concrete”. Indian J Eng Mater Sci 11(3), 2004: 201–206.

Demirboga, R., Gül, R. “Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures”. Energy Build 35(11), 2003: 1155–1159.

Idalberto Águila y Milena Soso, «Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos»,

Universidad Central de Venezuela. Revista de la facultad de ingeniería, vol. 23, N° 4, pp.51-62, 2008.

Malhotra, V.M. and Mehta, P. K. “Puzzolanic and cementitious materials”, Advances in Concrete Technology, Edit. Gordon and Brach Publishers, 1996.

Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V., Skapin, A.S. “Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates”. Cem Concr Res 34, 2004:1809–1816.

Marquez-Montero, S. et al, «Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos», ALCOMPAT 2010. Xalapa, Veracruz, México.

Topcu, I.B., Isikdag, B. “Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete”. J Mater Process Technol 204(1–3), 2008:34–38.

Torres, M.L., García-Ruiz, P.A. “Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption”. Cem Concr Compos 31, 2009:114–119.

Yilmazer, S., Ozdeniz, M.B. “The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates”. Build Environ 40(3), 2005:301–342.

Efecto de la perlita natural en las propiedades físicas de los morteros de cemento.

R. Ruiz Ruiz¹, W. Martínez Molina¹, E.M. Alonso Guzmán¹, H.L.Chávez García¹, C.Lara Gómez¹, A.A. Torres Acosta², M. Arreola Sánchez¹, C. Bernabé Reyes¹, S.C. Arguello Hernández¹, J.A. Velázquez Pérez¹, R. Silva Orozco¹.

¹Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.N., México.

²Instituto Mexicano del Transporte, México.

Palabras clave: durabilidad; morteros; puzolanas.

Autor de contacto: Nombre completo del autor de contacto. (correo.electronico@com)

1. INTRODUCCIÓN

La industria cementera es responsable del 5-7% de las emisiones globales de CO₂ (Benhelal, 2012). De acuerdo con el Informe estadístico de la Federación Interamericana del cemento publicado en 2013, se emiten 629Kg de CO₂ a la atmósfera por cada tonelada de cemento producida, lo cual es preocupante ya que este es uno de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global (FICEM, 2013).

Por otro lado, muchas estructuras de concreto reforzado han presentado graves problemas de corrosión, debido a que los criterios de durabilidad no han sido tomados en cuenta en su diseño. Un factor determinante para proveer durabilidad es elaborar concretos de baja porosidad que impidan el ingreso de agentes agresivos a la matriz cementicia (Newman & Choo, 2003). Los ensayos de resistividad eléctrica () y absorción capilar pueden ser utilizados como parámetros para determinar la durabilidad. El primero influye en la velocidad de corrosión del acero embebido en el concreto reforzado; mientras mayor sea la resistividad eléctrica, menor es el riesgo de corrosión del acero. En el ensayo de absorción capilar se determina la porosidad efectiva, la cual está en función de la interconectividad de los poros capilares que constituyen la causa principal de la permeabilidad del concreto y por tanto a los agresivos ambientales (CYTED, 1998).

La perlita natural es un material puzolánico que ha sido objeto de estudio de diversas publicaciones debido a que provee diversas ventajas con respecto a otros materiales cementantes, tales como: reducción de consumo de cemento Pórtland (CP) , provee trabajabilidad, baja permeabilidad, alta durabilidad, alta resistencia, etc (Erdem & et al,2007). Otros estudios indican que el polvo de perlita mineral adicionado a los morteros tiene alto potencial para suprimir el deterioro por la expansión álcali-sílice (Bektas & et al, 2005).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Escriba directamente sobre este formato. El contenido del trabajo empezará en la segunda página, con márgenes de 2.5 cm (1”) por los cuatro lados; podrá ser escrito en español, portugués o inglés para la etapa de revisión. Cada autor elegirá el lenguaje de su preferencia para la evaluación, siendo obligatorio el segundo idioma en la versión aceptada siendo uno de los idiomas el inglés. Se dejará un espacio entre el título de la sección y la primera línea de cada párrafo.

2.1 Materiales.

Los materiales cementantes utilizados en esta investigación son: cemento CPC 30R RS y perlita natural cuyo tamaño de partícula es de 45µm (Arreola, 2012). El agregado empleado es de río y fue obtenido del Río Huajúbaro, localizado en el estado de Michoacán. El agregado presenta características similares a la arena Ottawa especificadas en la norma ASTM C778-02(2002), la cual indica que el tamaño del agregado para ser utilizado en la elaboración de morteros debe ser el que pasa la malla N°16 y se retiene en la N°30, así como presentar alto contenido de sílice. Todos los materiales fueron caracterizados mediante fluorescencia de rayos X con la finalidad de conocer su composición química, la cual es mostrada en la Tabla 1. De acuerdo con los

resultados mostrados en dicha tabla se aprecia que: el cemento CPC 30R RS presenta la composición típica de los cementos de su clase; la PN presenta un contenido de óxidos responsables de las características de puzolanicidad ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) superior a 70%, contenido de SO_3 inferior a 4% y pérdidas por ignición inferiores al 10%, por tanto, se clasifica como puzolana tipo N de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C618-03(2003); también se aprecia que el agregado presenta contenido adecuado de SiO_2 .

Tabla 1. Composición química de materiales

Compuesto	CPC 30R RS	PN	Arena
SiO_2	27.932	72.20	78.185
TiO_2	0.201	0.12	0.203
Al_2O_3	6.437	13.58	11.557
Fe_2O_3	2.217	1.01	1.567
MnO	0.083	0.07	0.03
MgO	1.301	0.54	0.239
CaO	49.773	1.05	1.015
Na_2O	0.669	3.22	2.666
K_2O	1.225	4.29	3.577
P_2O_5	0.118	0.03	0.036
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	36.586	86.79	1.19
PXC	5.12	3.99	-
SO_3	3.37	-	-

El agregado fue caracterizado por los ensayos de control de calidad que se hacen a los agregados pétreos para su uso en la elaboración de morteros, tales como: humedad actual y de absorción, masas volumétricas seca suelta (M.V.S.S.) y varillada (M.V.S.V.), sedimentación, colorimetría, material que pasa la malla N°200, contenido de terrones de arcilla, densidad, y módulo de finura. En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en estos ensayos, así como la normativa empleada.

Tabla 2. Ensayos realizados al agregado

Ensayo	Resultado	Norma
Humedad actual	0.75%	NMX-C-166-ONNCCE-2006
Absorción	3.18%	NMX-C-165-ONNCCE-2004
M.V.S.S.	1.23g/cm ³	NMX-C-073-ONNCCE-2004
M.V.S.V.	1.33g/cm ³	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Materia orgánica	Nivel 3	NMX-C-088-ONNCCE-1997
Material que pasa la malla N°200	1.98%	NMX-C-084-ONNCCE-2006
Terrones de arcilla	2.43%	NMX-C-071-ONNCCE-2004
Densidad	2.31g/cm ³	ASTM C128-04
Módulo de finura	2.42	NMX-C-077-ONNCCE-1997

2.2 Metodología.

Se elaboraron especímenes de mortero de cemento con relación agua/cementante de 1.01, relación arena/cementante de 2.75 y fluidez de 110± 5. Se hicieron substituciones de 5, 10, 15,20 y 30% de perlita natural (PN) con respecto a la masa del cemento. El mezclado fue mecánico. Se elaboran especímenes cilíndricos de 5x10cm de acuerdo la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002 y fueron curados hasta el día de prueba por el método de inmersión conforme lo marca la norma NMX-C-148-2010. Los especímenes fueron ensayados a los 1000 días de su elaboración. Los ensayos realizados fueron: absorción capilar y resistividad eléctrica, los cuales fueron hechos de acuerdo con los procedimientos descritos en la Red DURAR (CYTED, 1998) y son mostrados en las figuras 1 y 2 respectivamente. Los ensayos fueron hechos por triplicado y comparados con un testigo.



Figura 1. Absorción capilar: a)medición de dimensiones, b) acondicionamiento de muestra, c)medición de masa inicial, d) absorción de agua y e)medición de masa a intervalos de tiempo establecidos.

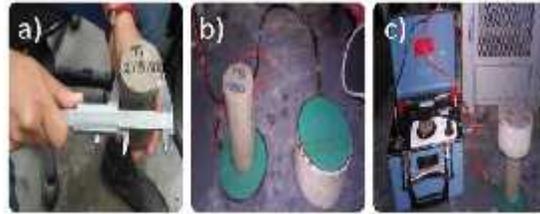


Figura 2.- Resistividad eléctrica: a) medición de dimensiones, b) preparación del equipo y c) aplicación de corriente y voltaje.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Los resultados de la presente investigación son mostrados en histogramas, los cuales representan el valor promedio, y los valores mínimos y máximo de cada mezcla son representados por las líneas inferior y superior, respectivamente, que aparecen sobrepuestas a la barra del histograma. En el ensayo de absorción capilar se obtienen 4 parámetros que nos brindan información sobre la cinética de la absorción capilar. Dichos parámetros son: resistencia a la penetración del agua (m), porosidad efectiva (ϵ), absorción capilar (S) y su coeficiente (K).

En la Fig. 3 se presentan los resultados correspondientes al parámetro m, los cuales indican que los morteros con sustituciones de 5, 10 y 30% de PN presentan mayor resistencia a la penetración del agua que el mortero control, lo cual significa que la incorporación de perlita natural en dichos porcentajes confiere cierta impermeabilidad al mortero.

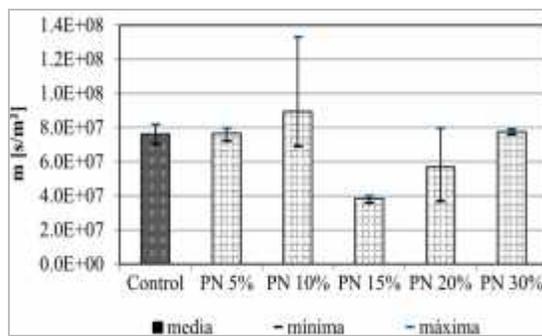


Figura 3. Resistencia a la penetración del agua.

En las figuras 4 y 5, se muestran los resultados correspondientes a los parámetros K y S, los cuales son inferiores al testigo en las sustituciones de 5,10 y 30%. Además, se aprecia que de acuerdo con los criterios de evaluación establecidos en la Red DURAR, la absorción capilar de todos los morteros evaluados en esta investigación no es recomendable en ningún medio si su espesor de recubrimiento es de 30mm, ya que $S > 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$; sin embargo, se aprecia que PN 5,10 y 30% presentan valores muy próximos a este límite (CYTED, 1998).

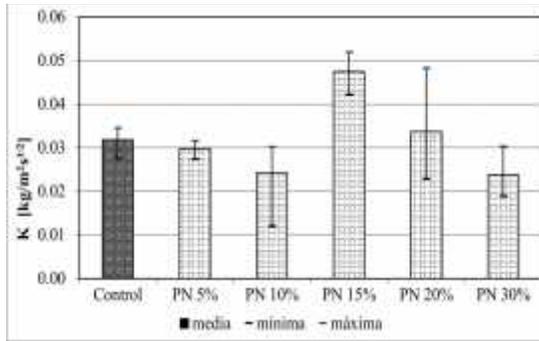


Figura 4. Coeficiente de absorción capilar

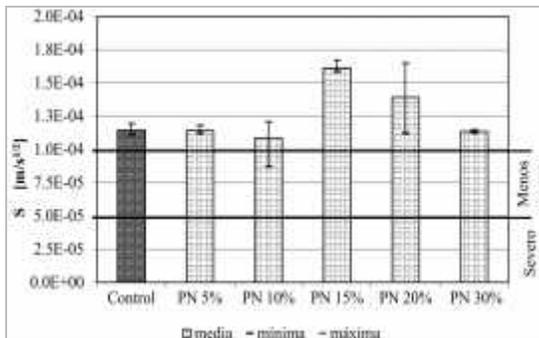


Figura 5. Absorción capilar

En la Fig. 6 se presentan los resultados de porosidad efectiva, los cuales muestran que la incorporación de PN en porcentajes de 5, 10, 20 y 30% es recomendable debido a que disminuye la porosidad en los morteros. La porosidad efectiva de los morteros de PN 10 y 30% fue de 21.78 y 20.88 respectivamente, mientras que la del control fue de 27.68%. También se aprecia que todos los morteros evaluados presentan porosidad efectiva inferior a la asociada a morteros con relación A/C de 1.00 (Neville & Brooks, 2010). Sin embargo, los concretos con porosidad superior al 15% presentan durabilidad inadecuada de acuerdo con los criterios de la Red DURAR (CYTED, 1998).

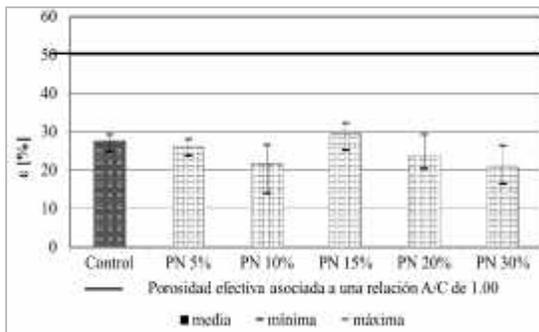


Figura 6. Porosidad efectiva

Finalmente, son presentados los resultados de resistividad eléctrica en estado húmedo, los cuales son mostrados en la Fig. 7, así como los límites establecidos de riesgo de corrosión en la Red DURAR. Los morteros que presentaron resistividades superiores al mortero control fueron PN

10, 20 y 30%, cuyos valores fueron 50.08, 36.49 y 92.15 K Ω -cm, respectivamente; mientras que la del control fue de 30.88k Ω -cm. Tomando en cuenta los criterios de la Red DURAR, todos los morteros evaluados presentan un riesgo de corrosión moderado (CYTED, 1998). Sin embargo, de acuerdo con los criterios de Vassie, Schiessel y Raupach, la corrosión es poco probable cuando $> 20K\ \Omega$ -cm, mientras que para Polder y Rodríguez esto se logra con resistividades de 50-100K Ω -cm (Bermúdez, 2007).

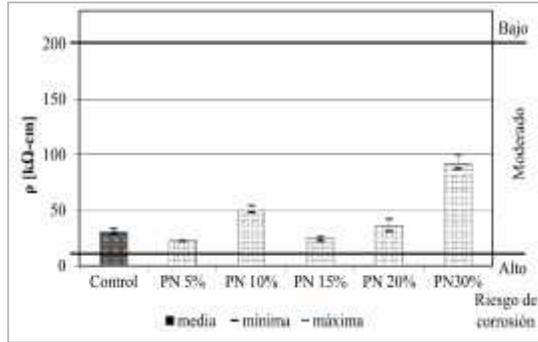


Figura 7. Resistividad eléctrica

Los resultados arrojados por ambos ensayos son congruentes, ya que en todos los parámetros calculados el mejor comportamiento corresponde a los morteros de 10 y 30% de PN. Sin embargo, aunque los resultados son prometedores en ambos ensayos, sería conveniente utilizar más muestras en el ensayo de absorción capilar debido a que hubo mucha variabilidad de resultados entre muestras.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de absorción capilar y resistividad eléctrica puede concluirse que el efecto de la perlita natural en las propiedades físicas de los morteros es benéfico, ya que incrementa la resistividad eléctrica y la impermeabilidad y disminuye la absorción capilar y porosidad efectiva de éstos, lo cual significa que disminuye el riesgo de corrosión en las estructuras de concreto reforzado y con ello provee durabilidad. Aunado a lo anterior, la utilización de PN como sustituto del CP trae beneficios medio ambientales, ya que de ser utilizada en la elaboración de morteros, el consumo de CP disminuiría.

5. REFERENCIAS

Arreola, M. (2013). Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto. Morelia.

ASTM C128-04. (2004). Standard test method for density (specific gravity), and absorption of fine aggregate.

ASTM C618-03. (2003). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

ASTM C778-02. (2002). Standard specification for standard sand.

- Benhelal, E., Zahedi, G.E. & et al. (2012). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production* 51, 142-161.
- Bektas, L., Turanlı, L. & Monteiro, P. (2005). Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 35, 2014-2017.
- Bermúdez, M.A. (2007). Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Madrid. 118.
- Erdem, T., Meral, C., Tokyay, M. & Erdogan, T. (2007). Use of perlite as a pozzolanic additions on producing blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 29, 13-21.
- Federación Interamericana del Cemento (FICEM). (2013). Informe estadístico. Bogotá. 43.
- Neville, A.M. & Brooks, J.J. (2010). *Concrete technology*, (England: Pearson Education Limited), 2da. ed., 105.
- Newman, J. & Choo, B.S. (2003). "Calcium aluminate cements". *Advanced concrete technology*, (England: ELSEVIER), 1ra. ed., 81-82.
- NMX-C-071-ONNCCE-2004. (2004). Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. (2004). Masa volumétrica.
- NMX-C-077-ONNCCE-1997. (1997). Análisis para concreto.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- NMX-C-084-ONNCCE-2006. (2006). Partículas más finas que la criba 0.075mm (No. 200) por medio de lavado.
- NMX-C-088-ONNCCE-1997. (1997). Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino.
- NMX-C-148-2010. (2010). Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004. (2004). Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino.
- NMX-C-166-ONNCCE-2006. (2006). Contenido de agua por secado.
- Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). (1998). "Descripción de métodos de ensayo". Red DURAR: Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. 85-136.

Morteros base cemento con adiciones de almidón para un mejor desempeño ante eventos físicos y químicos.

M. A., Villanueva Guzmán¹, E. M., Alonso Guzmán¹, W., Martínez Molina¹, A. A., Torres Acosta², C. Lara Gómez¹; H. L. Chávez García¹.

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

²Instituto Mexicano del Transporte, México.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) especie endémica de nuestro país, así como algunas otras; pareciera que esta planta no guarda relación alguna en la industria de la construcción, pero debido a algunas investigaciones, en las cuales se han incluido pruebas mecánicas experimentales, para comparar los beneficios que le incide el uso de Almidón al mortero. Es así, como nos hemos dado a la tarea de revisar el comportamiento de las mezclas con adición de dicho material, es decir, si los beneficios son mayores que el mortero simple. La adición de Almidón que se realizó fue a partir de investigaciones que ya se han realizado anteriormente en el Departamento de “Resistencia de Materiales” del “Laboratorio de Materiales” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



http://www.aphotoflora.com/g_zea_mays_maize_corn.html

Figura 1. Campo de cultivo de Maíz.

Se define como mortero a la pasta resultante de la mezcla de cemento, arena y agua, en algunos casos se pueden emplear aditivos u otras sustancias que le confieran beneficios a la mezcla, como es el caso de puzolanas (resistencia a sufrir daños como eflorescencia, carbonatación, ataque por sulfatos, etcétera), siendo este caso (puzolana) el del Almidón, la cual se le agregó a la mezcla de esta pasta, como parte del material cementante. Siendo dos concentraciones las que se probaron (debido a los resultados que se llevaron a cabo en experimentaciones pasadas) el 2% y 5% de sustitución en peso del producto cementante (cemento).



<http://productosquefuncionan.net/remedios-caseros-para-una-piel-joven-y-hermosa/.html>

Figura 2. Almidón

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Como antecedentes de pruebas preliminares a este artículo se tienen diversas publicaciones como son las siguientes, Publicación Técnica 326 (por parte del IMT), tesis de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, entre otras.

El aspecto fundamental a analizar el aporte de esta puzolana es respecto a la “Durabilidad” del mortero, sin perder de referencia los esfuerzos máximos permisibles de una mezcla de mortero normal.

Para poder realizar las mezclas se realizaron dosificaciones en base a lo que rige la norma ASTM-061 2015, en donde viene referenciado que para realizar mezclas la relación que guarda el agregado pétreo (arena) con respecto al material cementante deberá ser de 2.75, con 1000 g de material cementante como cantidad establecida y 2750 g de arena.

La norma ASTM-061 2015 dicta que se deben de realizar la mezcla ajustando la cantidad de agua hasta que en la mesa de fluidez (prueba) tengas una expansión (fluidez) de $110\% \pm 5\%$, esto medido con el Vernier que viene de manera predeterminada para esta prueba.



Figura 3. Prueba de fluidez realizada a una de las mezclas

Como es conocido para la mayoría de las investigaciones, se realiza una mezcla control, es decir, esta mezcla constará únicamente de cemento, arena y agua, la cual servirá para llevar un control de los datos y comparar si hay beneficios con las adiciones de Almidón, de la misma manera esto viene establecido en la norma ASTM-C-618/2012. La obtención de la relación A/C (Agua/Cemento) de 0.45, ya que se tenían unos datos preliminares de otros materiales, cabe destacar que esto se hizo con la mezcla de control, para que las mezclas tuvieran la misma relación A/C y así poder compararlas, con la diferencia que las mezclas con Almidón llevarían aditivo fluidificante para cumplir con el parámetro de fluidez que rige la norma.

Las cantidades finales de materiales por mezcla son las que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Cantidades a reemplazar de Almidón en el material cementante.

Material reemplazado en una mezcla de 1 kg de mortero	Cantidad en porcentaje	Cantidad en peso (g)
---	------------------------	----------------------

Almidón (MZ 2)	2%	20
Almidón (MZ 5)	5%	50

Tabla 2. Dosificaciones para las diferentes mezclas de mortero

Características de una mezcla de mortero	Cantidades		
	Control	MZ 2%	MZ 5%
Cemento CPC-30R-RS (g)	1000	980	950
Arena (g)	2750	2750	2750
Agua (mL)	680	680	680
Relación Agua/Cemento (A/C)	0.68	0.68	0.68
Almidón (g)	-	20	50
Aditivo Fluidificante (g)	-	1	2

El aditivo que se utilizó para elaborar las mezclas es en forma de polvo y requiere de 30 minutos para reaccionar con el agua (únicamente presencia de aditivo y agua), así es que las mezclas se hicieron en un lapso de 30 minutos en lo que transcurría el tiempo de reacción del aditivo.

Para realizarle las pruebas de resistencia mecánica (Compresión simple, y Tensión indirecta) se realizaron dos diferentes tipos de especímenes, cubos de 5cm x 5cm x 5cm para el caso de la resistencia a la Compresión simple, guiándonos en lo que dicta la norma ASTM-C-109/2012 y cilindros de 5 cm de diámetro x 10 cm de altura para el caso de la Tensión indirecta. Para el caso de las pruebas químicas se tomó en cuenta la prueba de Ataque por sulfatos, para la cual se realizaron cubos iguales a los del caso de Compresión simple. La norma ASTM-C-88/2012 nos señala el procedimiento para llevar a cabo esta prueba de durabilidad (ataque por sulfatos).

El proceso de llenado para el caso de los cubos (Figura 4) fue en 2 capas de material, con 8 golpes por capa con un pisón de acrílico para efectuar la expulsión del aire atrapado y enrasar al tope del molde, conforme a la norma ASTM-C-109-M-I/2012.



Figura 4. Elaboración de especímenes cúbicos de mortero.

En el caso del llenado para los especímenes de forma cilíndrica (Figura 5) se realizó en 2 capas en donde se le dieron 15 golpes (penetraciones) de manera helicoidal por capa con una varilla de metal punta de bala, y al igual que los especímenes cúbicos, se enrasa a la superficie del molde, esto es respecto a la norma NMX-083-ONNCCE-2002.



Figura 5. Elaboración de especímenes cilíndricos de mortero.

Estos procedimientos se llevaron a cabo para cada una de las mezclas que se desean probar (Control, Almidón 2% y Almidón 5%).

2.1 Ataque por sulfatos.

Para poder llevar a cabo esta prueba se deben de someter los especímenes a ciclos de exposición a cristales de sulfato, que para el caso de esta experimentación se utilizó Sulfato de Sodio, y según a lo que dicta la norma, se exponen los especímenes a ciclos dentro del sulfato (Figura 6) con una duración variable (10 días aproximadamente para el caso de este proyecto) ya que se cuenta cada ciclo hasta que los especímenes adquieran un peso constante.



Figura 6. Prueba de Ataque por sulfatos a especímenes de mortero

Las edades de los especímenes para las pruebas mecánicas fueron 7, 28, 45 y 90 días. Para el caso de la prueba química de Ataque por sulfatos, la edad de prueba de las mezclas fue a 90 días, conforme a lo que se describió del proceso experimental de la norma ASTM-C-88/2012, y según esta norma la prueba se detiene cuando existe una pérdida de masa del 0.5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de someter a carga a cualquiera de los especímenes (cubos y/o cilindros) se toman datos característicos, medidas reales del espécimen, masa, volumen y masa sumergida, esto con el fin de poder analizar el esfuerzo permisible y gravedad específica del mismo.

La manera de probar los especímenes fue en una máquina universal de prueba, para el caso de los cubos se selecciona las caras que estén más lisas para que vayan como cara inferior (de apoyo) y se comienzan a cargar de manera constante para la prueba (Compresión simple) hasta que el espécimen falle.

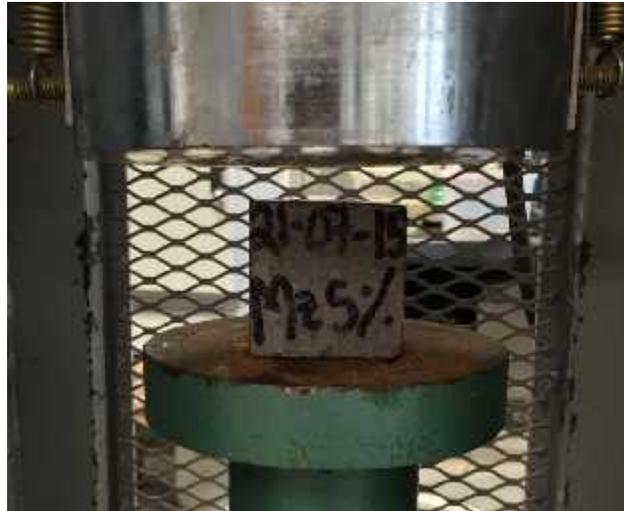


Figura 7. Prueba de Compresión simple en cubos

La prueba de “Tensión indirecta”, o también conocida como “Brasileña”, se le realiza a los cilindros sometiéndolos a la carga de manera longitudinal, es decir, a lo largo del cilindro (Figura 8), se aplica una carga en la cara superior e inferior, lo cual genera en las caras laterales esfuerzos de tensión.



Figura 8. Prueba de Tensión indirecta

Se debe de tener cuidado con las cargas aplicadas para el caso de estas pruebas no sean aplicadas de manera súbita, porque nos puede generarnos falla por impacto del espécimen, en especial para el caso de la prueba de “Tensión indirecta” para la cual las cargas permisibles son menores.

4. RESULTADOS.

Como antes se hizo mención (Tablas 1 y 2) se le denominó con la nomenclatura de MZ 2% a la sustitución de Almidón de 2% en peso y como MZ 5% a la sustitución de Almidón de 5% en peso, se comparan contra la mezcla de especímenes de control llamada mezcla “Testigo”. Los resultados obtenidos para la prueba de compresión simple se muestran a continuación (Figura 9).

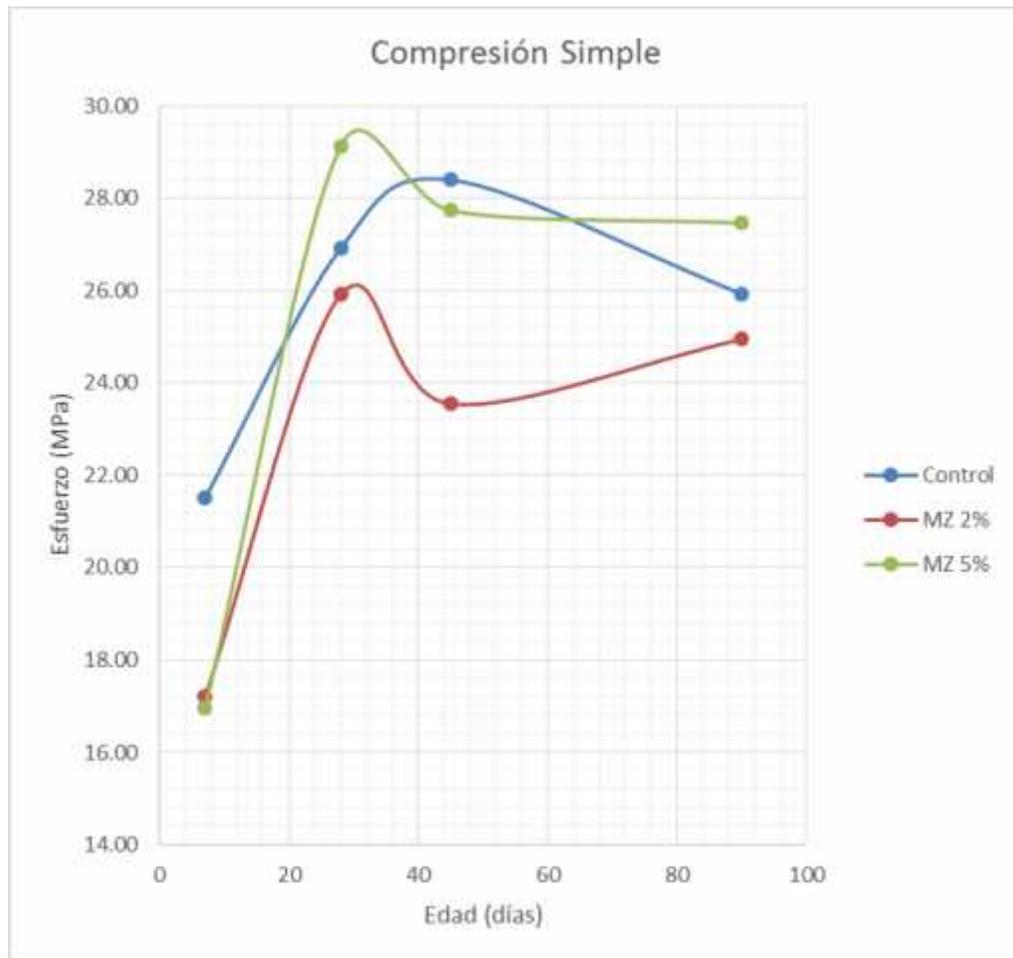


Figura 9. Resultados de la prueba de compresión simple.

Podemos observar que los especímenes de ambas de las sustituciones de Almidón tienen una resistencia menor a la de la mezcla de control a la edad de 7 días, pero su comportamiento es similar, incrementan a los 28 días, pero únicamente la sustitución de Almidón 5% adquiere una resistencia mayor a la del espécimen del control, aunque al final del tiempo de prueba (90 días) las resistencias de las diferentes mezclas estuvieron muy cercanos sus valores de resistencia.

Del análisis de esta gráfica podríamos mencionar que la adición de Almidón 5% parece más redituable, ya que no interfiere en las características normales de la mezcla, nos brinda un beneficio de resistencia mayor que de la mezcla control.

En la siguiente gráfica podemos encontrar los resultados de la prueba de “Tensión indirecta” (Figura 10) que nos arrojaron de las mismas edades, 7, 28, 45 y 90 días.

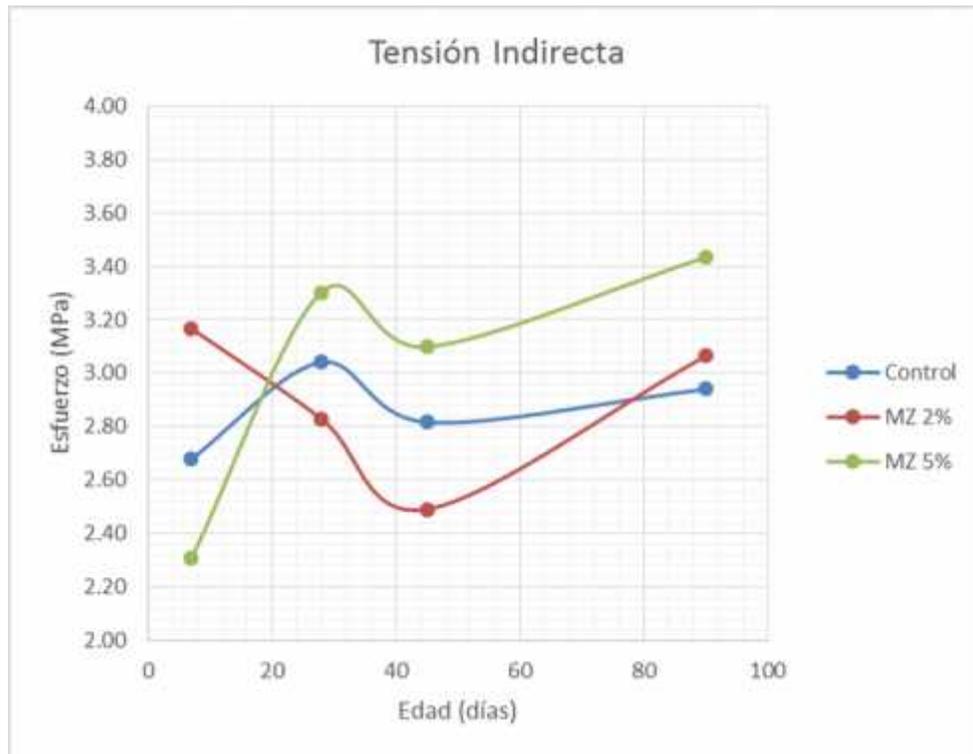


Figura 10. Prueba de Tensión indirecta

Podemos observar que el comportamiento de esta gráfica tiende a ser un poco más complejo, ya que la mezcla MZ 2% comienza por encima del valor alcanzado por la mezcla de control a la edad inicial de 7 días, caso contrario al de la mezcla MZ 5% la cual comienza por debajo de la resistencia de la mezcla control a la edad de 7 días (primer edad de prueba), pero con el pasar de los días las mezclas cambian su comportamiento, siendo de manera notoria la mezcla MZ 5% la cual cuenta con resistencias mayores a la de la mezcla control a partir de la edad de 28 días, para el caso de la mezcla MZ 2% para las edades de 28 y 45 días su resistencia es menor, pero al alcanzar la edad de 90 días su resistencia es mayor a la de la mezcla control, en un aproximado del 10% mayor.

Para el caso de esta prueba volvemos a observar que la mezcla que se vuelve dar resultados satisfactorios es la de la sustitución de Almidón 5%, pero siendo ya aceptable el valor de resistencia a 90 días de la sustitución de Almidón 2%.

Los resultados de las pruebas anteriores se podrían tomar como preliminares, o resultados de una primera etapa de aceptación del material, debido a que el principal interés de la experimentación

es garantizar una durabilidad del mortero, por lo tanto el parámetro aceptable y determinante es el que se obtuvo de la prueba de “Ataque por Sulfatos”, de la que debemos insistir que se detiene hasta que los especímenes hayan sufrido una pérdida del 0.5% de masa, lo que hace referencia a desgaste del material, lo cual aplicado en un caso ingenieril resultaría como la exposición de las piezas de mampostería de un muro, acero de refuerzo de un elemento armado.

Siguiendo la metodología que dicta la norma ASTM-C-88/2012 se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación (Figura 11).

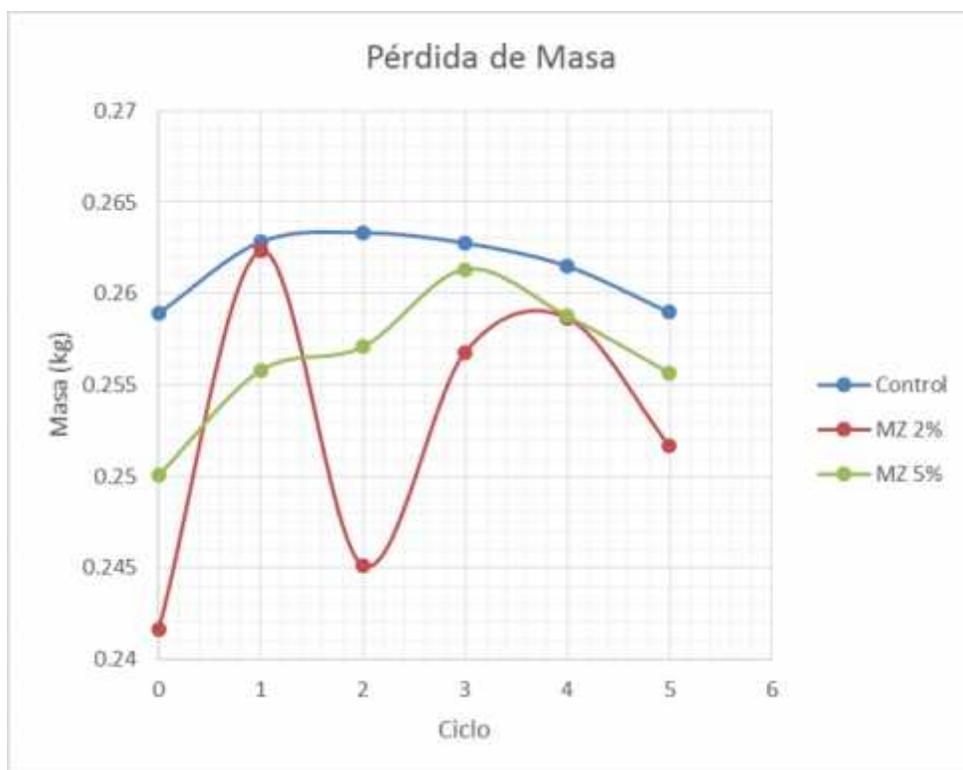


Figura 11. Resultados de la prueba de Ataque por Sulfatos (Sulfato de Sodio).

Conforme a lo mostrado en la gráfica de resultados (Figura 11) podemos observar que para el caso de la mezcla MZ 2% presenta cambios muy drásticos en la masa de los especímenes, esto se debe a que en el primer ciclo adquiere masa por la capacidad de absorción que le confieren los poros con los que cuenta la muestra (en el caso de todas las mezclas para el primer ciclo), pero sufre una pérdida súbita de masa en el ciclo 2, debido a que ocurrió la degradación del mortero, y se observa de manera más clara para el ciclo 3, ya que vuelve a incrementar su masa porque vuelve a absorber sulfato y llena los vacíos dentro de la mezcla, para la mezcla MZ 5% podemos observar que su comportamiento es más estable y aún en el ciclo 5 no ha sufrido la pérdida del 0.5% de su masa, por lo cual se trata de una sustitución “durable”, pero aún con todo esto podemos observar que los especímenes de control cuentan con un mejor comportamiento.

5. CONCLUSIONES

Las sustituciones de Almidón en el mortero como material cementante resultan adecuadas en su capacidad estructural, ya que no se pierde capacidad de resistencia a Compresión simple y Tensión indirecta en la sustitución del 5% en peso, para el caso de la sustitución de 2% se pierde de manera considerable la resistencia a compresión, pero en la resistencia a tensión la sustitución se encuentra por encima de la mezcla control con la cual los estamos comparando.

En cuanto a la prueba de durabilidad (eventos químicos) a los que se pudiera estar sometido el mortero, claramente se demostró que la sustitución del 2% no es resistente, ya que sólo bastó un ciclo para que perdiera más del límite que nos permite la norma, en el caso de la mezcla con sustitución del 5% de Almidón pudimos comprobar que su desempeño es menor al de la mezcla control, pero le es suficiente para cumplir con lo establecido en la norma.

Otro punto a tratar de manera secundaria de este proyecto es el impacto ambiental que genera la producción de cemento, ya que esto genera una gran cantidad de emanaciones de CO₂ hacia la atmósfera y la producción del Almidón no emite tantos contaminantes a la atmósfera, además de ser un producto que se puede conseguir con facilidad en nuestro país.

Como apunte importante quedaría probar el desempeño de la mezcla a otros agentes que pondrían en peligro la “durabilidad” de la mezcla, y de manera personal verificar el comportamiento de la mezcla con sustitución del 5% a más ciclos de exposición a sulfatos hasta encontrar cuál falla primero si el control o la sustitución del 5% de Almidón.

6. AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de “Resistencia de Materiales” del Laboratorio de Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial a mi asesora Elia Mercedes Alonso Guzmán, a los demás responsables Wilfrido Martínez Molina, Andrés Torres Acosta, Cindy Lara Gómez y Hugo Luis Chávez García, de igual manera a personal del equipo de trabajo de “Resistencia de Materiales” Cipriano Bernabé Reyes y Sandra del Carmen Arguello Hernández.

Gracias a todos ellos por las facilidades con las que conté durante el periodo de estudio del proyecto.

7. REFERENCIAS

ASTM-C-061 Parámetros de la prueba de fluidez.

ASTM-C-109 Método de prueba estándar para resistencia a la compresión simple de morteros de cemento hidráulico utilizando muestras de 2 pulgadas (50 mm).

ASTM-C-109-M I/2002 Método de prueba estándar para resistencia a la compresión simple de morteros de cemento hidráulico utilizando muestras de 2 pulgadas (50 mm) Internacional.

ASTM-C-618/2012 Especificación estándar para las cenizas volantes y calcinado en bruto o puzolana natural para uso como un mineral mezcla en Portland hormigón de cemento.

ASTM-C-88 Método estándar para prueba de resistencia de agregados por ataque de Sulfato de Sodio o Magnesio.

Guzmán T., J. A. (2014). “Concreto de alta durabilidad y desempeño en infraestructura”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

NMX-C-083-ONNCCE Determinación de la resistencia a compresión de cilindros.

Torres Acosta, A. A., Celis M., C. E., Martínez Molina, W., Lomelí G., M. G. (2010). “Publicación Técnica No. 326”; Instituto Mexicano del Transporte. México.

EFICIENCIA ANTICORROSIVA DE ACERO GALVANIZADO COMO REFUERZO EN CONCRETO DE RELACIÓN A/C = 0.65 EXPUESTO A UN SUELO CONTAMINADO CON $MgSO_4$

K. Cordoba-Romero¹, A.E. Landa-Gómez¹, L. D. López León², D. Nieves M¹, F.H. Estupiñán-López³, C. Gaona-Tiburcio³, F. Almeraya-Calderón³, M. A. Baltazar-Zamora¹

¹Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

²Grupo de investigación Diseño y Construcción Sostenible, AAI, U.A.E.H, Pachuca, Hgo., México

³UANL. FIME - CIIIA. San Nicolás de los G., Nuevo León, México.

RESUMEN

La presente investigación evaluó el comportamiento electroquímico del concreto reforzado expuesto a un suelo tipo MH-arenoso, el concreto se elaboró con dos tipos de cemento CPC 30R RS y el CPC 30R, con acero de refuerzo de acero galvanizado y acero AISI 1018, los especímenes simulan estructuras en contacto con el subsuelo, como lo es la cimentación de Obras civiles como Puentes, Edificios, Pavimentos, etc. Los especímenes fueron fabricados con una mezcla de concreto de relación $a/c = 0.65$, la cual se diseñó de acuerdo al método del ACI 211.1. El suelo en donde se colocaron los especímenes se contaminó con 1%, 2% y 3% de $MgSO_4$. Los resultados obtenidos después de más de 240 días de exposición a los suelos contaminados, demostró que la velocidad de corrosión I_{corr} fue menor en los especímenes con acero galvanizado y elaborados con cemento CPC 30R RS.

Palabras clave: Suelo Fino, Corrosión, Concreto, Sulfatos de Magnesio, Potencial de Corrosión

Autor de contacto: Miguel Ángel Baltazar Zamora. (miguelbz_75@yahoo.com, mbaltazar@uv.mx)

1. INTRODUCCIÓN

Se tiene conocimiento de acuerdo a numerosas investigaciones [1,2]. que el problema de la corrosión en estructuras de reforzado es para la comunidad responsable de dichas obras civiles un problema de miles de millones de dólares, en donde la labor de investigadores, constructores y autoridades de cada uno de los países en donde se presenta dicho fenómeno ha dado como resultado que en las últimas décadas se hayan dado relevantes contribuciones para mitigar dicho problema, son muchos los trabajos y reportes que tocan el tema desde diferentes perspectivas, desde la fabricación del concreto, el uso de aditivos, materiales alternativos, etc., así también como en situ y simulando medios de contacto que deterioran el concreto de diferentes formas [3,4]. Pero también es sabido que el estudio del proceso de corrosión en concreto reforzado debido a los suelos es poco estudiado y se presenta en elementos como puede ser una pila de un puente, una zapata de un edificio, como una losa de una núcleo eléctrica etc. Es por todo lo anterior que la presente investigación trata de evaluar el la velocidad de corrosión del acero de refuerzo de concreto expuesto a un suelo fino en presencia de sulfato de magnesio, con el fin de simular las condiciones que se presentan en campo, todo para contribuir en información que contribuya a construir estructuras más durables desde sus cimentaciones.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Dosificación y Proporcionamiento de la Mezcla de Concreto

El diseño de una mezcla de concreto mediante el método del ACI 211.1 [5], es un método que se basa principalmente en las características del concreto que se requiere elaborar, como lo es la resistencia mecánica ($f'c$), el revenimiento (trabajabilidad o consistencia) tamaño máximo de agregado, contenido mínimo de cemento, etc., y con ello llevar a cabo una caracterización de las propiedades físicas de los agregados (finos y gruesos) a emplear, que ofrecen datos necesarios para utilizar en dicho método, lo que al final nos lleva a la dosificación (cantidad de materiales a utilizar) ideal para obtener un concreto de acuerdo a los requerimientos específicos requeridos. De lo anterior, la Tabla 1, resume las características físicas de los materiales utilizados en la investigación.

Tabla 1. Caracterización física de los agregados

Propiedades físicas de los materiales	Agregado Grueso Natural	Agregado Fino
Masa específica seca (Mes) gr/cm^3	2.41	2.52
Masa Volumétrica Varillada (Mvv) Kg/cm^3	1382	
Absorción (A) %	3	2.77
Módulo de Finura		2.4
Tamaño Máximo Nominal	$\frac{3}{4}$ "	

Así también la Tabla 2 muestra el proporcionamiento obtenido para elaborar la mezcla de relación $a/c = 0.65$ utilizada en la investigación. De acuerdo a lo anterior se empleó el uso de dos tipos de Cemento Portland tipo CPC 30R RS y CPC 30R [6], que son de uso común en estructuras como cimentaciones, zapatas, etc.

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

Materiales en Kg	Relación $a/c=0.65$
Agua	161.83
Cemento	316
Agregado Grueso	956
Agregado Fino	966

2.2 Caracterización del Concreto en Estado Fresco y Endurecido

La caracterización del concreto en estado fresco y endurecido se realizó de acuerdo a las normas ONNCCE y ASTM correspondientes [7-10], los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla III. Propiedades físicas y mecánicas de los concretos empleados.

Parámetro	Rel. $a/c= 0.65$
Revenimiento	11 cm
Temperatura	22.5 °C
Masa volumétrica	2216 kg/m ³
Resistencia a compresión	272 kg/cm ²

2.3 Características y Especificaciones de los especímenes de estudio

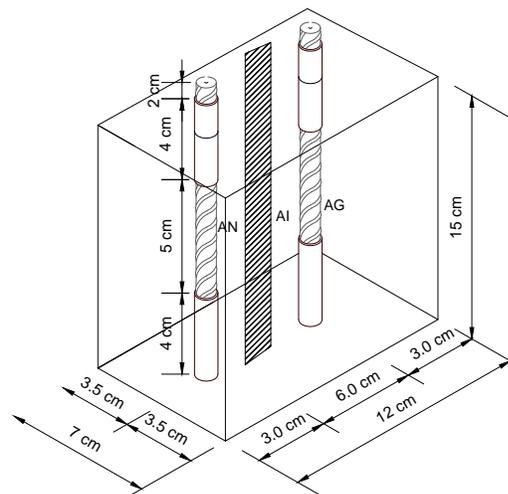


Figura 1. Dimensiones de los especímenes de prueba.

Como refuerzo se empleó barras de acero AISI 1018 (AN) y acero galvanizado (AG), ambos de 3/8” de diámetro, como contraelectrodo (AI) para la evaluación electroquímica se utilizó una barra de acero inoxidable la cual se colocó en el centro de cada especímenes, las características de los especímenes se observan en figura 1.

Las barras de acero AISI 1018 y galvanizado fueron preparadas de tal manera que no estuvieran impurezas en ellas, además se delimito el área a evaluar cubriendo el resto con una pintura anticorrosiva. La especímenes se fabricaron como lo indica la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 [11]. A los especímenes se le asignó una nomenclatura, misma que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Nomenclatura de especímenes de prueba.

Relación a/c=0.65	
61MRC	61MRG
61MRSC	61MRSG
62MRC	62MRG
62MRSC	62MRSG
63MRC	63MRG
63MRSC	63MRSG

- 6 indica concreto de relación a/c= 0.65
- 1%, 2% y 3% indican el porcentaje de agente agresivo en el suelo
- M significa MgSO₄ como agente agresivo en el suelo de estudio.
- RS Elaborado con cemento CPC 30R RS y R con cemento CPC 30R.
- G para el refuerzo de acero Galvanizado y C para el acero 1018.

El suelo de estudio fue un Limo de Alta Plasticidad (MH) de acuerdo al SUCS [12], después de la etapa de curado los especímenes en dicho suelo el cual se contaminó con 1, 2 y 3% de MgSO₄ para evaluar su agresividad corrosiva generada por el grado de contaminación presente, este arreglo experimental simula un medio agresivo en las cimentaciones de las estructuras de concreto como puentes, edificios etc.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Potencial de Corrosión

El monitoreo de potencial de corrosión de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C876-09 [13] así como su interpretación, solo agregando un rango más de acuerdo a la literatura [14], ver Tabla 5.

Tabla 5. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO ₄	Probabilidad de Corrosión
< - 500	Corrosión Severa
< -350	90% de Prob. de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Prob. de Corrosión

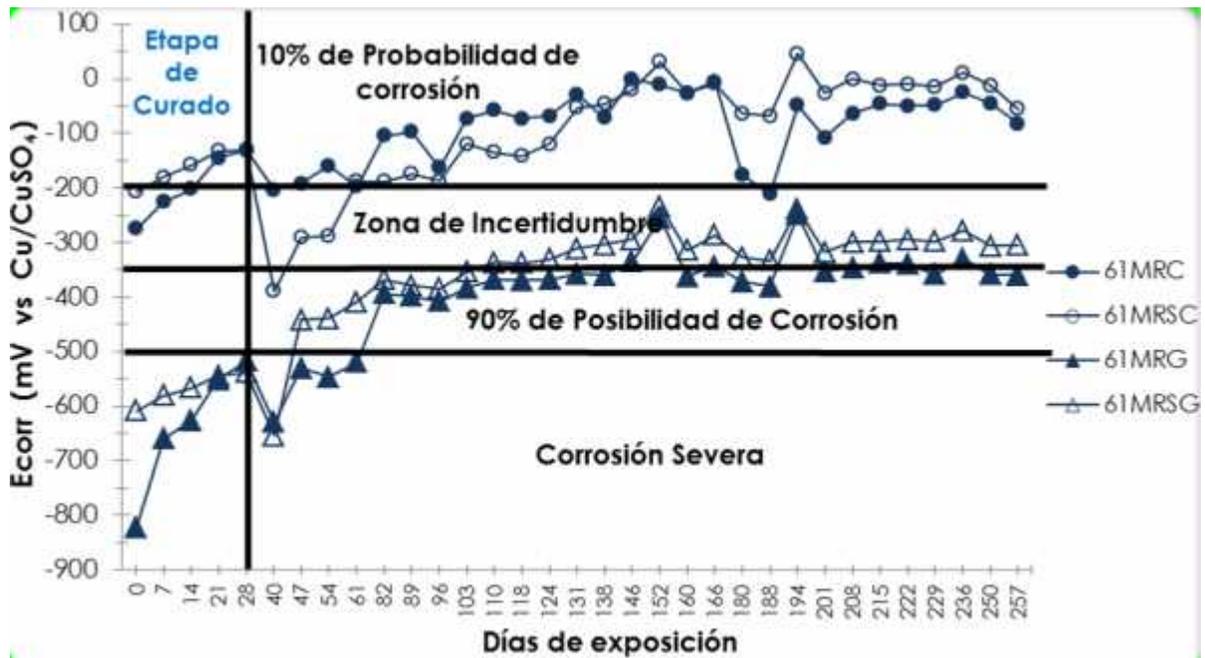


Figura 2. E_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 1% de $MgSO_4$

De acuerdo a la figura 2 se tiene que los especímenes de concreto reforzados con acero AISI 1018, 61MRC y 61MRSC, presentan un comportamiento homogéneo, con una tendencia a valores de E_{corr} más positivos de -200 mV, después del día 61 de monitoreo, presentando valores de 0 mV en el día 152, para ambos especímenes no influyendo el tipo de cemento utilizado, al final del monitoreo, día 201 al 257 presentan valores entre 0 mV y -100 mV, se tiene que durante todo el periodo de exposición en un suelo tipo MH con 1% de $MgSO_4$, dichos especímenes presentaron un 10% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876-09. Para el caso de los especímenes reforzados con acero galvanizado 61MRG y 61MRSG, también presentan un comportamiento de valores más positivos de E_{corr} con el paso del tiempo, pero en el rango de -450 y -550 mV en los días 47 a 61, para presentar valores que indican incertidumbre de corrosión, valores de E_{corr} entre -300 y -350 mV, se presentan valores un poco más negativos para el espécimen elaborado con el cemento normal CPC 30R, lo que podría indicar una pequeña influencia del cemento en la termodinámica de corrosión para estos especímenes.

La figura 3 muestra el comportamiento de los especímenes de estudio al ser expuestos al suelo tipo MH pero con una concentración de 2% de $MgSO_4$, se observa un comportamiento muy similar a lo reportado en los especímenes cuando están expuestos a un suelo MH con 1% de agente agresivo, con una tendencia a valores más positivos y presentando valores de E_{corr} menores a -200 mV desde el día 82 hasta el final del monitoreo para los especímenes reforzados con acero AISI 1018, 62MRC y 62MRSC, no influyendo el tipo de cemento en su comportamiento, ya que como se observa en la figura los valores de E_{corr} de ambos especímenes durante todo el tiempo de exposición son casi idénticos. Para el caso de los especímenes reforzados con acero galvanizado, 62MRG y 62MRSG, presentan un comportamiento muy similar a los evaluados en la figura 2, presentando valores de E_{corr} del día 100 hasta el último día de monitoreo de entre -200 y -350 mV, lo que indica de acuerdo a la norma, que se tiene incertidumbre de la presencia de corrosión en el refuerzo.

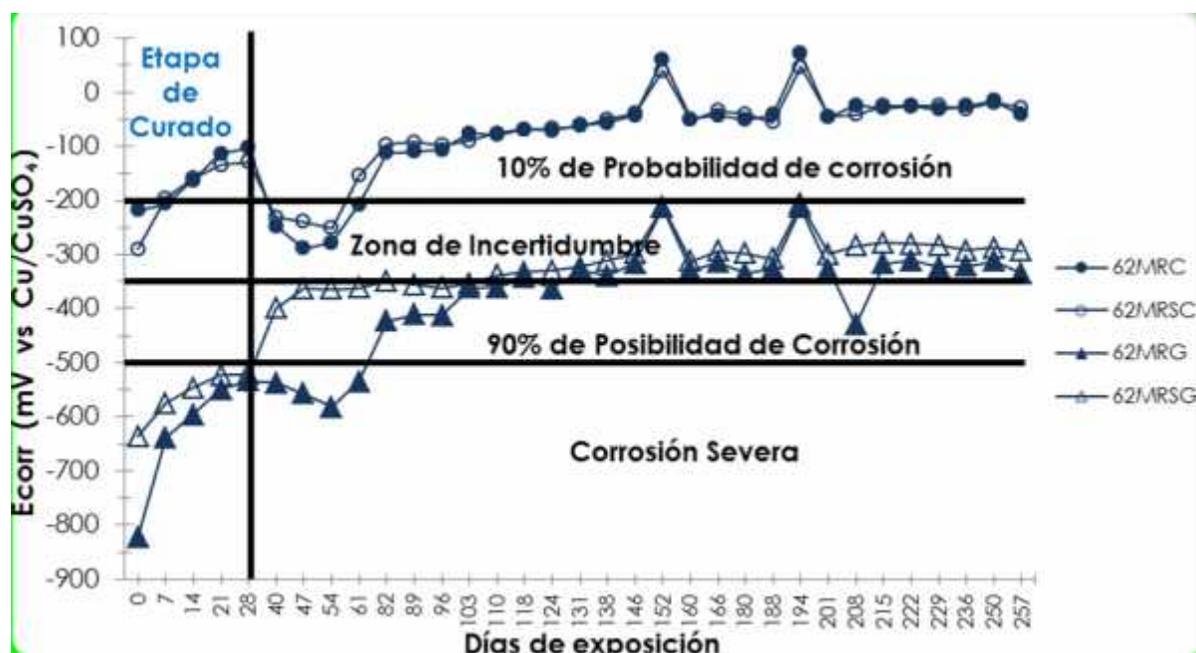


Figura 3. E_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 2% de $MgSO_4$

En la figura 4, a diferencia de las figuras 2 y 3, se puede observar como los valores de E_{corr} reportados por los especímenes reforzados con acero galvanizado, 63MRG y 63MRSG, muestran un beneficio del uso del cemento resistente a sulfatos, CPC 30R RS, al presentar el espécimen 63MRSG valores de E_{corr} entre -200 y -350 mV, desde el día 61 hasta el final del monitoreo, lo que indica incertidumbre de la presencia de corrosión, a diferencia del elaborado con cemento normal, 63MRG, presentado valores de E_{corr} de -400 mV en el mismo periodo, indicando de acuerdo a la norma ASTM C-876-09, un 90% de probabilidad de corrosión, lo que indica la importancia del grado de concentración del agente agresivo en los suelos para el desarrollo de la corrosión en elementos de concreto de refuerzo que estarán en contacto con el suelo, como lo son las cimentaciones de puentes, edificios, plantas de tratamientos, pavimentos, etc.

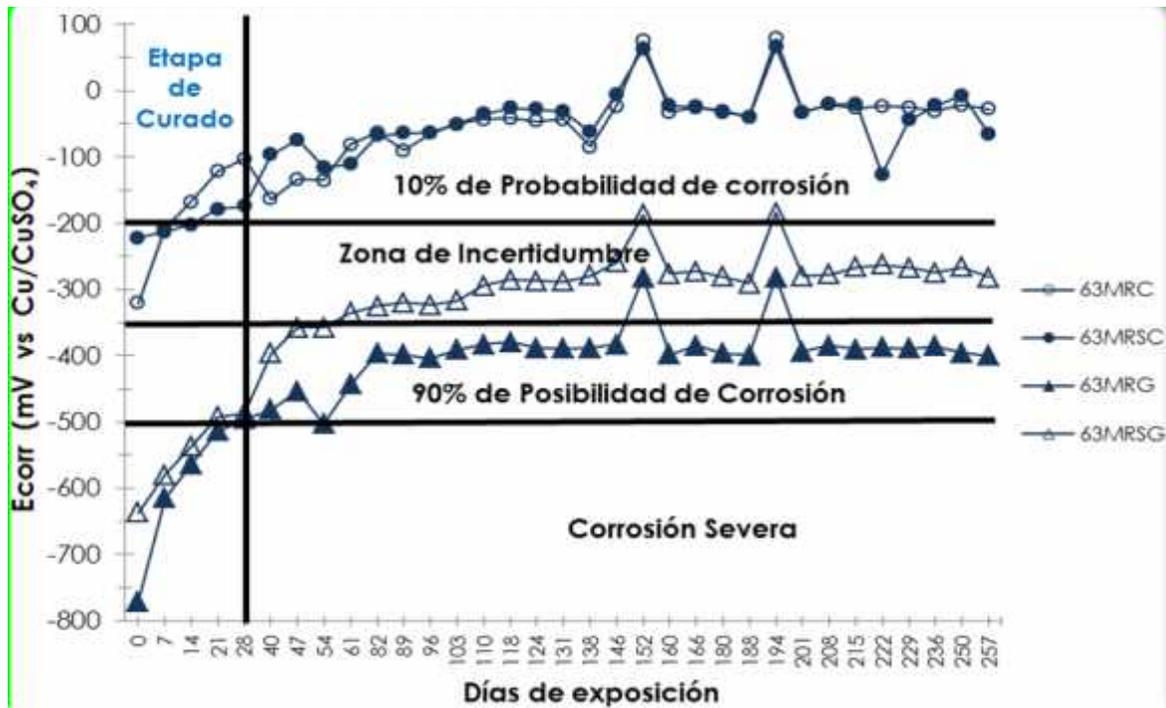


Figura 4. E_{corr} , especímenes de relación $a/c=0.65$ en 3% de $MgSO_4$

3.2 Cinética de Corrosión mediante LPR

El criterio que se empleó para evaluar el nivel de corrosión fue mediante la técnica de RPL y la interpretación de los resultados fue de acuerdo al Manual de la Red DURAR [15], dicho criterio indica cuatro niveles de corrosión, ver tabla 6.

Tabla 6. Nivel de Corrosión de acuerdo a la I_{corr} .

Velocidad de Corrosión (I_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de Corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5-1	Elevada
> 1	Muy Elevada

Al analizar la figura 5, la cual presenta los resultados de la cinética de corrosión o velocidad de corrosión de los especímenes expuestos a un suelo MH con 1% de $MgSO_4$ como agente agresivos, se observa un periodo de activación de todos los especímenes, tanto los reforzados con acero AISI 1018 y los reforzados con acero galvanizado, periodo que dura los primeros 96 días, pero en donde se llegan a presentar valores de I_{corr} que indican un nivel de corrosión moderado, elevado a muy elevado, asociándose a la formación de la capa pasiva en dichos especímenes, para

después del día 100 presentar los cuatro especímenes una tendencia a valores de icor menores con el paso del tiempo, pasando de valores de 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta llegar a valores al final de monitoreo de entre 0.08 y 0.06 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que indica de acuerdo al manual de la Red DURAR, un nivel de corrosión despreciable, indicando que 1% de MgSO_4 no presenta problema para que los concretos de las características estudiadas en la presente investigación presente buen desempeño contra la corrosión por sulfatos.

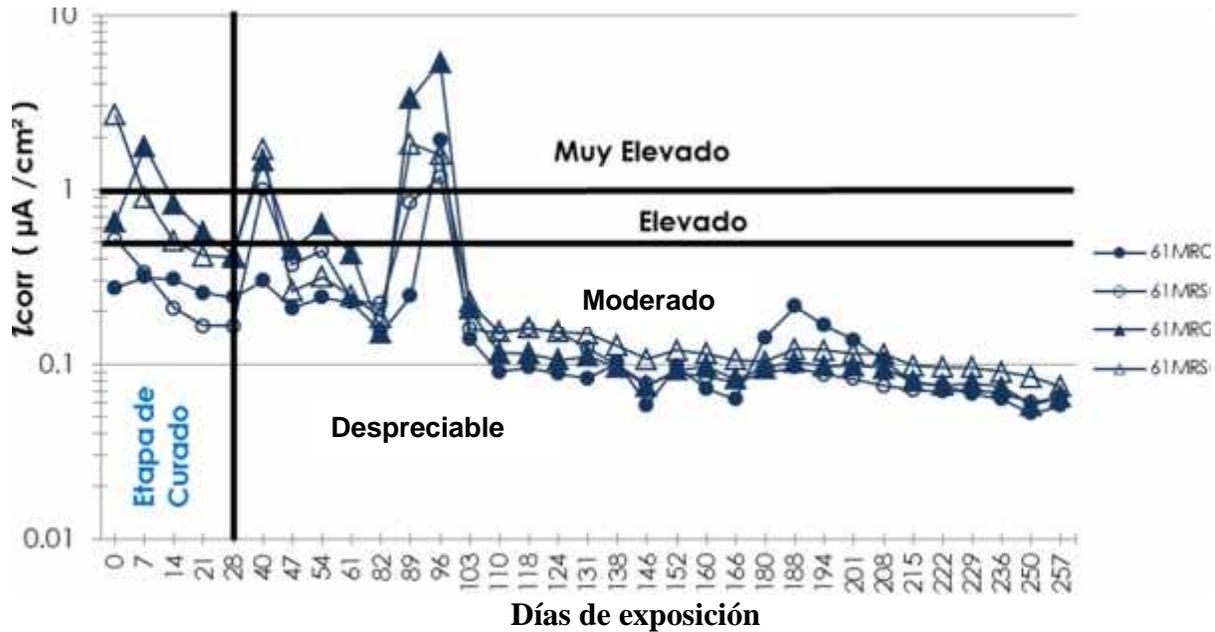


Figura 5. I_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 1% de MgSO_4

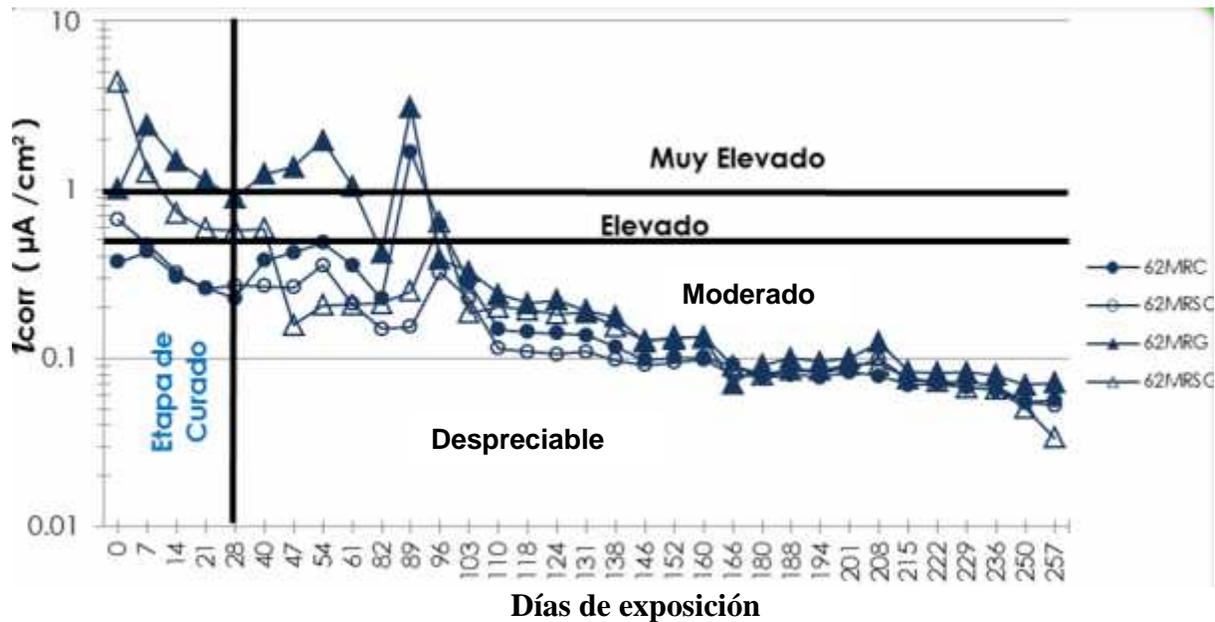


Figura 6. I_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 2% de MgSO_4

Para el caso de los especímenes expuestos a un suelo MH y con una concentración de $MgSO_4$ de 2%, Figura 6, se presenta un comportamiento en la velocidad de corrosión o cinética de corrosión similar al analizado en la figura 5, con un periodo en los primeros 100 días con valores de I_{corr} de 0.2 y 0.5 $\mu A/cm^2$ que indican un nivel de corrosión de moderado para el espécimen 62MRC, y valores de 1 y 2 $\mu A/cm^2$ para el espécimen 62MRG, pero después de ese periodo todos los especímenes presentan una tendencia a valores de I_{corr} menores con el paso del tiempo, pasando de valores de 0.15 a 0.4 $\mu A/cm^2$ que indican un nivel de corrosión moderado hasta el día 160, para seguir con la tendencia a valores por debajo de 0.1 $\mu A/cm^2$ llegando al final del monitoreo a valores de 0.07 $\mu A/cm^2$ lo que indican un nivel de corrosión despreciable. Se observa como en la figura 5, que los concretos diseñados presentan un buen desempeño contra la corrosión cuando la concentración es 2% de $MgSO_4$ como agente agresivo.

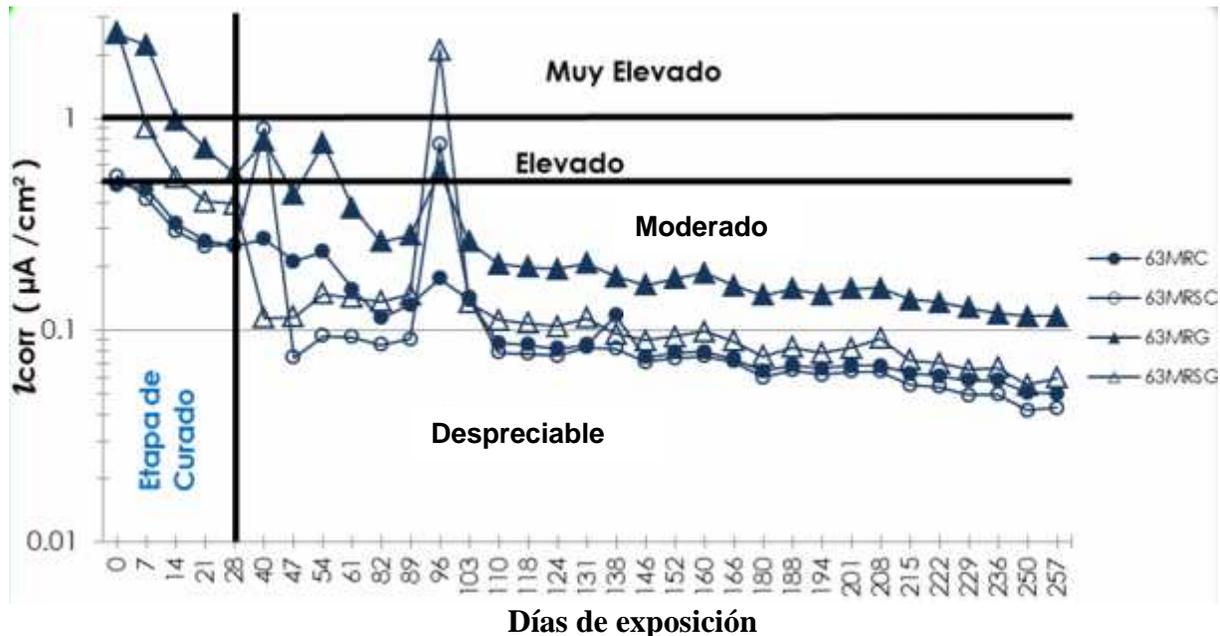


Figura 7. I_{corr} , especímenes de relación a/c=0.65 en 3% de $MgSO_4$

Por último para el caso de la figura 7, se observa un comportamiento similar del presentado en los especímenes expuestos a un suelo con 1 y 2% de $MgSO_4$ como agente agresivo, con un periodo de activación o formación de la capa pasiva de los primeros 100 días, para presentar una tendencia a valores de I_{corr} por debajo de 0.1 $\mu A/cm^2$ para casi todos los especímenes, lo que indican un nivel de corrosión despreciable, se puede detectar un mejor desempeño de los especímenes elaborados con el cemento resistente a sulfatos, para ambos aceros tanto el acero AISI 1018 y el galvanizado, sin embargo el espécimen 63MRG, presenta también la tendencia a valores más bajos de I_{corr} pero solo pasa de 0.2 $\mu A/cm^2$ en el día 100 a 0.11 $\mu A/cm^2$ en el último día de monitoreo, siendo el único espécimen que presenta nivel de corrosión moderada, aunque con una tendencia a presentar valores de I_{corr} menores a 0.1 $\mu A/cm^2$ al igual que los demás especímenes.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos al evaluar la corrosión de concretos expuestos a un suelo tipo MH contaminado con 1, 2 y 3 % de MgSO_4 como agente agresivo, se tienen que para concentraciones de 1 y 2 %, el desempeño contra la corrosión por sulfatos de los especímenes es bueno, presentando un mejor desempeño los especímenes elaborados con cemento CPC 30R RS, con valores de I_{corr} por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lo que indica un nivel de corrosión despreciable. Para el caso del suelos con un 3% de MgSO_4 , se observa un pequeño grado de agresividad, pero el cual es mínimo, presentando todos los especímenes al final del monitoreo valores de I_{corr} menores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a excepción del espécimen 63MRG el cual presenta al final del estudio I_{corr} de $0.11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, asociado al nivel de corrosión presente pero en el recubrimiento del zinc, lo que indica un protección total del acero al cual recubre.

5. AGRADECIMIENTOS

M.A. Baltazar-Zamora agradece al Sistema Nacional de Investigadores de CONACYT-México por el apoyo a la realización del proyecto. Se agradece también a C.M. Hernández-Domínguez, E. González V., y a ASPHALTPAVE S.A. de C.V. por el apoyo técnico.

6. REFERENCIAS

ACI, 2004. *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1*, p. 29. Ed. IMCYC, México.

ASTM C 1064 / C1064M – 08, *Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM, USA. (2008).

ASTM C 876-09, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete*, ASTM Volume 03.02, 2009.

Braja M. Das, *Principio de Ingeniería de Cimentaciones*, Ed. Thomson, México, 2006.

NMX-C-083-ONNCCE-2002, *Determinación de la Resistencia a la Compresión de cilindros de concreto - Método de prueba*, ONNCCE S. C., México. (2010).

NMX-C-156-2010-ONNCCE, *Determinación de Revenimiento en Concreto Fresco*, ONNCCE S. C., México. (2010).

NMX-C-159-ONNCCE-2004, “*Industria de la construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*”, México. (2004)

NMX-C-162-ONNCCE-2014, *Determinación de la masa unitaria, cálculo de rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*, ONNCCE S. C., México. (2004)

NMX-C-414-ONNCCE, *Cementos*, ONNCCE S. C., México. (2004).

Red DURAR, *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado, CYTED Program, Rio de Janeiro, (1997).*

Santiago-Hurtado G. et al., (2016). *Electrochemical Evaluation of a Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Exposed to Chlorides. Int. J. Electrochem. Sci., (11), 2994-3006-.*

Santiago-Hurtado G. et al., (2016). *Electrochemical Evaluation of Reinforcement Concrete Exposed to Soil Type SP Contaminated with Sulphates. Int. J. Electrochem. Sci., (11), 4850-4864.*

Santiago-Hurtado, G., Baltazar-Zamora, M.A. , Galindo D. A. , Cabral M, Estupiñan, P. Zambrano Robledo, C. Gaona-Tiburcio, *Int. J. Electrochem. Sci., 2013, 8, 8490.*

Troconis de Rincón O., et. al., (2016). *Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long-Term Exposure. Corrosion, 6(72), 824-833.*

Won-Song H. and Saraswathy V., “*Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review*” *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.2, Pág. 1-28, Rep. de Serbia, (2007).

Morteros base cemento con adiciones de fécula de maíz para un comportamiento favorable a eventos físicos.

L. Colín Velazquez¹, Responsable: E. M., Alonso Guzmán¹, W., Martínez Molina¹, H. L. Chávez García¹, A. A., Torres Acosta², S. C. Arguello Hernández¹, J. A. Torres Guzmán¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, México..

²Instituto Mexicano del Transporte. Ciudad de México, México.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) especie que se encuentra dentro de la categoría de cereal, se podría pensar que esta especie no tiene ninguna relación con la industria de la construcción, pero debido a varios estudios y experimentación ya realizados anteriormente (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010), El almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, y la principal fuente de calorías de la mayoría de la Humanidad. Es importante como constituyente de los alimentos en los que está presente, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo el comportamiento del almidón. Se puede determinar los beneficios que aporta el uso de la Fécula de Maíz o Almidón de Maíz (Guzmán, 2013). El almidón o fécula de maíz es un polisacárido que se obtiene de moler las diferentes variedades del maíz. Suele formar parte de los carbohidratos que se ingieren de manera habitual a través de los alimentos; en estado natural se presenta como partículas complejas que, en presencia de agua, forman suspensiones de poca viscosidad. Su composición es principalmente de glucosa, aunque puede haber otros componentes presentes en menor cantidad. El almidón de maíz debe conservarse y almacenarse en lugares secos, frescos y no debe estar en contacto con olores fuertes. Es un ingrediente sumamente versátil, se presenta como un polvo blanco muy fino que tiene un sabor característico. Por lo regular, el almidón de maíz suele utilizarse como agente espesante en diferentes procedimientos, sin embargo sus usos son más variados (Jacobo, 2014). En base a las investigaciones realizadas es que se decidió estudiar el comportamiento de la mezcla con adición de dicho material. Es decir si las adiciones modifican positivamente las propiedades mecánicas o físicas de los materiales de construcción base cemento portland

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Según la Norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) los moldes para la elaboración de los especímenes deben cumplir ciertas características, entre ellas están que los moldes deber ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente y que no sea reactivo con el cemento portland, dichos moldes deben tener las dimensiones que la misma norma nos cita y deben mantenerlas bajo condiciones severas de trabajo, deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se les puede agregar algún material de sello por la parte externa, tales como grasa, plastilina o parafina. Deben tener los elementos necesarios para la fijación correcta a la base. Si el molde es de uso repetitivo, se le puede agregar algún desmoldante que facilite la extracción del espécimen del molde. Se elaboraron especímenes a los cuales se les realizaron las pruebas no destructivas como lo son resistividad y velocidad de pulso, ya que son las pruebas más usuales para la determinación de la porosidad de la mezcla a edades tempranas (14, 28 y 45 días) y así poder compararlos con el espécimen testigo que se elaboró únicamente con cemento-

arena-agua. (Agua/cemento= 0.77). La adición de fécula de maíz fue del 2% respecto a la masa del cemento (Guzmán, 2013).



Figura 1. Elaboración de especímenes (Fotografía L. Colín)

2.1 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m (Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).



Figura 1: Prueba Resistividad Eléctrica a cubos (Fotografía L. Colín)

2.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de

vía, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

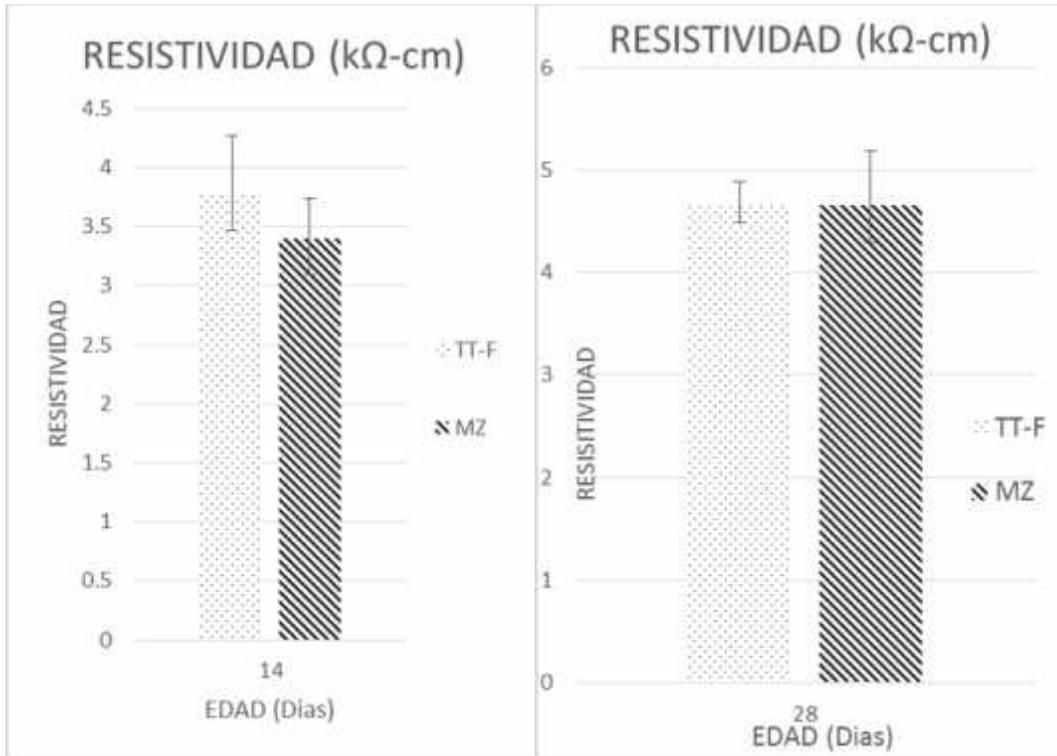
Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.



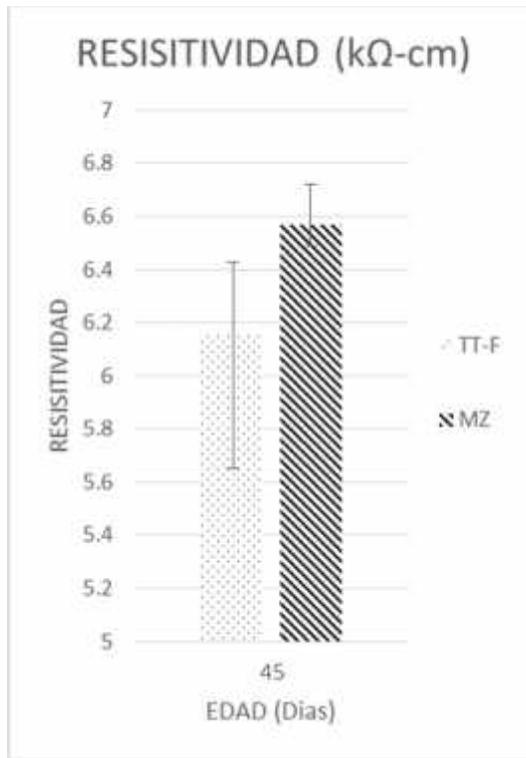
Figura 2: Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) (Fotografía L. Colín)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son ligeramente mayores que el testigo, podemos observar un incremento conforme va creciendo la edad, se espera que para edades tardías se continúe con dicha tendencia.



.Figura 4. Resistividad eléctrica a) 14 días b) 28 días (k -cm)



.Figura 5. Resistividad eléctrica 45 días (k -cm)

Se espera que a edades tardías siga conservando la misma tendencia y aumente conforme las edades vayan aumentando, de acuerdo a la (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000). Los resultados obtenidos se encuentran dentro de alto riesgo.

Tabla 1: Criterios de Evaluación (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

Resistividad Eléctrica (k -cm)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

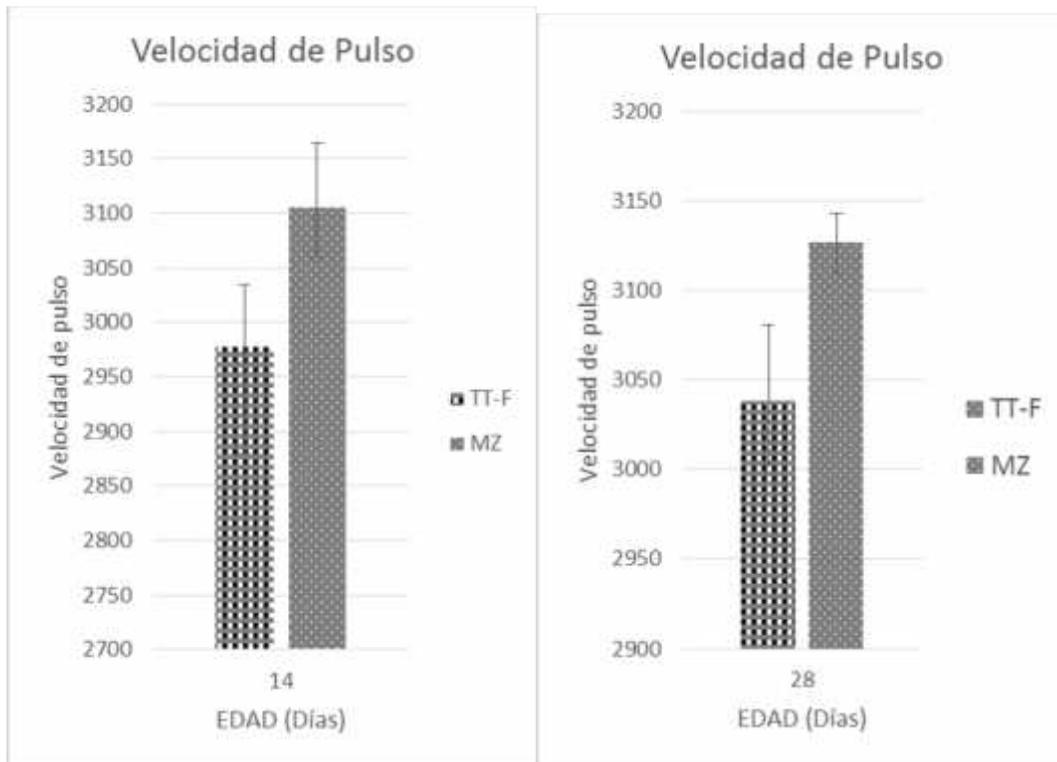


Figura 6 Velocidad de Pulso Ultrasonico a)14 Días b)28 días (m/s).

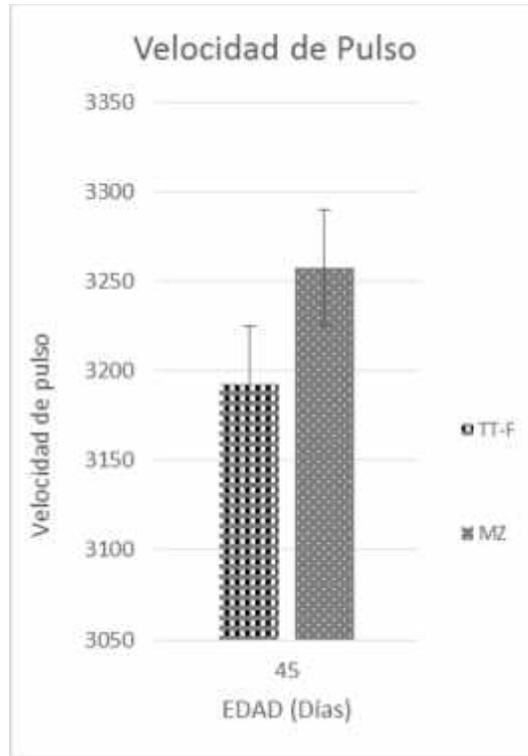


Figura 7 Velocidad de Pulso Ultrasonico 45 días (m/s).

De acuerdo con los datos obtenidos se puede comprobar que el valor de la adición del 2% de almidón arroja como resultado que se encuentra en una la calidad de mortero alta de acuerdo con (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000) como se puede ver a continuación.

Tabla 2. Calidad del mortero de acuerdo a velocidad de propagación

Velocidad de propagación	Calidad del mortero
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos obtenidos y analizados se puede observar que la adición realizada para las pruebas físicas (Velocidad de pulso y resistividad) muestra un comportamiento ligeramente favorable

de la mezcla ya que va aumentando los valores conforme va aumentando la edad del espécimen. La Resistividad es solo uno de los parámetros para medir la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto y de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación la Resistividad se considera en alto riesgo, pero en el otro parámetro importante es la velocidad de pulso

ultrasónico donde los resultados de la investigación son de alta calidad para el mortero con las adición del 2% de almidón.

La investigación continua esperando obtener resultados mejores para las edades tardías, también se les hará pruebas por durabilidad a los morteros para verificar su durabilidad ante ciertos ataques a los que pueden estar sometidos los morteros.

5. AGRADECIMIENTOS

LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS” FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS HIDALGO.

6. REFERENCIAS

Guzmán, A. (2013). Tesis Maestría, Morelia, Michoacán.

Jacobo, S. J. (2014). *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. Morelia, Mich.

NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación.

RED DURAR (Durabilidad de la Armadura). (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: CYTED.

Torres Acosta, A. A., Celis Martínez, C. E., Martínez Molina, W., & Lomelí González, M. G. (2010). *Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas*. PT No. 326, Sanfandila, Qro.

Evaluación de las propiedades electroquímicas, mecánicas y físicas de pastas y morteros de cementos alcalinos base CBCA – MK en proporciones equivalentes

D. González Aguilar¹, D. Nieves-Mendoza¹, M.A. Baltazar-Zamora¹, H.E. Hernández-Martínez¹, E.E. Maldonado-Bandala¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

RESUMEN

En este estudio se analiza el comportamiento mecánico y electroquímico de pastas con cementos activados alcalíamente a base de metacaolín (Mk) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) en cantidades equivalentes, expuestas en una solución del 3.5% de NaCl por 180 días. La técnica electroquímica empleada fue Resistencia a la polarización Lineal y la técnica termodinámica de potenciales de corrosión. Se encontró que las pastas fabricadas con cementos alcalinos superaron casi por el doble en la resistencia mecánica de compresión simple a la pasta control de 100% cemento Portland, sin embargo, en lo que se refiere a la caracterización electroquímica, no se observa mucho cambio entre todas las pastas analizadas incluyendo la pasta control, pues hasta los 180 días de exposición, todas se encuentran en velocidades de corrosión despreciables.

Palabras clave: pastas de cemento, metacaolín, ceniza de bagazo de caña de azúcar, corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

Las tendencias por encontrar nuevos materiales alternativos en la construcción han mostrado un amplio panorama de posibilidades, lo cual permite investigar opciones que reduzcan costos y que a su vez se mejoren sus propiedades, tanto físicas como mecánicas, por ello el desarrollo de nuevos materiales avanzados de construcción deberá solucionar los problemas asociados al proceso de fabricación (económico y ambiental) pues se reduce el contenido de clinker, componente energéticamente costoso. La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) es un subproducto de la agroindustria azucarera y del alcohol, que contiene altas cantidades de SiO_2 y la presencia de sílice amorfa como lo han demostrado estudios previos [1], lo que la hace un material con alto potencial puzolánico.

Tomando en cuenta las condiciones de innovación, economía y conservación de nuestro medio ambiente, se hace imperante el desarrollo de nuevos materiales completamente sustentables. En la actualidad se han realizado diversas investigaciones empleando la CBCA y Metacaolin como sustituto del CPC (cemento portland compuesto), en los cuales se ha estudiado el grado de molienda óptimo para la correcta mezcla y aprovechamiento de sus propiedades y la distribución de las partículas; también se han analizado las características físicas y mecánicas de las pastas y morteros producidos con este tipo de materiales de sustitución [2].

La activación alcalina de materiales silicoaluminosos de configuración parcial o totalmente amorfa o vítrea (en estado de fina división) con disoluciones fuertemente alcalinas y tras un corto periodo de curado térmico suave ($50-100^\circ\text{C}$), permite obtener un material con buenas propiedades cementantes [3,4]. El presente estudio se centra en el desarrollo de un mortero mediante la activación alcalina de la CBCA. Los más de 1000 millones de toneladas de ceniza que se producen en el mundo anualmente, son un buen argumento para discutir en torno a su competitividad como material base en la fabricación de una nueva generación de cementos alcalinos [5].

Esta activación es una interacción química entre disoluciones alcalinas y aluminosilicatos (con bajos y altos contenidos en Ca) a partir del cual ciertos materiales de origen natural o procedentes de subproductos industriales (que presentan estructuras amorfas o vítreas), al ser mezclados fraguan y endurecen para dar lugar a un material con buenas propiedades conglomerantes. [6].

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se realizaron 18 preliminares de las mezclas de las cuales se eligieron las 6 que presentaron mejores resultados para su caracterización, mecánica y electroquímica; las cuales se analizaron en 4 diferentes ambientes, en agua destilada, agua contaminada con cloruros al 3.5%, agua contaminada con sulfatos al 3.5% y al medio ambiente (secas), tratamientos que se aplicaron durante la etapa de curado y posterior a esta durante 180 días, para elegir la mezcla más óptima. Los ensayos que aquí se exponen están regidos por la normativa internacional y la normativa NMX ONNCCE [7].

2.1 Materiales utilizados para la fabricaion de las probetas de ensayo

- CBCA
- Mk
- Agua
- Hidroxido de Sodio (NaOH)
- Silicato de Sodio (Na₂SiO₃)
- Arena silica
- Acero Aisi 1018

Para el presente estudio se trabajó con dos materiales silicoaluminosos, ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y Metacaolin (Mk) en proporciones 1:1. La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) el cual es un subproducto industrial de la industria azucarera y del alcohol, y el Metacaolin producto de la calcinación por 6 horas a 750°C del mineral llamado caolinita. La composición de óxidos obtenida de la ceniza con la que se trabajo por FRX fue (%peso) 62.98 SiO₂, 4.91 A l₂O₃, 6.273 Fe₂O₃, y la composición de óxidos obtenida del Metacaolin fue (%peso) 73.59 SiO₂, 23.61A l₂O₃, 0.141Fe₂O₃. Teniendo así materiales silicoaluminosos, sin embargo, estos materiales carecen de propiedades adhesivas o cohesivas por ello es necesario trabajar con los activadores alcalinos los cuales fueron NaOH, Na₂SiO₃, y como agregado se usó arena Silica la cual es un compuesto resultante de la combinación de sílice con el oxígeno [8].

2.2 Dimensiones de las probetas de ensayo para las diferentes caracterizaciones.

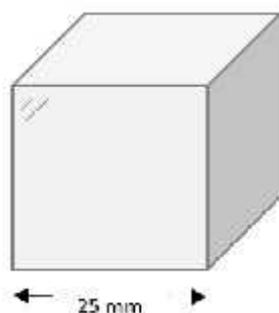


Figura. 1 Caracterizacion Mecanica
Resistencia a la compresión

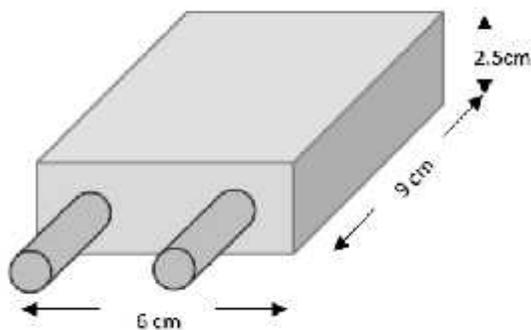


Figura 3 Caracterizacion electroquímica
Icorr y Ecorr

2.3 Proporcionamiento para las probetas de ensayo

Se realizaron 6 diferentes proporcionamientos con diferentes tratamientos de temperatura como se observa en la tabla 1, la mezcla R-1 presento inconsistencias al fraguar por lo que no se presentan resultados de esta.

Tabla 1. Matriz experimental

Mezcla	CBCA	Mk	Arena silica	R. Agua/ Cementante	%Na ₂ O	Ms Na ₂ SiO ₃	Temperatura
R-1	1:1	1:1	2:1	0.47	14	0.5	40
R-2	1:1	1:1	2:1	0.47	14	1	80
R-3	1:1	1:1	2:1	0.47	14	1.5	20
R-4	1:1	1:1	2:1	0.47	16	0.5	80
R-5	1:1	1:1	2:1	0.47	16	1	20
R-6	1:1	1:1	2:1	0.47	16	1.5	40

La mezcla de referencia se fabricó con la misma relación agua cementante de 0.47, así como la de arena silica de 2:1, con un 100% Cemento Portland Compuesto 30R; al igual que todas las mezclas se sometio a los 4 diferentes ambientes.

Los materiales y soluciones, previamente pesados y preparados, fueron mezclados mecánicamente durante 10 min, posteriormente el mortero fue vertido en los moldes de los cubos y pastillas. Se les dio un tratamiento inicial de entre 20°C, 40°C y 80°C durante las primeras 20hrs.

2.4 Caracterización mecánica

La resistencia a la compresión se determinó a 1, 3, 7, 14, 28, 90, 120 y 180 días usando una prensa shimadzu automática hidráulica con una velocidad de carga de 0.5 mm/min por 250 N/s [9].

2.5 Caracterización electroquímica

Para el estudio de la durabilidad de las mezclas de morteros, en función de la resistencia a la corrosión, la resistencia a la polarización y velocidad de corrosión se determinó por medio de un Potenciostato/galvanostato/ZRA ACM Gill. Se monitorearon desde los 28 días hasta los 180, con una frecuencia de 15 días [10].

3. RESULTADOS

En las siguientes figuras podemos observar los resultados de resistencia a compresión de las 5 mezclas de morteros en los 4 diferentes ambientes. En la figura 3, estan graficados los resultados

de las diferentes mezclas expuestas al medio ambiente (secos) donde se puede observar que la mezcla testigo obtuvo resistencias a la compresión de 7 Mpa a un día, 16 Mpa a 3 días, 22 Mpa a 7 días y 14 días, 21 Mpa a 28 días, 26 Mpa a 90 días, 29 Mpa a 120 días y 30 Mpa a 180 días; con referencia a los resultados observados tenemos que la mezcla R2 se mantuvo por arriba de la control durante todos los ensayos, sin embargo se puede observar que la que presentó valores más altos fue la mezcla R5 en comparación a la testigo con valores de 33 Mpa a los 14 días, 38 Mpa a los 28 días, 40 Mpa a los 90 días y 120 días y 41 Mpa a los 180 días. En la figura 4 podemos observar que la mejor mezcla fue la R-5 al igual que en ambiente seco con respecto a la testigo teniendo valores de hasta un 10 % más aproximadamente.

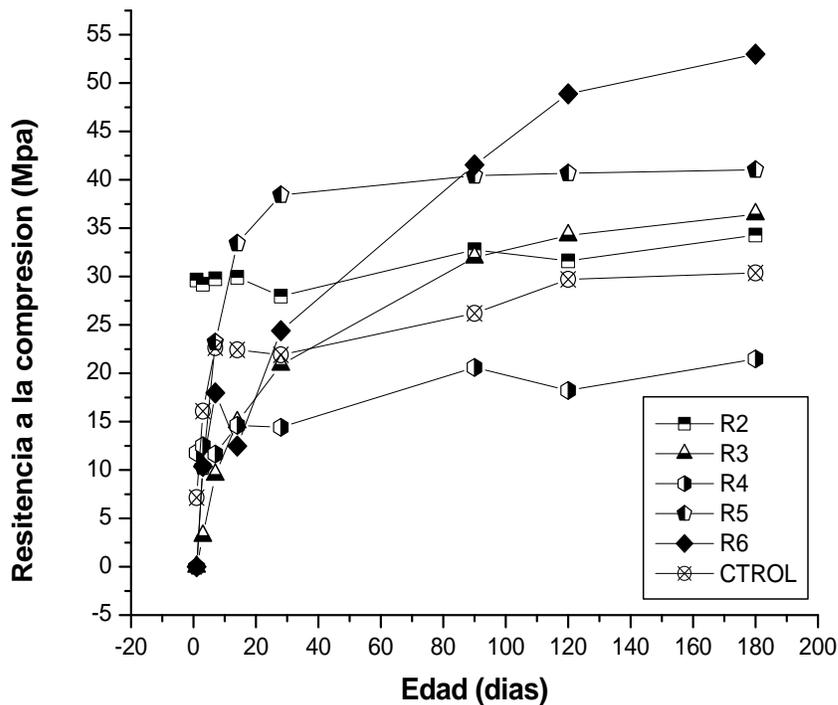


Figura 3 Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas curadas al medio ambiente (secos)

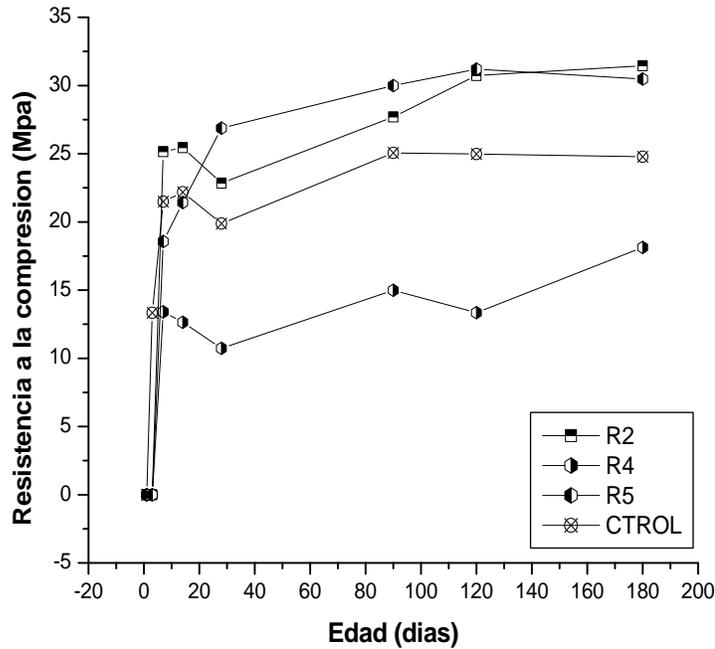


Figura 4. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas curadas en agua destilada

En la figura 5 y 6 se encuentran graficadas las diferentes mezclas expuestas a los ambientes de cloruros y sulfatos donde podemos observar que se obtuvieron mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión en las que están expuestas a cloruros. En la figura 5 podemos observar que de las 5 mezclas que se realizaron solo 3 soportaron el ataque por sulfatos la R-5, R-2 y R-4 de las cuales la R-5 es la que presento un comportamiento similar al de la mezcla testigo, obteniendo una resistencia final a los 180 días de 32.69 Mpa y la testigo de 33.4 Mpa. En la figura 6 están los resultados que se obtuvieron de las mezclas expuestas en cloruros de los cuales se puede destacar que la mezclas que presentaron mejores resultados fueron la R-2 y la R-5 con valores de 30 Mpa y 29 Mpa a los 180 días en comparación con la testigo que obtuvo una resistencia de 24Mpa a los 180 días

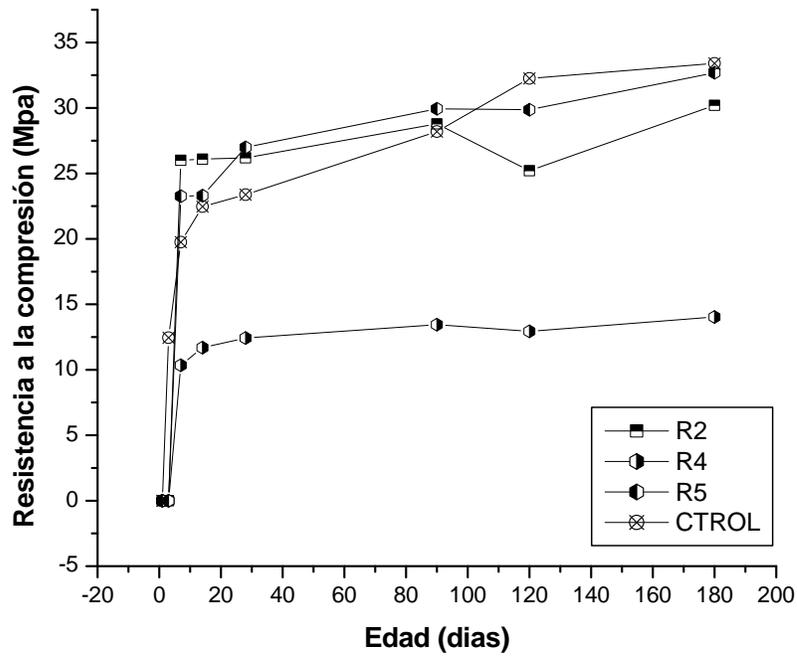


Figura. 3 Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas curadas en agua contaminada con sulfatos al 3.5%

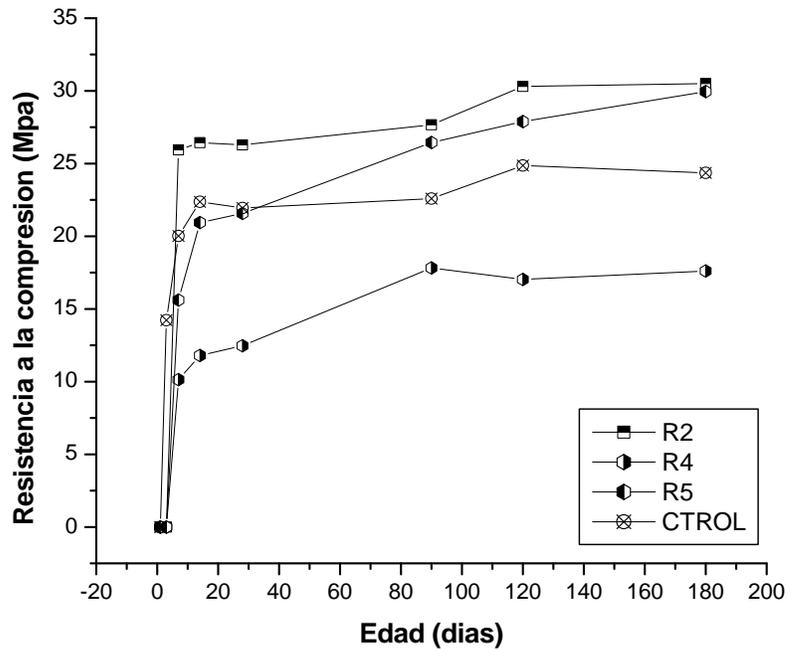


Figura. 4 Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas curadas en agua contaminada con cloruros al 3.5%

En las siguientes figuras de la 7 a la 9 se encuentran graficados los resultados de potenciales de corrosión E_{CORR} , se puede observar que durante los seis meses de monitoreo, los potenciales de

corrosión que presentaron las 5 diferentes mezclas, varían entre los -700 y -100 mV con respecto al electro de cobre sulfato de cobre, con un considerable descenso, en el transcurso de los meses hacia valores mas nobles; mismos que indican que existe un 90% de probabilidad de corrosión en cuanto a los que están expuestos a cloruros, por otro lado los que se encuentran expuestos a sulfatos se puede observar que se encuentran ubicados en valores de -350 a -250 mV es decir en la zona de incertidumbre. Sin embargo, se puede observar que el sistema que presento menor probabilidad de corrosión y por tanto se cree que sea el que garantice mayor durabilidad es el R-5, ya que al final del periodo de exposición presenta valores por arriba del testigo.

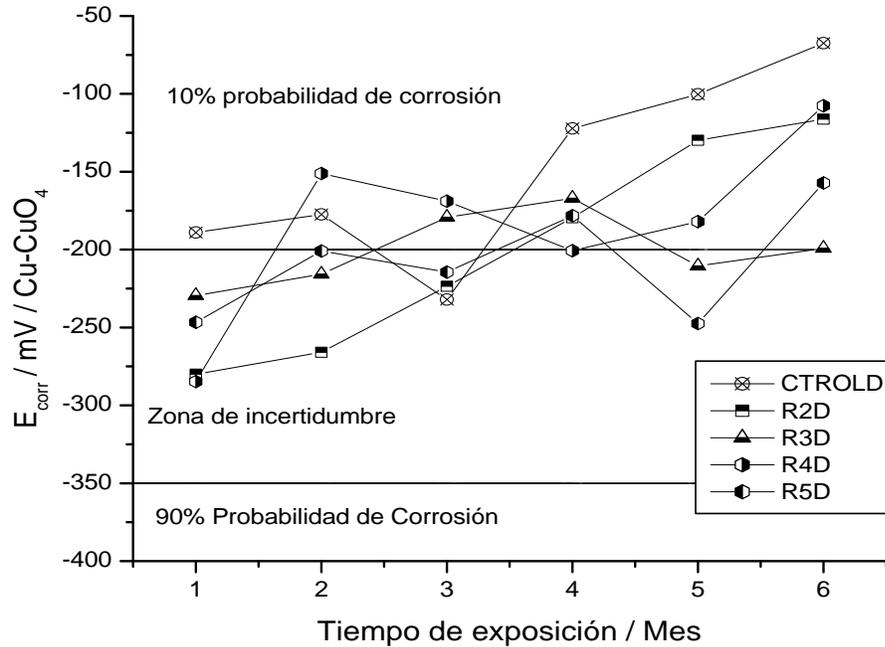


Figura. 7 Potencial de corrosión (E_{corr}) del acero de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua destilada en función del tiempo de exposición.

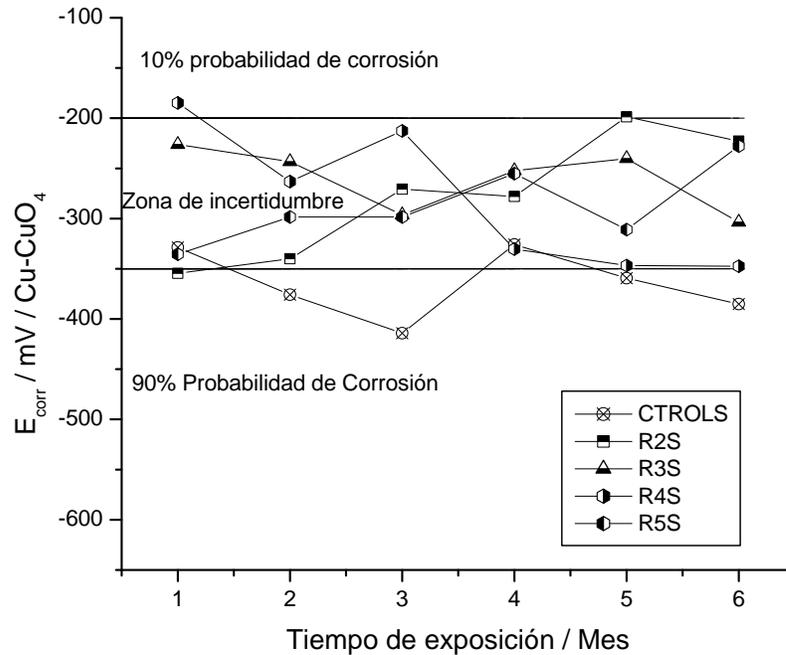


Figura. 8 Potencial de corrosión (E_{corr}) del de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua contaminada con sulfatos al 3.5%

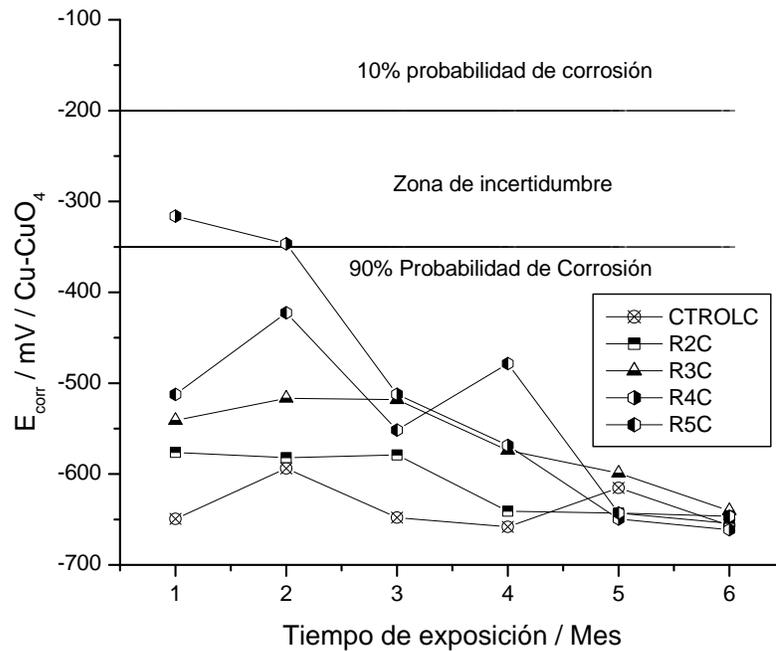


Figura. 9 Potencial de corrosión (E_{corr}) del acero de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua contaminada con cloruros al 3.5%

En la figura 10 se pueden apreciar las tendencias en cuanto a la densidad de corriente del acero embebido en el mortero en función del tiempo de exposición, donde puede inferirse la

durabilidad de los sistemas de acero- mortero en el estudio. Se puede observar que el sistema que garantiza mayor durabilidad en este medio desde el punto de vista de resistencia a la corrosión es la R-3 pues su actividad corrosiva se encuentra por arriba del mortero testigo y mantuvo un comportamiento constante ($0.0004 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). En la figura 11 se encuentran graficados los valores de i_{corr} expuestos a sulfatos de los cuales se puede observar que todos los sistemas estuvieron por arriba del mortero testigo. En la figura 12 se encuentran los resultados de i_{corr} expuestos a cloruros donde todos los resultados estuvieron por arriba del mortero testigo.

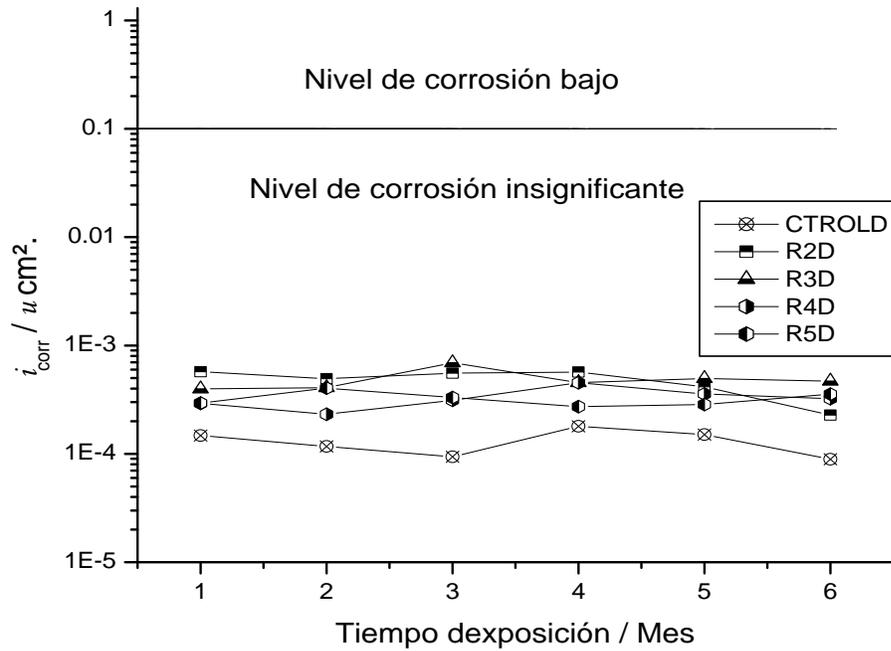


Figura. 10 Velocidad de corrosión (i_{corr}) del acero de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua destilada

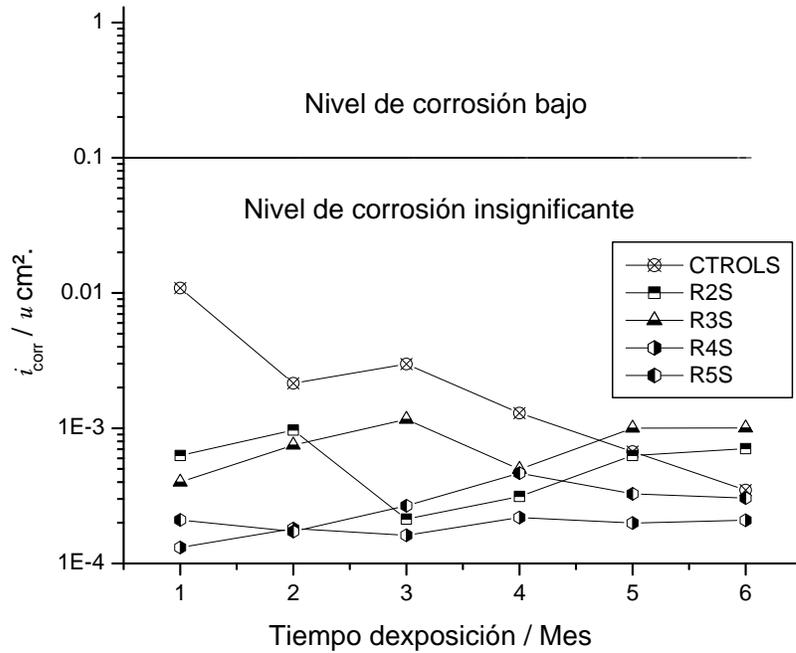


Figura. 11 Velocidad de corrosión (I_{corr}) del acero de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua contaminada con sulfatos al 3.5%

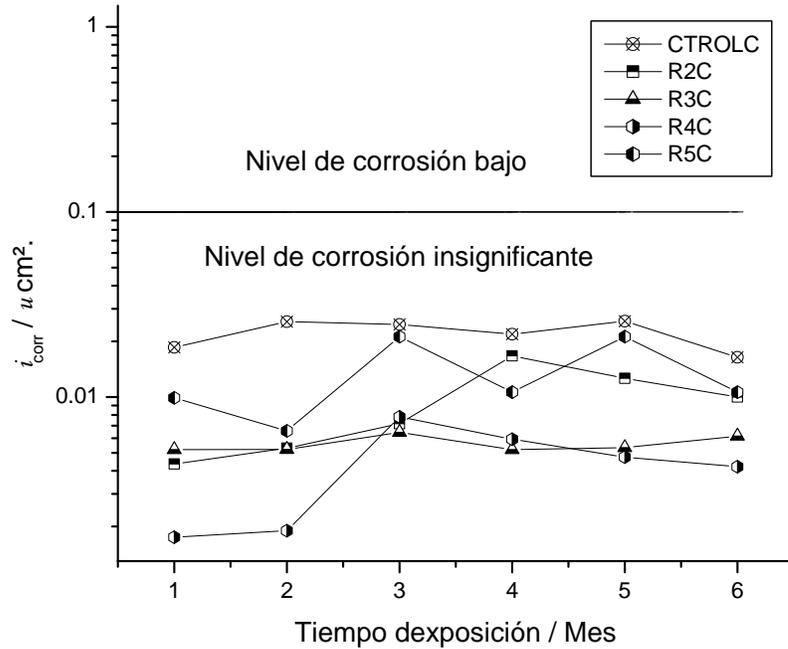


Figura. 12 Velocidad de corrosión (I_{corr}) del acero de refuerzo embebidos en mortero expuestos a agua contaminada con cloruros al 3.5%

4. CONCLUSIONES

Con la adición de fibra de carbono se logra que las pastas presenten mayor conductividad y con la sustitución del metacaolín una mejor resistencia a la compresión por lo anterior se pudieron utilizar como ánodos en la extracción electroquímica de cloruros.

5. REFERENCIAS

- [1] D. D. L. Chung “Multifunctional cement-based materials”, Marcel Dekker Inc. New York, 2004
- [2] D. D. L. Chung “Functional Properties of Cement-Matrix Composites”, J. Mater, Sci. 36, 1315-1324, 2001
- [3] Barrios-Durtewitz C. et al, “Electrical Percolation Threshold in a Conductive Cement Paste with Carbon Fiber”, NACE INTERNATIONAL, (2010).
- [4] Bertolinia L., Bolzonía F., Pastoreb T., y Pedeferría P., Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. Cement and concrete research. 34: 681–694, 2004.
- [5] Garcés P, Andión L, Memorias 3er Congreso Nacional ALCONPAT, ISBN 978-607-95042-0-5, Chihuahua, México (2008).
- [6] Gober M.R. y El-Belbol, M.S.T Repair materials, En: Chapman & hall, Concrete in the service of mankind: Concrete repair, rehabilitation, and protection. London. 1996. 282-438
- [7] Chang, C.C. Hung, Selecting an adequate procedure for the electrochemical chloride removal. Cement and concrete research. 36: 562–570, 2006.
- [8] Chee-Burm S. y Eun-Kyum K., Modeling of chloride ion ingress in coastal concrete. Cement and concrete research. 32: 757–762, 2002.
- [9] Christodoulou C. y Birmingham F.M., Electrochemical treatments of corroded reinforcement in concrete. Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II. ISBN 978-0- 415-46850-3: 799-805, 2008.
- [10] Chung D., Electrically conductive cement-based materials. Advances in Cement Research. 16(4): 167-176, 2004.
- [11] Miranda J.M., Cobo A, Otero E. y Gonzalez J.A., Limitations and advantages of electrochemical chloride removal in corroded reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research. 37: 596–603, 2007.
- [12] Nerland C.y Polder R., Cathodic protection of Rc structures –far more than bridge decks. 15 Int. Corrosion congress. Granada, Spain. Septiembre, 2002.
- [13]Wen S, y Chung D., Partial replacement of carbon fiber by carbon in multifunctional cement–matrix composites. *Carbon*. 45:505–513, 2007.

Análisis de la conductividad eléctrica en una pasta modificada con Metacaolin

E. Garcés-Velázquez^{1,3}, N. Higuereado-Moctezuma¹, D. Nieves-Mendoza¹, C.P. Barrios-Durstewitz², R.E. Núñez - Jaquez², E. E. Maldonado-Bandala¹.

¹Facultad de Ingeniería Civil, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

²Universidad Autónoma de Sinaloa Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N, Los Mochis, Sinaloa, México. □

³Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

RESUMEN

Las propiedades de las pastas de cemento se pueden modificar o incluso mejorar al adicionar materiales como fibras o polvos. Una de las propiedades que se puede modificar es la conductividad eléctrica. La combinación de aditivos conductores en partículas y fibras, favorece la conductividad del material cementicio, debido a su efecto sinérgico. Pues las fibras tienen una mayor capacidad de conectividad y las partículas abarcan más volumen, las partículas tienden a ser mucho más económicas que las fibras y el bajo costo es importante para la viabilidad. En el presente estudio se desarrollo una pasta cemento conductora para la protección y reparación de estructuras de concreto armado, para lo cual se elaboraron especímenes prismáticos de dimensiones de 40x40x160 mm para determinar la conductividad eléctrica de la pasta cemento conductora, se elaboraron especímenes de 50mm x 50mm para determinar la resistencia a la compresión, la pasta se elaboro a base de cemento portland compuesto 30-R, metacaolín, fibra de carbono, grafito, agua con relación al peso del cemento de 0.5, la fibra se utilizo en tamaño de (10µm de diámetro x 5mm de longitud, la fibra y grafito se utilizaron como adición y el metacaolín como sustitucion en diferentes proporciones de acuerdo al peso del cemento, quedando 6 diferentes tipos de mezclas; las cuales fueron monitoreadas durante 90 días. Los resultados obtenidos son favorables ya que la adición de materiales carbonosos modifica las propiedades de la pasta haciéndola conductora.

Palabras clave: Conductividad-Eléctrica, Resistencia, adición, fibras, cemento

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la línea de investigación de los materiales cementicios ha estado orientada al estudio de sus propiedades mecánicas y su durabilidad, debido a su principal y única función estructural (D.D.L. Chung 2004). En la actualidad existe la creciente demanda de estructuras inteligentes, capaces de detectar y responder a diversos factores, lo cual nos lleva a buscar que los materiales de construcción no solo que tengan buenas propiedades mecánicas y sean durables, sino que tengan otras funciones (D.D.L. Chung, 2001).

La multifuncionalidad consiste en aprovechar en aprovechar el propio material, para realizar otras funciones, sin necesidad de ningún tipo de dispositivo externo. De esta forma se reduce el costo, se simplifica el diseño, mejora la durabilidad, aumenta el volumen funcional, puesto que la función la lleva a cabo toda la estructura, y se minimiza la degradación de las propiedades mecánicas que normalmente se produce al usar dispositivos embebidos (D.D.L. Chung, 2001). La elevada resistencia eléctrica de los materiales cementicios se puede modificar o incluso mejorar al adicionar materiales como fibras o polvos. Una de estas propiedades que se puede modificar es la conductividad eléctrica (P. Garcés, 2008). Fibras conductoras eléctricamente (por ejemplo, el carbono y fibras de acero), que son discontinuas son eficaces como mezclas de compuestos conductores eléctricamente en una matriz de cemento. La combinación de aditivos conductores en partículas y fibras, favorece la conductividad del material cementicio, debido a su efecto sinérgico. Pues las fibras tienen una mayor capacidad de conectividad y las partículas abarcan más volumen. Por lo que es conveniente el estudio de la combinación de ambos componentes (partículas y fibra) para lograr optimizar la conductividad y el costo de un material cemento conductor (Barrios-Durtewitz C. et al., 2010)

En el presente estudio se desarrollo una pasta cemento conductora (PCC) para la protección y reparación de estructuras de concreto armado, uno de los usos en que se podrá aplicar será como ánodo en la técnica de extracción electroquímica; se elaboraron 6 grupos de especímenes su matriz fue base cemento con adición y sustitución de metacaolín, fibra de carbono, grafito y agua en diferentes proporciones con respecto al peso del cemento, para las pruebas de conductividad se elaboraron especímenes de forma prismática con placas y alambres de cobre embebidos y especímenes cúbicos para las pruebas de resistencia a la compresión. (Pérez et al. 2007, Orlikowskia et al. 2006, La Gu et al. 2008, Wen et al. 2002, 2004, Chung et al. 2004, 2007 y Chen et al. 1996) han realizado investigaciones al respecto de materiales cementicios conductores con diversas aplicaciones, incluso existen patentes como la patente WO 2007046682 20070426 (C. Nerland y R. Polder 2002) referida a un concreto con características altamente conductoras . El objetivo principal es analizar el comportamiento de la PCC adicionada con material conductor carbonoso, mediante pruebas para determinar su conductividad eléctrica y resistencia a la compresión; con la finalidad de encontrar el proporcionamiento optimo que vuelva conductora la pasta y esta se pueda utilizar como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se analizaron 6 pastas cemento conductoras (PCC) para su aplicación de estas como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros (EEC), de las cuales se escogieron las que presentaron mayor conductividad y la mejor resistencia a la compresión. La determinación de la conductividad eléctrica de la PCC se realizó mediante un arreglo de cuatro puntas. Posterior a esto se aplicó el tratamiento de EEC y se determinó la pasta más óptima.

2.1 Materiales utilizados para la elaboración de los especímenes:

Cemento Portland Compuesto CPC 30R

Metacaolín

Fibra de carbono

Grafito

Agua

2.2.1 Dimensionamiento de los especímenes Figura 1 y Figura 2:

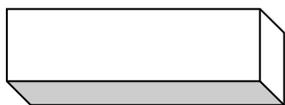


Figura 1. Especimen para pruebas de Conductividad de 40x40x160mm

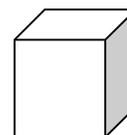


Figura 2. Especimen para pruebas Mecánicas de 50x50x50mm

2.3 Proporcionamiento de especímenes para conductividad y para resistencia a la compresión.

Especímenes	Cemento	Mk	Grafito	Fibra de carbono	Agua
CF	✓			0.09%	0.5
Mk 40%	✓	40%		0.09%	0.5
Mk 20%	✓	20%		0.09%	0.5
CG	✓		40%		0.5
CGF	✓		25%	0.09%	0.5
MGF	✓	40%	25%	0.09%	0.5

CF: Cemento- fibra-agua

Mk 40%: Cemento-40% de metacaolín-fibra-agua

Mk 20%: Cemento-20% de metacaolín-fibra-agua

CG: Cemento-40% de grafito-fibra-agua

CGF: Cemento-25% de grafito-fibra-agua

MGF: Cemento-25% metacaolín-25% grafito-fibra-agua.

2.4 Arreglo para prueba de conductividad

La medición de la conductividad eléctrica de la pasta de cemento conductora se llevó a cabo utilizando un arreglo de cuatro puntas como el que se muestra en la figura 3, el cual consiste en

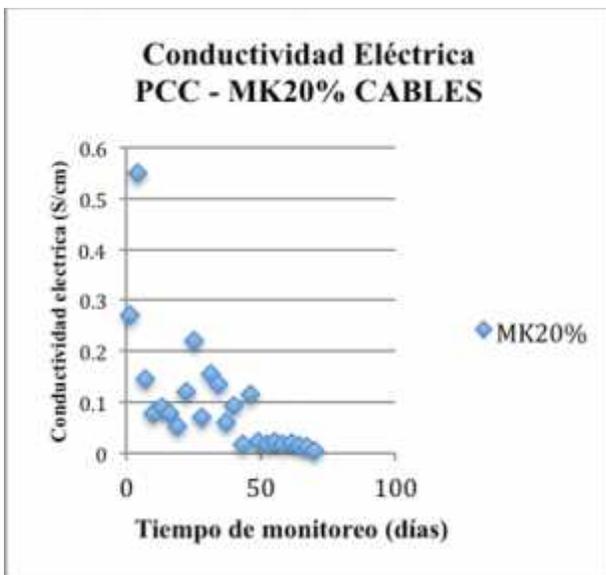


Figura. 6 Conductividad

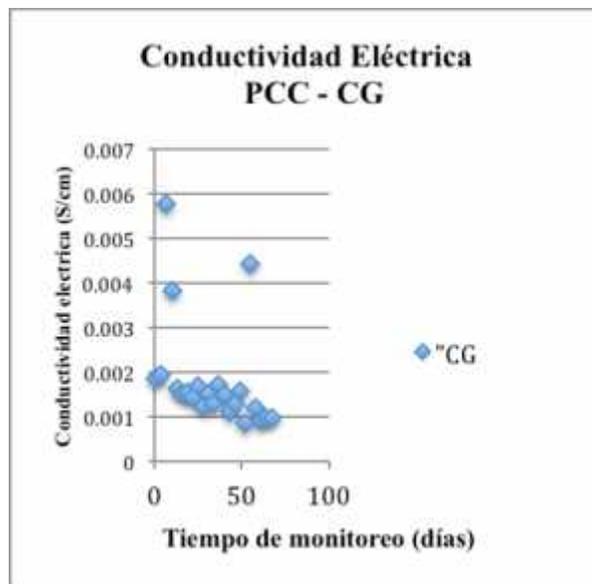


Figura. 7 Conductividad

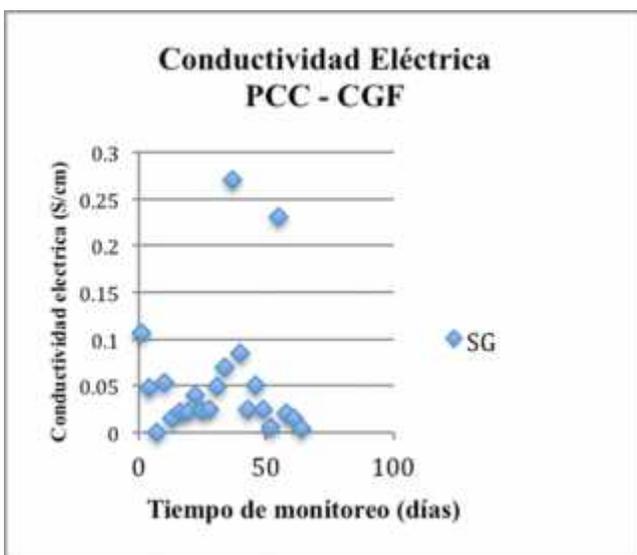


Figura. 8 Conductividad

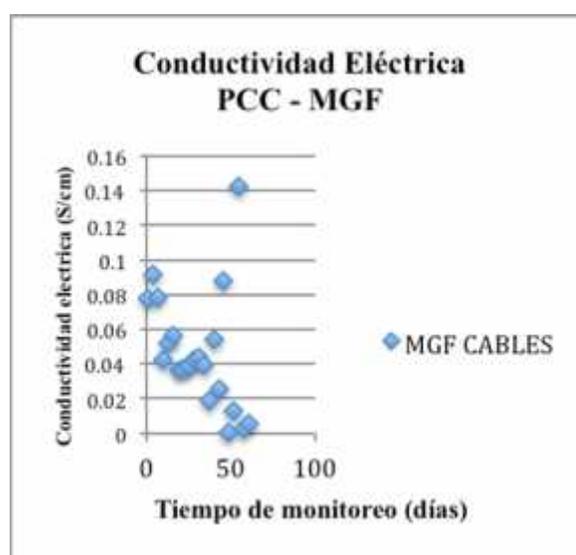


Figura. 9 Conductividad

En las figuras 10-13 se observa los especímenes de resistencia a la compresión en todas las figuras podemos observar que al menos una mezcla de las pastas cemento conductoras esta por encima de la control en todas las edades desde la edad de 3 días hasta los 28 días.

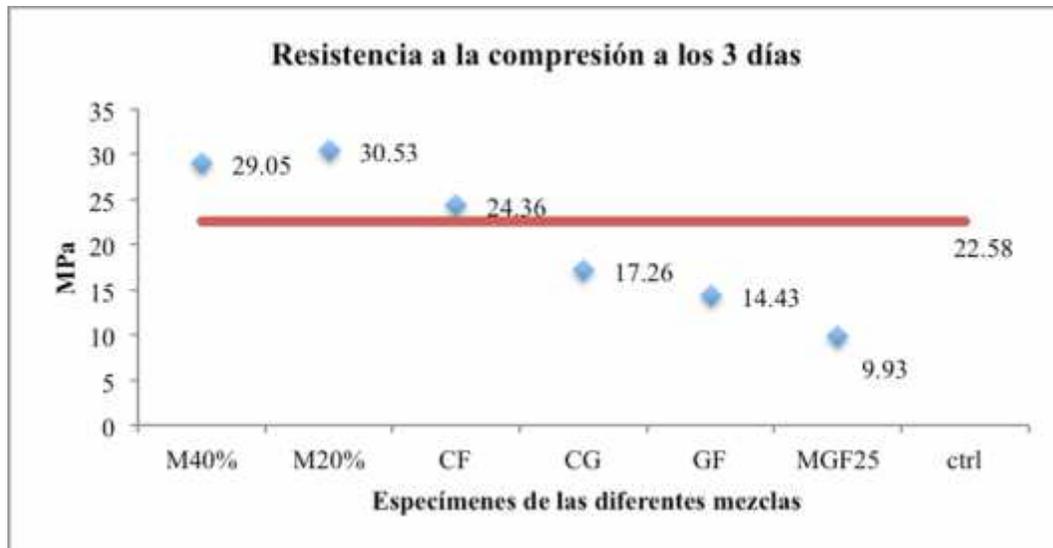


Figura. 10 Resistencia a la compresión 3 días

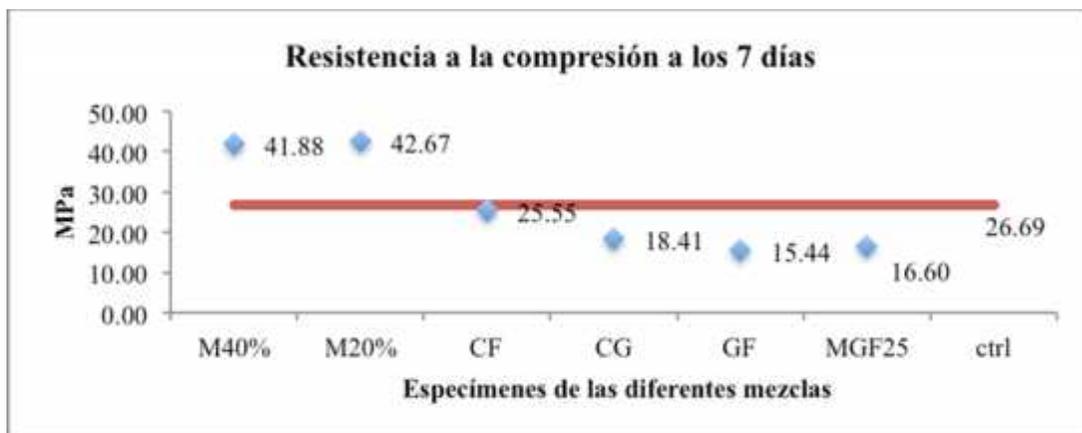


Figura. 11 Resistencia a la compresión 7 días

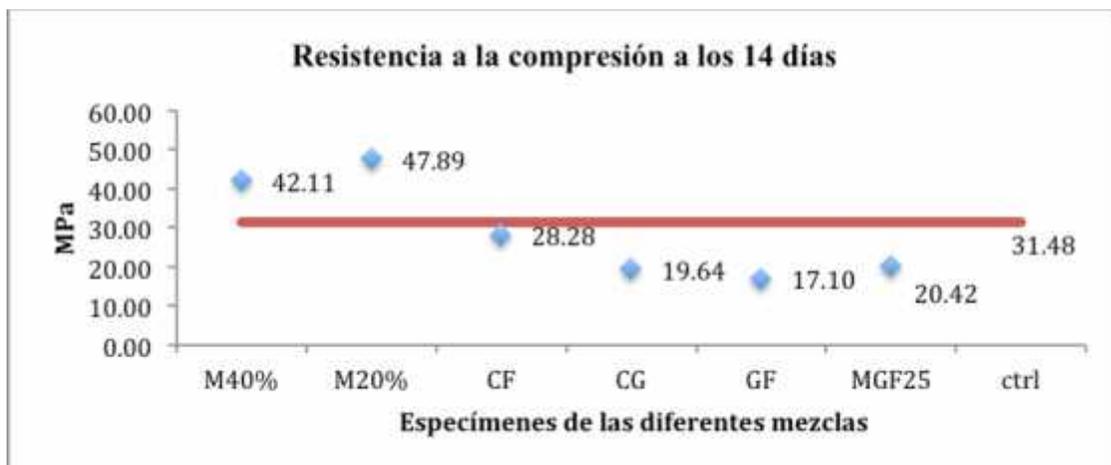


Figura. 12 Resistencia a la compresión 14 días

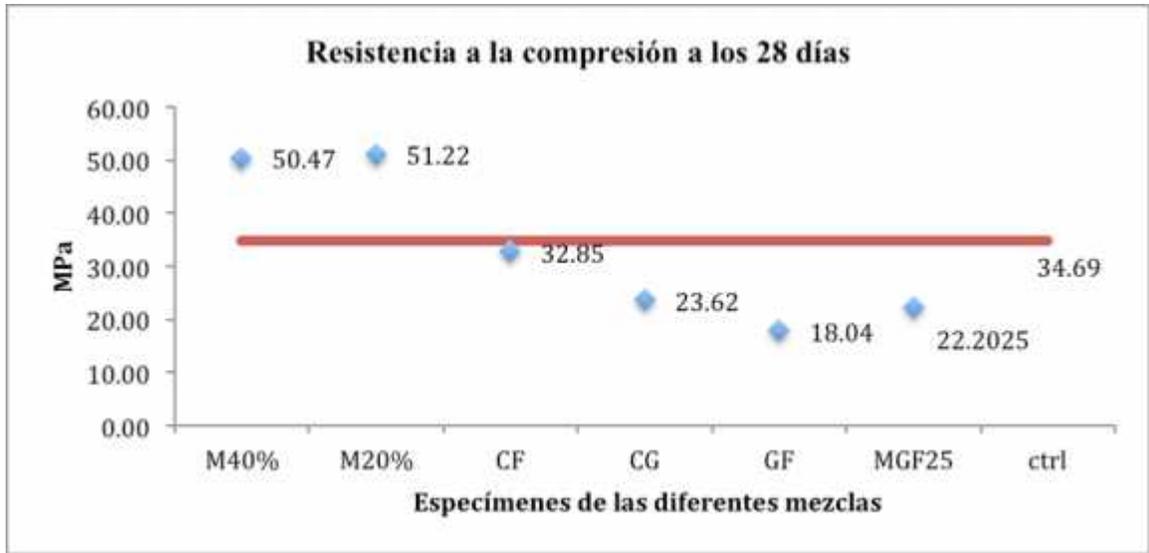


Figura. 13 Resistencia a la compresión 28 días.

4. CONCLUSIONES

Con la adición de fibra de carbono se logra que las pastas presenten mayor conductividad y con la sustitución del metacaolín una mejor resistencia a la compresión por lo anterior se pudieron utilizar como ánodos en la extracción electroquímica de cloruros.

5. REFERENCIAS

- [1] D. D. L. Chung “Multifunctional cement-based materials”, Marcel Dekker Inc. New York, 2004
- [2] D. D. L. Chung “Functional Properties of Cement-Matrix Composites”, J. Mater, Sci. 36, 1315-1324, 2001
- Barrios-Durtewitz C. et al, “Electrical Percolation Threshold in a Conductive Cement Paste with Carbon Fiber”, NACE INTERNATIONAL, (2010).
- Bertolinia L., Bolzonía F., Pastoreb T., y Pedeferría P., Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. Cement and concrete research. 34: 681–694, 2004.
- Garcés P, Andi6n L, Memorias 3er Congreso Nacional ALCONPAT, ISBN 978-607-95042-0-5, Chihuahua, México (2008).
- Gober M.R. y El-Belbol, M.S.T Repair materials, En: Chapman & hall, Concrete in the service of mankind: Concrete repair, rehabilitation, and protection. London. 1996. 282-438

Chang, C.C. Hung, Selecting an adequate procedure for the electrochemical chloride removal. *Cement and concrete research*. 36: 562–570, 2006.

Chee-Burm S. y Eun-Kyum K., Modeling of chloride ion ingress in coastal concrete. *Cement and concrete research*. 32: 757–762, 2002.

Christodoulou C. y Birmingham F.M., Electrochemical treatments of corroded reinforcement in concrete. *Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II*. ISBN 978-0- 415-46850-3: 799-805, 2008.

Chung D., Electrically conductive cement-based materials. *Advances in Cement Research*. 16(4): 167-176, 2004.

Miranda J.M., Cobo A, Otero E. y Gonzalez J.A., Limitations and advantages of electrochemical chloride removal in corroded reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*. 37: 596–603, 2007.

Nerland C.y Polder R., Cathodic protection of Rc structures –far more than bridge decks. 15 Int. Corrosion congress. Granada, Spain. Septiembre, 2002.

Wen S, y Chung D., Partial replacement of carbon fiber by carbon in multifunctional cement–matrix composites. *Carbon*. 45:505–513, 2007.

Inspección de una torre de pilado expuesta en un ambiente industrial-marino

N. Higueredo-Moctezuma¹, D. Nieves-Mendoza¹, M.A. Baltazar-Zamora¹, E. E. Maldonado-Bandala¹

¹Facultad de Ingeniería Civil, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

RESUMEN

En este trabajo se muestra la evaluación de la corrosión de los muros exteriores de un silo de concreto reforzado localizado en la costa sur del estado de Veracruz. Se reportan los resultados obtenidos de esta inspección, de los cuales se encuentran: levantamiento de daños, ensayos físico-químicos, mecánicos y electroquímicos que permitieron caracterizar el concreto y los daños por corrosión que puedan comprometer a la estructura evaluada. Generalmente las estructuras expuestas en ambientes marinos presentan corrosión por el ingreso de iones cloruro, este efecto se vio potenciado por la emanación de gases industriales. Se presenta la determinación de la velocidad de corrosión, el diagnóstico, así como las recomendaciones de las acciones a tomar para extender su vida de servicio

Palabras clave: Inspección, silo, concreto reforzado, velocidad de corrosión, diagnóstico, vida de servicio.

1. INTRODUCCIÓN

Con la reciente Reforma Energética que se ha impulsado en nuestro país, Petróleos Mexicanos o sus Organismos Subsidiarios, se han visto en la necesidad de realizar la compra-venta bienes inmuebles improductivos [1], que por décadas han sido abandonados y por tal motivo su degradación ha sido acelerada, esto, debido a la falta de mantenimiento y a la exposición a los ambientes agresivos donde se encuentran ubicados.

Para que estos bienes inmuebles específicamente plantas petroleras se vuelvan nuevamente productivas, impera la necesidad de rehabilitarlas. En consecuencia, existe la necesidad de evaluar las estructuras mediante una inspección desde el punto de vista de durabilidad que contemple ensayos destructivos y no destructivos, como pruebas electroquímicas, químicas y mecánicas, esto con el objetivo de determinar las medidas correctivas necesarias para ampliar la vida de servicio de estos activos petroleros existentes.

La estructura en estudio es un silo cilíndricos de 23 m de diámetro y más de 70 m. de altura, con espesor de muros mayores a 30 cm. construida a base de elementos de concreto reforzados con acero AISI 1018, el agregado empleado para la fabricación del concreto de los elementos estructurales de las torres es arena sílica y agregado grueso cuarzoso. Este material se caracteriza por tener alta dureza debido a que se presenta en la escala de Mohs y composición química SiO_2 , sin embargo, la forma de la partícula es redonda, lo cual determina una tracción débil en la masa de concreto. Debido a que las estructuras cuentan con más de 30 años de servicio y se localiza en un ambiente industrial-marino, ya presentan zonas con deterioros casi imperceptibles y otras con daños evidentes. Es importante destacar que el silo en estudio presentaba clara evidencia de reparaciones localizadas hechas con anterioridad, ya que estas de no haberse realizado correctamente pudieron acelerar los procesos de deterioro en el sistema acero concreto. Se realizó una inspección visual mediante un vehículo aéreo no tripulado, ubicando las zonas de estudio en las que se utilizó la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal empleando anillo de guarda para confinar la corriente, potenciales de media celda, resistividad eléctrica y pruebas químicas para obtener el perfil de carbonatación y la concentración de cloruros y sulfatos.

En este estudio se resumen las evaluaciones y el diagnóstico de la estructura, mostrando el mecanismo que permitió la potenciación de la corrosión.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Inspección Preliminar

Esta etapa consistió principalmente en una visita de reconocimiento de la estructura, medio de exposición y los levantamientos de daños y fotográficos de los elementos que componen la estructura del silo analizado, esto mediante un vehículo aéreo no tripulado DRONE, siguiendo los esquemas programados según se especifica en el Manual DURAR [2].

2.2 Inspección Detallada

Debido a que las fallas prematuras que presentan las estructuras de concreto armado en general, se deben principalmente a la falta de control de calidad y errados procedimientos de construcción, reparación y rehabilitación [3] Es importante realizar una serie de ensayos y mediciones necesarias para la obtención de la información requerida y establecer adecuadamente las causas y

la etapa de prevención adecuada. Dicha información permitió una evaluación de los problemas, pudiendo de esta forma definir la naturaleza y mecanismo de la corrosión.

2.2.1 Evaluación Electroquímica

Con el uso del Pacómetro se detectó la posición del acero, en las áreas donde se realizaron las siguientes medidas electroquímicas:

Medición de potenciales E_{corr} vs Cu/CuSO₄, de acuerdo a lo establecido en ASTM C876-09[4] NMX-C-495-ONNCCE-2015 [5].

Velocidad de corrosión, mediante la técnica de resistencia a la polarización, utilizando el GECOR 10 [6] y lo establecido en NMX-C-501-ONNCCE-2015 [7]. La información obtenida con estas medidas es fué útil ya que permitieron definir claramente los sitios de corrosión activa en la estructura.

2.2.2 Evaluación fisicoquímica.

Esta se llevó a cabo mediante la extracción de testigos (núcleos) tomados en sitio con el fin de conocer la calidad y potencialidad del concreto a corroer a la armadura; realizando los ensayos de Profundidad de carbonatación. RILEM CPC-18, UNE 112-011-94, concentración de cloruros. ASTM C 114-05, ataque químico por sulfatos. ACI 201.2R-10. Además la evaluación Resistencia a la compresión simple del concreto mediante ensayo a núcleos de concreto endurecido NMX-C-083-ONNCCE 2010.

3. RESULTADOS

Para tener una mejor comprensión de la ubicación de los ensayos, en la Tabla I se describe la nomenclatura de la clave de localización de las zonas de ensaye.

Tabla 1. Descripción de nomenclatura en zona de ensayos

Clasificación	-	Nivel al que se realizó el ensaye	-	Número de punto o zona ensayada
U2 (Silo)		Np (nivel de piso) P1 (pasarela 1) P2 (pasarela 2) P3 (pasarela 3)		01-12
Ejemplo U2-P1-P01 Silo -Nivel de pasarela 1-Zona de ensaye 01				

En la Tabla 2 se presenta el resumen de resultados de los ensayos realizados en el silo analizado.

3.1. Resistencia a la compresión simple del concreto ($f'c$).

Como se puede apreciar en la Tabla II, la resistencia a la compresión, se obtuvieron $f'c$ menores 250 kg/cm², y en la zonas de ensaye U2-P1-P04, se obtuvieron valores menores al 50% de las recomendadas en las NTC-DF (300kg/cm²), valores especificados para un ambiente de exposición B2 (Superficies de miembros en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores que son agresivos) de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de DF (NTC-DF).

Tabla 2. Resumen de resultados

Clave Localización	U2-NP-P01	U2-P1-P02	U2-P1-P03	U2-P1-P04	U2-P1-P05	U2-NP-P06
Orientación	Oeste	Sur	Sur	Sur	Sur	Norte
Altura a partir de la base de la estructura (m)	Nivel de piso	16	16	16	16	Nivel de piso
Resistencia a la Compresión Simple $f'c$ (kg/cm ²)	246.09	---	181.30	114.92	---	---
Resistencia mínima para concretos expuestos a sulfatos, 350 kg/cm² de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto						
Concentración de Cloruros a los 3 cm de profundidad (% en peso de cemento)	---	---	0.05	0.039	---	0.079
Concentración Máxima admisible ACI 318, 0.15 % en peso del cemento en ambiente marino						
Concentración de Sulfatos a los 3 cm de profundidad (% en peso de cemento)	---	---	0.65	0.41	---	0.81
Concentración Máxima admisible Andrade et al 1998, 0.45 % en peso del cemento						
Profundidad de Carbonatación (mm)	19.35 13.37	---	21.77	46.09	---	---
Potencial de Corrosión (mV vs Cu/CuSO ₄)	>-200	>-200	>-200	<-350	>-200	>-200
Velocidad de Corrosión (μ A/cm ²)	0.1 – 0.5 Moderada	> 1 Muy Elevada	0.1 – 0.5 Moderada	> 1 Muy Elevada	> 1 Muy Elevada	0.1 – 0.5 Moderada
Recubrimiento promedio (mm)	30.5	38	34.5	34.5	28	36
Recubrimiento mínimo para un ambiente B2, 45 mm de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto						
Diámetro varilla promedio (mm)	17.9	17.9	16.9	19.5	19.6	24.9

Clave Localización	U2-NP-P07	U2-NP-P08	U2-P2-P09	U2-P2-P10	U2-P3-P11	U2-P3-P12
Orientación	Sur	Este	Este	Sur	Sur	Este
Altura a partir de la base de la estructura (m)	Nivel de Piso	Nivel de Piso	45	45	60	60
Resistencia a la Compresión Simple $f'c$ (kg/cm ²)	164.57	186.89	---	---	---	---
Resistencia mínima para concretos expuestos a sulfatos, 350 kg/cm² de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto						
Concentración de Cloruros a los 3 cm de profundidad (% en peso de cemento)	0.03	---	0.037	---	0.032	---
Concentración Máxima admisible ACI 318, 0.15 % en peso del cemento en ambiente marino						
Concentración de Sulfatos a los 3 cm de profundidad (% en peso de cemento)	0.38	---	0.25	---	0.30	---
Concentración Máxima admisible Andrade et al 1998, 0.45 % en peso del cemento						
Profundidad de Carbonatación (mm)	11.11	13.42	---	---	---	---
Potencial de Corrosión (mV vs Cu/CuSO ₄)	-200 a -350	>-200	>-200	-200 a -350	>-200	>-200
Velocidad de Corrosión (μ A/cm ²)	0.1 – 0.5 Moderada	0.5 – 1 Elevada	> 1 Muy Elevada	> 1 Muy Elevada	0.5 – 1 Elevada	0.5 – 1 Elevada
Recubrimiento promedio (mm)	39	50	22	36.5	30.5	27.3
Recubrimiento mínimo para un ambiente B2, 45 mm de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de estructuras de Concreto						
Diámetro varilla promedio (mm)	21.1	20.3	20.9	30.6	22.5	20.4

5.2. Profundidad de carbonatación.

En la Figura 1, correspondiente al ensaye de carbonatación en la zona U2-P1-P04, se aprecia claramente un daño considerable ocasionado por los carbonatos en la matriz del concreto y que llega a la profundidad del acero de refuerzo y un severo daño ocasionado por grietas paralelas a la superficie del muro.



Figura 1. Profundidad de carbonatación en la zona U2-P1-P04, donde se observa una profundidad de daño considerable y grietas paralelas a la superficie.

5.3. Concentración de sulfatos

En la Figura 2, se ilustran los resultados del contenido de sulfatos, se aprecia que los valores encontrados desde la superficie varían de 0.25 hasta 1.0% pp del contenido de cemento y a los 3 cm de profundidad se encuentran concentraciones de 0.50 hasta 0.80% pp del contenido de cemento, estos resultados se consideran muy elevados, ya que el umbral límite es 0.40% pp del contenido de cemento. El agua de mar, los gases de las zonas industriales y particularmente el agua que se emplea en las torres de enfriamiento adyacentes, son fuentes con contenidos elevados de sulfatos. Las dos consecuencias del ataque por sulfatos en los componentes del concreto mejor conocidas son la formación de etringita y yeso.

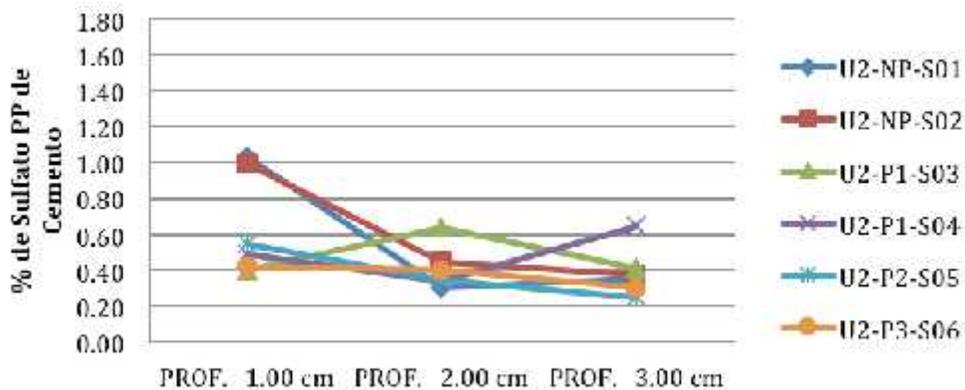


Figura 2. Resultados de concentración de sulfatos, donde se observa que todas las zonas de ensaye están dañadas por sulfatos, debido que se rebasa el umbral límite establecido en 0.40 % pp de cemento.

5.4. Concentración de cloruros

En cuanto al ataque ocasionado por cloruros, se puede afirmar que este no afecta gravemente a las estructuras debido a que no se encuentra cercano al límite establecido de 1.5 % pp de cemento, establecido en el ACI 318. Aunque la zona costera se encuentra cerca de las estructuras, no ha sido factor determinante para este tipo de contaminación a la estructura.

5.6. Velocidad de corrosión

Aunque existen zonas con acero expuesto, y la corrosión de la varilla es mas que evidente, se realizaron ensayos no destructivos de velocidad de corrosión.

De acuerdo a la Tabla 2 , fue más recurrente encontrar valores de velocidad de corrosión moderada a muy elevada en la mayoría de los casos con valores cercanos a $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ como se aprecia en la Figura 3.

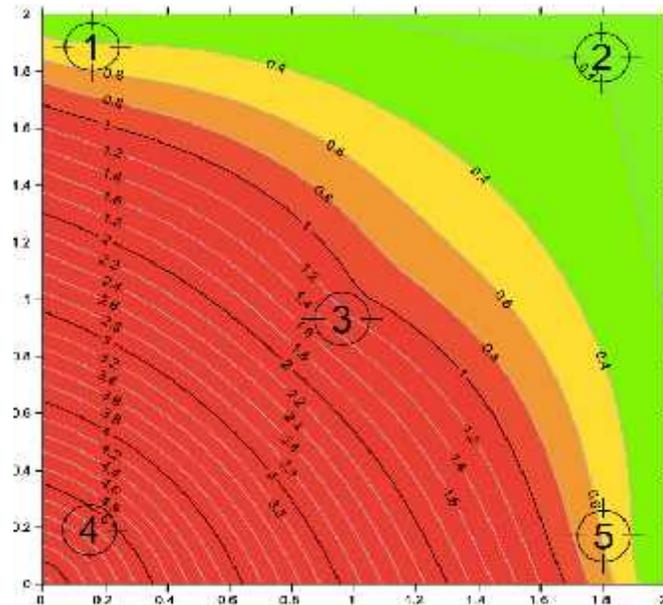


Figura 3. Zona de estudio U2-P1-P04 , donde se observan isovalores de velocidad de corrosión, muy elevada.

4. CONCLUSIONES

Es muy importante evaluar las características del electrolito del sistema, debido que en el se pueden conocer los elementos necesarios de contaminación por agentes agresivos y de esta manera conocer los mecanismos de coorrosión de la estructura en estudio.

Los bajos valores de resistencia a la compresión en ambas torres deduce que son el resultado de un elevado contenido de sulfatos que se presenta en la mayor parte de la superficie y profundidades de carbonatación considerables.

La contaminación por sulfatos debido a los gases generados por las plantas petroquímicas adyacentes generan la formación de etringita tardia en el concreto desarrollando un aumento del volumen sólido en la matriz cementicia, provocando expansión y fisuración. Esta exposición a sulfatos solubles puede sufrir ablandamiento de su matriz cementicia o aumento en la porosidad global, todos estos efectos pueden reducir la durabilidad de la estructura.

Los valores de corrosión muy elevados pueden ser originados a las reparaciones localizadas, realizadas con materiales inadecuados que han provocado grietas y delaminaciones entre concreto reciente y el preexistente. Y también acelerado por la carbonatación que ocasiona una reducción del pH del concreto se puede generar la celda de corrosión, esto complementado por los agrietamientos del concreto y la exposición a fuentes de sulfatos.

5. REFERENCIAS

- [1] *Comercialización de bienes no útiles. Un mecanismo eficaz, accesible y transparente* 13 abril 2016. Consultado en <http://www.pemex.com/bienes-no-utiles/Paginas/default.aspx> el día 11 de abril 2016.
- [2] O. Troconis de Rincón y Miembros de la Red DURAR. Red Temática XV.B. *Durabilidad de la Armadura. Manual De Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, CYTED Maracaibo. Venezuela. (1997).
- [3] DURACON Collaboration. O Troconis de Rincón and coauthors (2007), *Corros Sci*, **49**, 7 (2007)
- [4] ASTM C876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2009)
- [5] 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 Metodo de Ensayo. ONNCCE , México DF, (2015)
- [6] S. Feliú, J.A. González, V. Feliú, Jr S. Feliú, M.L. Escudero, I. Rz Maribona, V. Austiín, C. Andrade, J.A. Bolaño, F. Jiménez F. (1993), *U.S. Patent No. 5.259.944*. (1993)
- [7] NMX-C-501-ONNCCE-2015 Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Metodo de Ensayo. ONNCCE , México DF, (2015)

Diseño y Elaboración de Cámara de Carbonatación

H. Montoya¹, L. López¹, F. Olguín¹, M. Baltazar², L. Lizarraga¹, A. López³, V. Moreno⁴

¹ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca- Tulancingo Km 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184, México.

² Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana, Circ. G. Aguirre Beltrán S/N, Lomas del Estadio, Xalapa, Veracruz, México, CP 91000, México.

³ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Avenida del Charro 450 Norte, Colonia Partido Romero, Cd. Juárez, Chihuahua. C.P. 32310, México.

⁴ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ingeniería Unidad Torreón

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y la elaboración de una cámara de carbonatación, donde se establecieron las condiciones necesarias para dismantelar un equipo de aire acondicionado en obsolescencia y hacer una adecuación de este para habilitarlo como una cámara de carbonatación para concreto realizando una metodología de acción de tal forma que se alcance la meta de acelerar el proceso de carbonatación en especímenes de concreto.

Palabras clave: Corrosión, Carbonatación,

Autor de contacto: Luis Daimir López León. (luis_lopez@uaeh.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

La carbonatación es una manifestación de corrosión que afecta de sobremanera el entorno humano, causando estragos ecológicos en forma de contaminación, además de representar riesgos en el factor de seguridad de estructuras estructuradas por componentes metálicos y por ende representa grandes pérdidas económicas. La carbonatación del concreto es un proceso cotidiano, es el resultado de la reacción de los hidróxidos de calcio presentes en los poros del concreto con el bióxido de carbono presente en el ambiente en condiciones óptimas de humedad, tanto en el ambiente como en el concreto. En esta reacción ocurre un cambio de potencial de hidrogeno en los poros del concreto, el hidróxido de calcio que tienen un pH alto al reaccionar con el bióxido de carbono del ambiente forman un carbonato de calcio que posee un pH más neutral lo cual afecta bastante al acero de refuerzo ya que la varilla empieza a corroerse con valores de pH 9.5 o menores. El proceso de la carbonatación se da de forma natural al igual que los factores que intervienen en su rápida o lenta penetración, también son naturales o propios del concreto, los factores que más resaltan son la humedad y la permeabilidad del concreto. Existen condiciones de humedad en las cuales la carbonatación se propaga rápidamente que es alrededor del 50 % de humedad relativa. En el caso de la permeabilidad, se carbonata más rápido el concreto permeable, del mismo modo el concreto mal vibrado o que presenta huecos en su interior proporcionará un rápido esparcimiento (Kobayashi, 1989).

Cuando se habla de carbonatación, se hace referencia al fenómeno de corrosión que se lleva a cabo en el concreto a nivel molecular. Este fenómeno provoca que se debiliten las estructuras, manifestándose en forma de cuarteaduras en paredes, techos, pisos, etc. Dejando un espectro de desgaste interno que con el paso del tiempo presenta desgajamientos. Es evidente que la presencia de la carbonatación en las construcciones familiares o industriales representa un riesgo para la integridad de las personas (Malami, 1994).

En este proyecto se pretende sustentar la elaboración de una máquina llamada “Cámara de carbonatación” con la cual se busca simular la aceleración de corrosión de concreto reforzado, como parte de un proyecto que se lleva a cabo en la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, cuya finalidad es obtener información que permita generar nuevos métodos de control a la corrosión, particularmente a la carbonatación.

2. PROCEDIMIENTO

Como se ha venido mencionando, el proyecto consiste en la elaboración de una cámara de carbonatación. Es por ello que se presentan tres fases de gran importancia para la elaboración y sustento del proyecto.

La primera fase corresponde al diseño técnico de la cámara de carbonatación. En este apartado se debe generar un esquema gráfico, el cual se tomará como base para realizar el prototipo. Justamente el siguiente punto es la elaboración del dispositivo. El requerimiento de materiales específico será detallado en la parte del diseño. Por ello es importante que el diseño incluya

especificaciones técnicas que satisfagan los parámetros mencionados en el desglose de funciones de una cámara de carbonatación.

La elaboración del dispositivo consta de 2 fases, las cuales consisten en el desmantelado de un sistema de aire acondicionado y el acondicionamiento del mismo para transformarlo en una cámara de carbonatación.

2.1. Diseño de cámara de carbonatación

En esta fase de la investigación se especificarán los pormenores a considerar para llevar a cabo el diseño de la cámara de carbonatación.

Como se ha mencionado con anterioridad la construcción de esta cámara de carbonatación está determinada por dos fases; la primera correspondiente al desmantelado de un sistema de aire acondicionado, y la segunda consiste en la transformación de una serie de materiales tales que conllevan a la transformación de la estructura inicial en un dispositivo con características adecuadas para acelerar el proceso de la carbonatación en el concreto.



Figura 1. Componentes de cámara de carbonatación.

Por lo antes mencionado, el diseño de la cámara tuvo que adaptarse a una serie de medidas determinadas, que en un orden de coordenadas x, y, z, se expresan de la siguiente manera: 0.94 m x 1.75 m x 1.07 m. El material del interior es lámina revestida con impermeabilizante, las tuberías que se requirieron son de cpvc con un \varnothing de 1 1/2". Por último, la cámara es forrada por un conjunto de paneles de madera; los cuales cuentan con humidificadores fijados en cada uno de los costados, siendo estos 2 por cada costado de la cámara (figura 1).

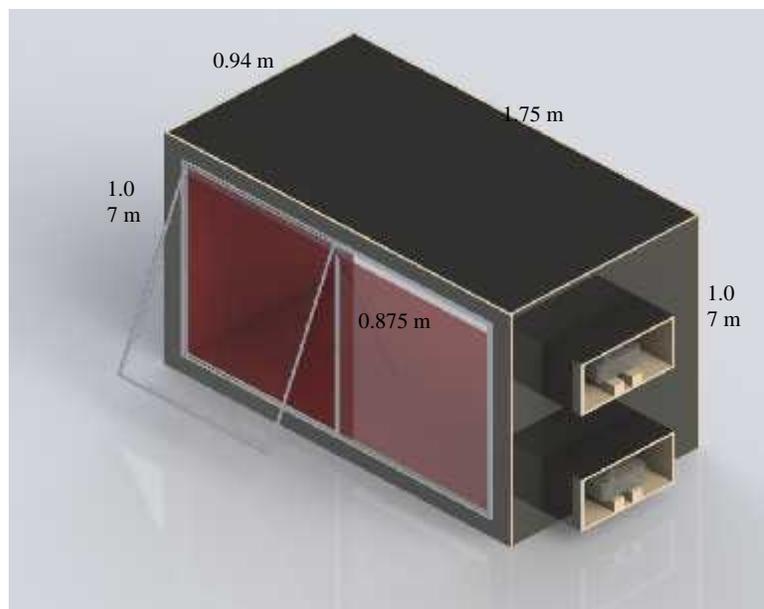


Figura 2. Diseño preliminar de cámara de carbonatación.

2.1.1. Adecuación a parámetros.

Es importante identificar los parámetros pertinentes, al momento de diseñar una cámara de carbonatación. Los parámetros a considerar están fundamentados con base a las funciones que se pretende realice la cámara de carbonatación, de tal manera que sea congruente lo que el funcionamiento con el objetivo planteado.

2.1.2. Abastecimiento de aire.

El abastecimiento de aire comprimido para todo el sistema tiene que estar libre de aceites y otras impurezas, y mantenidos a una presión de operación que garantice el máximo tiempo de residencia posible de la masa de gas dentro de la cámara, y que supere la caída de presión del gas en el sistema de humidificación. Las pruebas experimentales indican que el rango de valores de 103,3-110,3 kPa (15-16 psi) cumplen los requerimientos antes mencionados (Treybal, 2000).

Finalmente, el aire que se adapta para reproducir las condiciones de carbonatación, entra a un medio que debe mantenerse hermético. Las condiciones del aire, congregan factores como pH, temperatura y salinidad. Dada la transferencia de condiciones por medio de aire se genera un ambiente interno (figura 2).

2.1.3. Condiciones internas.

El ambiente planteado con anterioridad hace alusión básicamente a la concentración deseada de CO₂ dentro de la cámara se obtiene mediante la mezcla de dióxido de carbono (comercialmente puro) y aire, proveniente de la torre humidificadora. Se utilizan dos medidores de flujo para controlar el volumen de cada gas que pasa al interior de la cámara. A partir del compresor, se pasa aire seco (normalmente a 33% HR) a través de ésta, la cual se diseñó por separado.

Correlaciones para el diámetro y la altura de la misma se encuentran en el libro “Operaciones de transferencia de masa” (Treybal, 2000) como una función del flujo de aire y tiempo de residencia, sin embargo, se puede proceder en forma empírica fijando el flujo de aire seco, y variando la altura del líquido en la columna hasta que la humedad del gas de salida alcance el valor deseado (70%HR, $Y = 0,0182 \text{ KgH}_2\text{O/Kg gas seco}$, $y = 0,0283 \text{ molH}_2\text{O/mol Aire húmedo}$).

2.1.4. Funcionamiento y descripción de partes

La cámara deberá cumplir con ciertas dimensiones que permitan la incursión de elementos que funjan como dispositivos funcionales sin alterar el funcionamiento objetivo de la cámara.

Esta cámara, pretende dimensiones de 1.22 m de largo, 0.32 m de ancho y 0.45 m de alto, tendrá forma de prisma rectangular siendo en su mayor parte de vidrio a excepción de la tapa que es de acrílico con un espesor de 1 cm, la cual se fijará en la cámara mediante una cinta selladora que evita fugas del interior de la cámara. Esta tapa tendrá dos orificios de 5 mm que sirven como salidas de aire y dos orificios más de 19 mm que servirán para poder insertar un medidor de humedad relativa (HR); estos últimos serán adecuados con tubo de PVC de 5 cm de largo con rosca y tapón para los casos en los que el medidor de humedad no está colocado. La tapa contará con otro orificio de 4 mm que servirá como entrada de aire. Además, en esta tapa se colocarán bornes para conexiones eléctricas, cuya finalidad será la conexión entre las barras de refuerzo y al electrodo de titanio de cada una de las probetas prismáticas de concreto para poder monitorear el potencial.

Dentro de la cámara se conectó una manguera desde el orificio de entrada de aire hasta la parte media del fondo de la cámara, en donde se colocó un ventilador y justo por encima de éste, en la parte media superior, se situó un deflector para lograr una mejor distribución del flujo de aire, como se aprecia en la Figura 7.

En la figura 3 se pueden observar los elementos que se pretende tenga la cámara de carbonatación. Se muestran las medidas propuestas de tal forma que no se impida el funcionamiento de los dispositivos que se emplean en ésta. Además, se muestra un medidor de HR que se colocará en la parte externa de la cámara, y otros elementos tales como una manguera y un tubo de PVC adaptado con un ventilador que impulsará aire hacia un deflector.

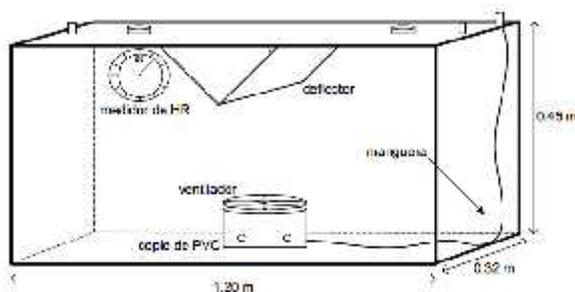


Figura 3. Esquema de cámara de carbonatación

El funcionamiento planteado para esta cámara de carbonatación se plantea de la siguiente manera. Para obtener la concentración deseada de CO_2 (alrededor del 4%) y de humedad relativa

(al 60%), se mezcló el flujo de CO₂, proveniente de un tanque comercial de 20 kg, con aire a dos niveles de humedad relativa (aire seco y aire húmedo) resultantes del trabajo de un compresor de aire. Se controlará el volumen de los gases (aire y CO₂) por medio de medidores de flujo de distintas capacidades, utilizándose tres de ellos: uno para controlar el volumen de CO₂ (de menor capacidad) y, los otros dos (de igual capacidad) para aire seco y húmedo. La salida del compresor se dividirá en dos flujos, uno en dirección al medidor de flujo de aire seco y otro en dirección a un humidificador, el cual es un recipiente de PVC (tubo vertical) cerrado, con agua, que cuenta con dos orificios: uno situado en un costado en la parte inferior y el otro en la parte de arriba, y también cuenta con un productor de burbujas en el interior (Figura 3).

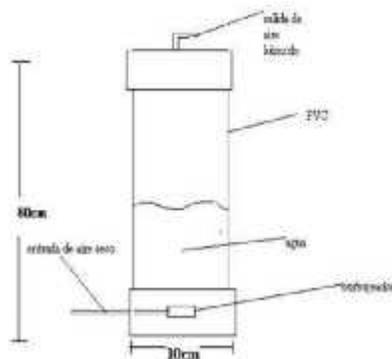


Figura 4. Representación de dispositivo humidificador.

En la figura 4 se esquematiza el diseño del humidificador que desempeñará el rol de inducir las condiciones al medio interno de la cámara. Además, se muestran las dimensiones propuestas.

El flujo a la salida del humidificador se mezcló junto con el aire seco del compresor y el flujo de CO₂ para dirigirse hacia el interior de la cámara (Figura 4). Los medidores de flujo de aire seco y húmedo se ajustaron periódicamente para obtener una humedad relativa del 60%, aproximadamente.

Escriba directamente sobre este formato. El contenido del trabajo empezará en la segunda página, con márgenes de 2.5 cm (1") por los cuatro lados; podrá ser escrito en español, portugués o inglés para la etapa de revisión. Cada autor elegirá el lenguaje de su preferencia para la evaluación, siendo obligatorio el segundo idioma en la versión aceptada siendo uno de los idiomas el inglés. Se dejará un espacio entre el título de la sección y la primera línea de cada párrafo.

3. RESULTADOS

3.1. Prueba de la Fenolftaleína

El método más común para determinar la profundidad de carbonatación en concreto es usando un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína) aplicándola en la superficie del corte en el concreto que se pretende analizar. Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por

debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10 (figura 5-8). Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 (Moreno, 2006)



Figura 5. Cilindro 1 sin exposición dentro de la cámara (fenolftaleína).



Figura 6. Cilindro 1 con exposición en la cámara (fenolftaleína).



Figura 7. Cilindro 2 sin exposición en la cámara (fenolftaleína).



Figura 8. Cilindro 2 con exposición a la cámara (fenolftaleína).

4. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño y se manufacturó una cámara de carbonatación que se ajusta a la norma de calidad UNE-EN_13295:2005.

Se establecieron las condiciones necesarias para dismantelar un equipo de aire acondicionado en obsolescencia y hacer una adecuación de este para habilitarlo como una cámara de carbonatación para concreto, ajustándose a la norma internacional UNE-EN_13295:2005.

Se logró recubrir el interior de la cámara con un material resistente a la corrosión y que no permita el escape de CO₂ y de la humedad relativa inyectada dentro de la cámara; formando un ambiente adecuado que propicia la aceleración de la carbonatación en concreto, siendo este un dispositivo funcional, verificando el acierto del diseño realizado.

Tras la aplicación de pruebas de fenolftaleína en los especímenes de concreto se comprobó que la cámara de carbonatación logra acelerar el proceso, siendo el pH el indicador que corrobora el suceso.

Aunque una conclusión puede resumir los aspectos fundamentales del artículo, es recomendable redactar unas conclusiones finales en el artículo.

En caso de que usted haga conclusiones, no utilice el resumen como la conclusión. Una conclusión podría elaborarse haciendo referencia a la importancia del trabajo o sugiriendo sus aplicaciones y generalizaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

A la UAEH por los recursos financieros para desarrollar este proyecto.

6. REFERENCIAS

Kobayashi, K. (1989). Influence of alkali on carbonation of concrete, part I. Preliminary tests with mortar specimens. Cement and Concrete Research.

Malami, C. (1994). Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures. Cement and Concrete Research, 1994.

Moreno, E. (2006). Determinacion del pH de la solucion de los poros de concreto despues de un proceso acelerado de carbonatacion. I. Ingenieria V.10, pp. 5-12

Treybal, R. (2000). Operaciones de Transferencia de Masa", McGraw-Hill ed., 2da Edición, México D.F.

UNE-EN 13295(2005). Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación.

Estudio de la carbonatación de morteros adicionados con ceniza de bagazo de caña con alto contenido de PxC

M. A. Maldonado-García¹, **P. Montes-García**², P. L. Valdez-Tamez³

¹Instituto Politécnico Nacional. Estudiante de doctorado CIIDIR Oaxaca. mmaldonadog1500@alumno.ipn.mx

²Instituto Politécnico Nacional. Grupo de materiales y Construcción CIIDIR Oaxaca pmontes@ipn.mx

³Cuerpo Académico de Tecnología del Concreto FIC. UANL. pedro.valdeztz@uanl.edu.mx

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el riesgo de carbonatación de placas de mortero reforzado base cemento portland adicionadas con 0, 10 y 20% ceniza de bagazo de caña (CBC) con alto contenido de pérdidas por ignición (PxC). Las placas fueron expuestas en una solución de NaCl al 3% y ciclos de humedecimiento y secado durante 6 años. Se realizaron pruebas de carbonatación utilizando fenolftaleína y se obtuvieron mediciones del pH de la reserva alcalina de los morteros. Los resultados muestran que la adición de CBC con alto contenido de PxC produce un decremento de la reserva alcalina de los morteros, lo cual origina una carbonatación parcial de las placas. Sin embargo, los valores de pH de la reserva alcalina de los morteros fueron superiores al valor mínimo requerido para ocasionar corrosión del acero galvanizado de las placas.

Palabras clave: Carbonatación, reserva alcalina, pérdidas por ignición, corrosión.

Autor de contacto: Omar. F. Ojeda Farías (omar_2355@hotmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

La Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) es un subproducto generado en la industria azucarera durante la producción de alcohol y azúcar de caña. En México, uno de los principales productores de azúcar de caña a nivel global, la Unión Nacional de Cañeros reporta una producción de aproximadamente 54 millones de toneladas de caña de azúcar, generando aproximadamente 15 millones de toneladas de bagazo anualmente. Akram et al. 2009, mencionan que por cada tonelada de caña de azúcar producida se genera aproximadamente 0.62% de cenizas residuales. De acuerdo con lo anterior en México se genera aproximadamente 0.34 millones de toneladas de CBC, provocando problemas de contaminación.

La CBC se compone principalmente de óxidos de sílice, aluminio y fierro. Con base en lo anterior, diversas investigaciones la han evaluado como sustituto parcial del cemento Portland, mencionando que posee propiedades puzolánicas y que mejora la microestructura y algunas propiedades mecánicas de mezclas de mortero y concreto (Martirena et al. 1998, Ganesan et al. 2007, Cordeiro et al. 2009, Chusilp et al. 2009, Bahurudeen y Santhanam 2015); además, algunas de estas investigaciones han sugerido mejoras en la durabilidad. No obstante, en algunos casos la CBC puede tener un alto contenido de pérdidas por ignición (PxC) (superior al 5% en peso). Lo anterior debido a que generalmente el bagazo es calcinado de manera poco controlada dentro de las calderas durante el proceso de cogeneración (Cordeiro et al. 2009).

Algunas investigaciones han evaluado el efecto de la adición de CBC con un alto contenido de PxC en la durabilidad de mezclas de mortero y concreto ante la penetración de cloruros (Chusilp et al. 2009, Somna et al. 2012); sin embargo, muy poco se ha reportado acerca del efecto de la CBC en el proceso de carbonatación. Al respecto, Jiménez 2013 reportó que la adición de 10 y 20% de CBC incrementó la profundidad de carbonatación de concretos ternarios adicionados con CV sometidos a carbonatación acelerada durante 6 meses. Por otra parte, Ríos-Parada et al. 2013 reportaron que la adición de CBC disminuyó la alcalinidad en mezclas de concreto ternario adicionado con CV; sin embargo los valores de pH, obtenidos a través de una suspensión de concreto pulverizado y agua destilada con proporción de 1:1, se encuentran por encima de los valores críticos de pH reportados en la literatura para considerar despasivación del acero de refuerzo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el riesgo de carbonatación de placas de mortero reforzado adicionadas con CBC con un alto contenido de PxC. Las placas corresponden a un proyecto a largo plazo en el cual se evalúa el efecto de la adición de CBC en la durabilidad de morteros reforzados expuestos a deterioro por corrosión mediante ciclos de humedecimiento y secado en una solución de NaCl. Las pruebas de carbonatación mediante fenolftaleína y de medición de la reserva alcalina fueron realizadas después de 6 años durante la autopsia de una de las probetas de cada tratamiento propuesto en la investigación.

2. METODOLOGÍA

Materiales

Los materiales empleados para la elaboración de las placas de mortero reforzado fueron Cemento Portland Compuesto marca Apasco® (CPC 30R), CBC tamizada a través de la malla No. 200 ASTM (75µm), arena de río con densidad relativa de 2.65 g/cm³ y módulo de finura de 2.94 (la cual cumple con la norma ASTM C 33), agua bidestilada, y aditivo hiperfluidificante a base de policarboxilatos Plastol 4000® (el cual cumple con la norma ASTM C 494 como reductor de agua de alto rango clase F). El acero de refuerzo consistió de mallas de acero galvanizado hexagonal de ½” de abertura y 1mm de diámetro.

La CBC fue recolectada de un predio propiedad del ingenio azucarero “Constancia”, ubicado en la comunidad de Tezonapa, Veracruz, México. Esta ceniza es producida a partir de la calcinación del bagazo de caña, a temperaturas entre 550 a 700°C durante la producción de azúcar y es recuperada mediante aspersión de agua. Una vez recolectada, la CBC fue llevada al laboratorio en donde se tamizó a través de la malla No. 4 ASTM con la finalidad de retirar vegetación y partículas ajenas (< 1% en peso); asimismo se homogenizó y secó durante 24 horas a 105°C en un horno eléctrico. A continuación, la CBC fue tamizada por la malla No. 200 ASTM durante 4 minutos, postratamiento seleccionado de trabajos previos por ser el que demanda menor uso de energía para su activación puzolánica (Hernández 2009). Posteriormente se determinó su composición química mediante métodos gravimétricos e ICP.

Proporcionamiento de mezclas y elaboración de probetas

Se elaboraron tres mezclas de mortero en las cuales el CPC fue reemplazado parcialmente por 0, 10 y 20% de CBC (mezclas CBC0, CBC10 y CBC20, respectivamente). Se consideró una relación agua/materiales cementantes (a/mc) de 0.63 y una relación cemento/arena de 1:3 para todas las mezclas. Solo las mezclas con adición de CBC requirieron de aditivo hiperfluidificante para mantener una fluidez de 110±5% establecida en la norma ASTM C 1437. Lo anterior debido a que la CBC incrementaba la viscosidad de las mezclas en estado fresco, dificultando su trabajabilidad. Los proporcionamientos de mezclas se muestran en la tabla 1. Las mezclas de mortero fueron empleadas para elaborar placas de mortero reforzado con dimensiones de 250 x 200 x 30mm. El refuerzo de las placas consistió en dos capas de malla de acero galvanizado hexagonal colocadas en el centro de cada probeta. Todas las placas fueron compactadas en dos capas durante 5 segundos utilizando una mesa vibratoria; en seguida fueron colocadas en un cuarto húmedo durante 24 horas. Transcurridas las 24 hrs, las placas fueron desmoldadas y curadas en una solución de Ca(OH)₂ durante 0, 7 y 28 días. En total se elaboraron 3 placas de cada una de las mezclas de mortero por cada tiempo de curado. Posteriormente las placas fueron expuestas a una solución de NaCl al 3% mediante ciclos de humedecimiento y secado de 12 horas cada uno. Transcurridos seis años se seleccionaron una placa de mortero por cada mezcla, se les practicó autopsia a cada placa, y posteriormente se les realizaron pruebas de carbonatación y de reserva alcalina.

Tabla 1. Proporcionamiento de mezclas de mortero, kg/m³

Mezcla	CPC, kg	CBC, kg	Arena, kg	Agua, kg	Aditivo, ml/kg
CBC0	466.0	0	1397.9	293.6	0
CBC10	416.8	46.3	1389.5	291.8	9.0
CBC20	368.3	92.1	1381.2	290.0	17.0

Pruebas de carbonatación

La prueba de carbonatación se llevó a cabo conforme a las recomendaciones del RILEM CPC-18 aplicando una solución de fenolftaleína al 1% en algunos de los diversos cortes transversales realizados a las placas de mortero reforzado durante la autopsia.

Pruebas de alcalinidad

La determinación de la reserva alcalina de cada una de las placas se realizó midiendo el pH de una suspensión de 10gr de polvo de mortero y 10gr de agua destilada mezclados durante 2 minutos con una espátula. Los polvos se obtuvieron pulverizando las muestras de mortero (2 muestras por cada una de las placas) utilizando un mortero de porcelana y acetona. Durante el proceso de pulverizado se retiraron algunas partículas de agregado y posteriormente las muestras fueron tamizadas por la malla No. 200 ASTM. Las suspensiones no fueron filtradas puesto que un proceso de filtrado podría ocasionar lixiviación del Ca(OH)₂ y dilución de la concentración de iones sodio y potasio de las muestras teniendo como resultado valores de pH aproximados al de una solución de Ca(OH)₂ saturado y no al pH de la pasta de cemento hidratado (Moreno 2006). Las mediciones del pH de las suspensiones fueron obtenidas con base en los procedimientos de la norma ASTM D 1293 utilizando un pH-metro marca Hanna-HI 8424 calibrado con tres soluciones con valores de pH de 4.01, 7.00 y 9.00. Los valores de pH de las suspensiones fueron registrados una vez que se observó una variación de 0.01 unidades por minuto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la CBC

Los resultados de composición química muestran que la suma de óxidos mayores (SiO₂+ Al₂O₃ + Fe₂O₃) de la CBC es de 63.90% y las pérdidas por ignición (PxC) son de 24.15% (Tabla 2). El alto contenido de PxC de la CBC puede atribuirse a las variaciones de la temperatura y circulación de aire durante el calcinado del bagazo. Sin embargo, de acuerdo con trabajos previos, este alto contenido de PxC de la CBC no afecta negativamente su índice de actividad resistente (Hernández 2010).

Tabla 2. Composición química del CPC y de la CBC utilizadas en el presente estudio

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	PxC
CPC	23.86	5.77	2.19	0.92	1.36	0.91	0.12	50.76	6.97
CBC	51.66	9.92	2.32	2.10	1.44	1.23	0.90	2.59	24.15

Estudio de la carbonatación de morteros adicionados con ceniza de bagazo de caña con alto contenido de PxC.

Pruebas de carbonatación

Las pruebas de carbonatación utilizando el indicador de fenolftaleína muestran que aparentemente ninguna de las placas evaluadas experimentó carbonatación (Figura 1). No obstante, se observó atenuación en la intensidad de la coloración de la fenolftaleína conforme se incrementa el contenido de CBC en los morteros. Esta atenuación puede atribuirse a efectos visuales puesto que la matriz cementante de los morteros con adición de CBC es de coloración más oscura en comparación con los morteros sin CBC. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que dicha atenuación de la coloración del indicador de fenolftaleína corresponda a que los morteros adicionados con CBC se encuentren parcialmente carbonatados a causa de un menor contenido de portlandita (Ca(OH)_2) o a causa del alto contenido de PxC. Ashraf 2016 menciona que el método del indicador de fenolftaleína es solamente aproximado, mostrando una coloración roja o rosa en regiones de concreto no carbonatada; no obstante, estas áreas podrían estar parcialmente carbonatadas.

Gastaldini et al. 2007 mencionan que la ausencia de Ca(OH)_2 , consumida durante el proceso de reacción puzolánica, puede originar la liberación de CaO del gel de C-S-H, lo cual a su vez, puede generar carbonatos. Investigaciones recientes han reportado el decremento del contenido de Ca(OH)_2 conforme se incrementa la edad de curado en mezclas de mortero y concreto con adición de CBC con alto contenido de PxC (Maldonado 2012, Ríos-Parada et al. 2013); asimismo han reportado la presencia de carbonatos de calcio (CaCO_3). Sin embargo, el contenido de CaCO_3 podría estar influenciado por el tipo de agregado pétreo empleado en las mezclas de mortero o concreto.

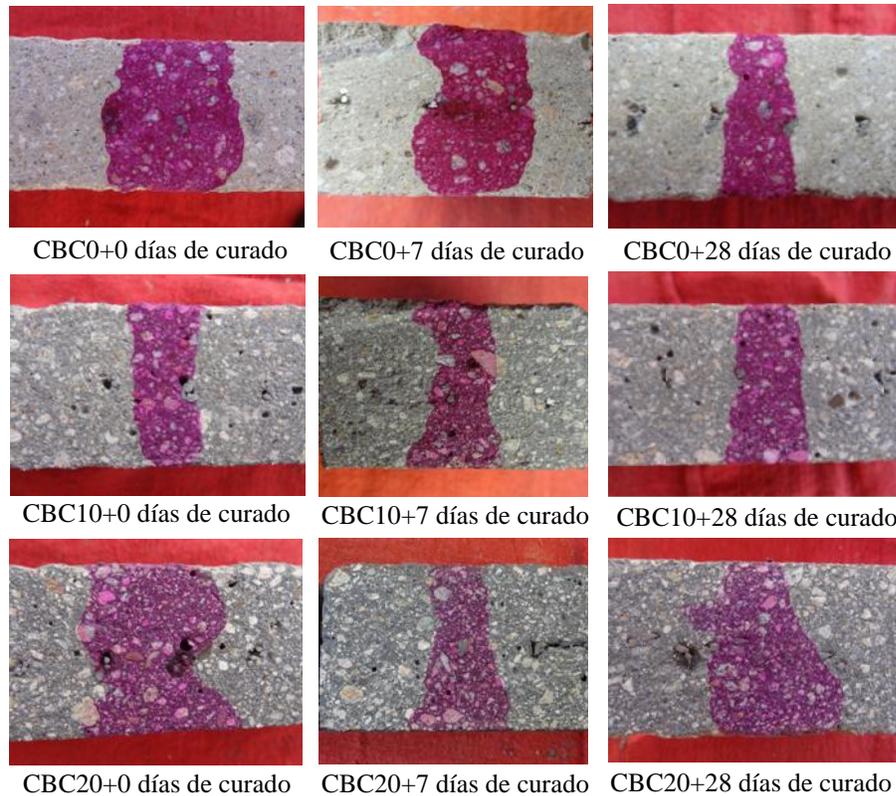


Figura 1. Resultados selectos de la prueba de carbonatación.

Pruebas de alcalinidad

La figura 2 muestra un decremento de la alcalinidad de los morteros conforme incrementa el contenido de CBC con alto contenido de PxC, mostrando poca variabilidad. No obstante, los valores de pH obtenidos se encuentran por encima del valor mínimo de pH requerido para despasivar al acero galvanizado utilizado como refuerzo en las placas. Sistonen 2009 menciona que el acero galvanizado permanece en estado pasivo aún cuando el valor del pH del concreto decremente hasta un valor de 9.5. Un comportamiento similar, en el cual la adición de CBC con alto contenido de PxC decrementó la alcalinidad de concretos fue reportado por Ríos-Parada et al. 2013.

Los resultados de las pruebas de alcalinidad sugieren que la pérdida de pH de los morteros adicionados con CBC se originó a consecuencia de dos mecanismos: El primer mecanismo sugiere que el alto contenido de PxC debió permitir una mayor entrada de aire en las mezclas de mortero en estado fresco creando una red de poros, esta red de poros a su vez permitió la entrada de CO₂ antes de que los procesos de reacción puzolánica hicieran la matriz cementante más densa en comparación con el mortero sin adición de CBC. El segundo mecanismo sugiere que la adición de CBC redujo el valor del pH de los morteros debido a la menor cantidad de cemento utilizada en las mezclas, lo cual a su vez disminuyó la cantidad de Ca(OH)₂ durante el proceso de hidratación del cemento. Sun et al. 2004 reportaron que algunos materiales suplementarios al Estudio de la carbonatación de morteros adicionados con ceniza de bagazo de caña con alto contenido de PxC.

cemento Portland, tales como la ceniza volante, el humo de sílice y la escoria granulada de alto horno, han reducido el valor de pH de pastas cementantes, sobre todo cuando se adicionan más de un material suplementario.

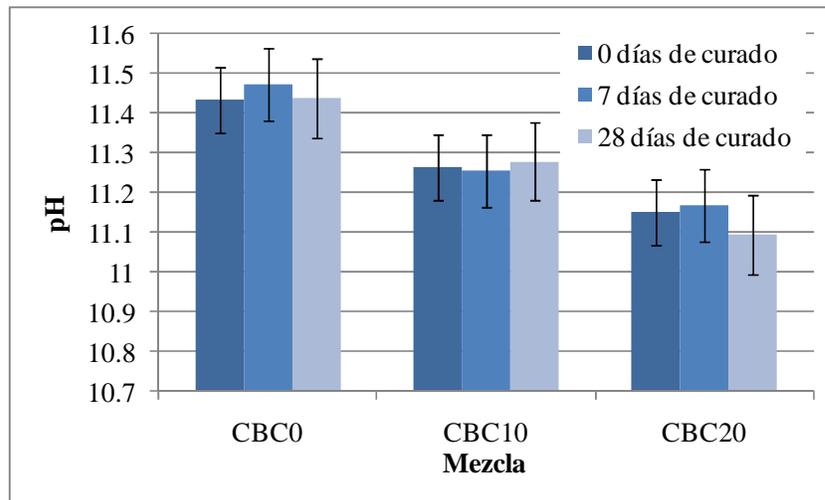


Figura 2. Resultados de pruebas de alcalinidad en cada una de las probetas evaluadas (promedio de dos mediciones de pH).

Investigaciones previas han dado seguimiento, durante 6 años, al proceso de corrosión de las placas de mortero evaluadas por carbonatación en este trabajo, reportando corrosión activa del sistema (Maldonado 2012, Bohórquez 2015). Sin embargo, de acuerdo con los resultados de las pruebas de carbonatación utilizando el indicador de fenolftaleína y con las pruebas de alcalinidad, se puede descartar que el proceso de corrosión del acero de refuerzo de las placas de mortero adicionadas con CBC con alto contenido de PxC sometidas en una solución de NaCl y a ciclos de humedecimiento y secado ocurra debido a problemas de carbonatación, siempre y cuando el valor de pH de las del mortero se mantenga por encima de 9.5 (valor crítico considerado para ocasionar corrosión por carbonatación en el acero galvanizado).

Por otra parte, se puede decir que la pérdida de alcalinidad y por ende el surgimiento de carbonatación parcial de los morteros adicionados con CBC con alto contenido de PxC podría ser benéfica, disminuyendo la difusión de iones cloruros a través de la matriz cementante. Recientes investigaciones mencionan que la carbonatación puede promover una redistribución de los iones cloruro en el concreto, lo cual provoca que cierta cantidad de cloruros localizados en regiones carbonatadas migren hacia regiones no carbonatadas (Ye et al. 2016). Con base en lo anterior, se sugiere que algunos iones cloruros quedan atrapados dentro de la matriz cementante de los morteros parcialmente carbonatados (siempre y cuando el valor del pH no decremente a valores inferiores a los reportados hasta ahora). Posteriormente estos cloruros son transportados hacia la superficie de las probetas durante el ciclo de secado, en el cual el agua tiende a salir debido a diferencia de gradientes, evitando su acumulación en la interface con el acero de refuerzo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas de carbonatación mediante fenolftaleína sugieren que la adición de CBC con un alto contenido de PxC como sustituto parcial del cemento Portland no contribuye de manera significativa a la carbonatación de morteros.

Los resultados de pruebas de alcalinidad sugieren que el incremento del contenido de CBC con alto contenido de PxC disminuye el pH de los morteros, sin embargo, los resultados se encuentran por encima de los valores límite reportados en la literatura para provocar despasivación del acero del acero galvanizado utilizado como refuerzo.

Con base en los resultados obtenidos puede descartarse que el mecanismo de corrosión de las placas de mortero reforzado, sometidas a ciclos de humedecimiento y secado mediante una solución de NaCl, se encuentre influenciado por problemas de carbonatación.

5. RECOMENDACIONES

Evaluar el contenido de CaO, Ca(OH)₂ y CaCO₃ de los morteros adicionados con CBC con alto contenido de PxC a través de técnicas de caracterización microestructural tales como difracción de rayos X y análisis termogravimétricos.

Estudiar el efecto combinado de la carbonatación parcial e ingreso de iones cloruros en los morteros adicionados con CBC con alto contenido de PxC mediante modelos de predicción de vida útil basados en cambios de la red de poros y equilibrio químico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional (IPN), al CIIDIR-unidad Oaxaca (IPN), a la SIP-IPN y a la COFAA-IPN por las facilidades y apoyos económicos otorgados durante la realización de este proyecto. Asimismo se agradece a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por las facilidades otorgadas durante la estancia de investigación realizada por M. A. Maldonado-García durante el periodo febrero-junio de 2016. Finalmente se agradece al CONACyT por la beca de doctorado otorgada a M. A. Maldonado-García.

REFERENCIAS

- Akram Tayyeb, Memon Shazim Ali, Obaid Humayun. Production of low self compacting concrete using bagasse ash. 2009. Construction and Building Materials, 23, pp.703-712.
- Ashraf Warda. 2016. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. Construction and Building Materials, 120, pp.558-570.
- Bahurudeen A., Santhanam Manu. 2015. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. Cement and Concrete Composites, 56, pp.32-45.
- Bohórguez Cruz Héctor Alfonso. 2015. Estudio de la durabilidad del ferrocemento con ceniza de bagazo de caña. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México.

Estudio de la carbonatación de morteros adicionados con ceniza de bagazo de caña con alto contenido de PxC.

- Chusilp Nuntachai, Jaturapitakkul Chai, Kiattikomol Kraiwood. 2009. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23, pp.3523-3531.
- Cordeiro G.C., Toledo Philo R.D., Fairbairn E.M.R. 2009. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23, pp.3301-3303.
- Ganesan K., Rajagopal K., Thangavel K. 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29, pp.515-524.
- Gastaldini A.L.G., Isaia G.C., Gomez N.S., Sperb J.E.K. 2007. Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators, *Cement and Concrete Composites*, 29 (23), pp.176-180.
- Hernández Toledo Ur Iván. 2010. Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Oaxaca.
- Maldonado García Marco Antonio. 2012. Efecto de la adición de ceniza de bagazo de caña en la microestructura y durabilidad del ferrocemento. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Oaxaca.
- Martirena Hernández J.F., Middendorft B., Gehrke M., Budelmann H. 1998. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 28 (11), pp.1525-1536.
- Montakarntiwong Kawee, Chusilp Nuntachai, Tangchirapat Weerachart, Jaturapitakkul Chai. 2013. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. *Materials and Design* 49, pp. 414-420.
- Moreno Eric I. 2006. Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 10-3, pp.5-12, ISSN: 1665-529X.
- Sistonen Esko. 2009, 'Service life of hot-dip galvanized reinforcement bars in carbonated and chloride-contaminated concrete', Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, Finland.
- Sun Wei, Zhang Yunsheng, Liu Sifeng, Zhang Yanmei. 2004. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion steel bars in green high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, pp.1781-1785.
- Somna Rattapon, Jaturapitakkul Chai, Rattanachu Pokpong, Chalee Wichain. (2012). Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Design*, 36, pp.597-603.
- Unión Nacional de Cañeros A. C. de México. (2014). consultado el 13 de julio de 2016, www.caneros.org.mx
- Ye Hailong, Jin Xianyu, Fu Chuanqing, Jin Nanguo, Xu Yibin, Huang Tao. 2016. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. *Construction and Building Materials*, 112, pp.457-463.

Cenizas de origen natural como posibles sustitutos de cemento portland

O. T. Maza Ignacio¹, V. G. Jiménez Quero², E. Guerrero- Lestarjette³

¹Estudiante de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales del IPN CIIDIR Oaxaca.

² Profesor-Investigador del Instituto Politécnico Nacional (IPN) CIIDIR Oaxaca.

³ Centro de Investigación en Materiales Avanzados Unidad Chihuahua.

Palabras clave: Carbonatación, reserva alcalina, pérdidas por ignición, corrosión.

Autor de contacto: Omar. O. T. Maza Ignacio (olimaza24@hotmail.com)

INTRODUCCIÓN

Se ha demostrado que la incorporación de materiales puzolánicos al concreto hidráulico le confieren: mejor resistencia al agrietamiento térmico, mejor resistencia última, e incremento en la impermeabilidad debido al refinamiento de los poros. Su uso se ha propuesto también en estructuras de concreto reforzado con la finalidad de mitigar el problema del deterioro prematuro, reducir los costos de producción y disminuir los gases de efecto invernadero (Metha and Monteiro, 2006). En países industrializados los materiales puzolánicos más empleados son: ceniza volante, humo de sílice y escoria de alto horno, éstos son desechos de origen industrial (Antiohos and Papadakis, 2007).

En México, ante la falta de puzolanas industriales, se requiere identificar y evaluar materiales alternativos que permitan, desde el punto de vista técnico mejorar la resistencia y durabilidad de materiales basados en cemento (pastas, morteros y concretos), y desde el punto de vista ambiental reducir la emisión de CO₂ que se genera durante la elaboración del cemento portland ya que los materiales puzolánicos puede sustituir hasta un 40% de cemento.

Los métodos más conocidos y aplicados en ingeniería para evaluar la actividad puzolánica son los mecánicos. Con ellos se evalúa la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia a compresión de morteros y concretos que las contienen.

En este trabajo se evaluaron: ceniza de bagazo de caña (CBC), ceniza de madera (CM) y una arcilla (AR) para su posible uso como materiales puzolánicos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El pre-tratamiento que se le dio a los materiales en polvo, consistió en un tamizado, durante 4 minutos, hasta lograr que los materiales pasaran por la malla número 100 ASTM con la finalidad de tener un tamaño de partícula máximo de 150 µm. Figura 1.



a)Equipo para tamizar



b)CBC tamizada

Figura 1.- Pre-tratamiento a material en polvo

La primera evaluación consistió en realizar un análisis químico por los métodos: gravimétrico, digestión total, plasma de acoplamiento inductivo óptico y volumétrico, para identificar los porcentajes de los principales óxidos contenidos en las cenizas y la arcilla, y compararlos posteriormente con los valores establecidos en la norma ASTM 618-05.

Posteriormente, con la finalidad de conocer la forma de las partículas de estos materiales en polvo, se obtuvieron micrografías empleando un microscopio electrónico marca HITACHI, modelo SU3500.

Finalmente, se determinó el Índice de Actividad Resistente (IAR) de cada material. El IAR es la relación de la resistencia a compresión promedio a una misma edad del mortero con puzolana y el mortero control expresada en porcentaje (ASTM C 311-04), puede calcularse con la expresión siguiente:

$$IAR = \frac{R_{MP}}{R_{MC}} \times 100$$

Donde:

IAR= Índice de Actividad Resistente (%)

RMP = Resistencia a la compresión del mortero cemento-puzolana: arena (MPa-Kg/cm²)

R_{MC} = Resistencia a la compresión del mortero cemento: arena (MPa-Kg/cm²)

Para determinar los IAR, en primer lugar se elaboraron mezclas de mortero empleando arena sílica tipo Ottawa, 80% de cemento portland y 20% de cada material en polvo a evaluar, de cada mezcla se evaluó su fluidez, Figura 2.



Figura 2.- Prueba de fluidez en mezclas de morteros

Con estas mezclas se elaboraron nueve cubos por mezcla de 50 mm por lado, Figura 3. Los cubos se curaron por inmersión hasta la fecha de ensayo (7, 14 y 28 días).



Figura 3.- Colado de cubos con mezclas de mortero
Los cubos de mortero fueron ensayados a compresión de acuerdo a la norma ASTM C 311-04,
Figura 4.



Figura 4.- Ensaye de resistencia a
compresión

Para evaluar el desempeño de estas cenizas de origen natural, todas las pruebas anteriores se llevaron a cabo también en una puzolana de origen industrial: Ceniza Volante (CV).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra que la composición química de las cenizas y la arcilla. De acuerdo con la norma ASTM 618-05, para que un material sea considerado una puzolana debe reunir los siguientes criterios: la suma de los tres óxidos mayores ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) debe ser mayor que 70%, el contenido de CaO deberá ser menor al 10%, y debe contener menos del 6% de pérdidas por ignición (PI).

Tabla 1.- Composición química de origen natural e industrial.

Compuesto	CBC	CM	AR	CV
Al ₂ O ₃	14.61	9.88	18.25	20.01
CaO	2.36	19.54	3.89	4.00
Fe total	4.38	2.21	2.75	--
FeO	--	<0.1	0.89	--
Fe ₂ O ₃	5.04	3.15	2.94	5.42
K ₂ O	3.29	8.94	1.95	0.96
MgO	1.43	4.59	1.10	0.63
MnO	0.18	0.83	0.06	0.10
Na ₂ O	1.57	1.04	3.42	0.19
P ₂ O ₅	0.85	3.18	0.40	0.38
SiO ₂	56.37	32.53	61.19	64.12
TiO ₂	0.96	0.99	0.94	1.12
PI	10.53	14.74	4.67	7.60
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	76.02	45.56	82.38	89.55

Al analizar los resultados, se observa que la CBC sólo no cumple con el último criterio, el porcentaje de PI puede atribuirse a que durante el proceso de quemado la combustión del bagazo es incompleta, probablemente por un pobre control de la temperatura de calcinado o suministro insuficiente de oxígeno.

Tomando en cuenta estos resultados se decidió obtener y evaluar una muestra más de CBC ahora cribada por la malla 200 ASTM (75 µm), esta muestra se identificó como CBC₂. Los resultados muestran que la CM no cumple con los criterios estipulados en la norma para esta prueba.

A diferencia de los dos resultados anteriores, la AR cumple satisfactoriamente con los criterios establecidos en la norma. Se corrobora que la CV es una puzolana de tipo F.

En análisis de las micrografías muestra que las partículas de la CBC y la CM tienen forma angular o de hojuelas.

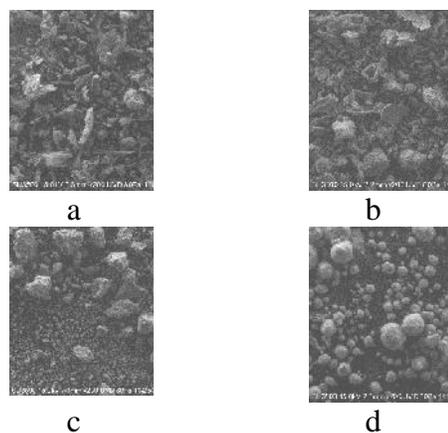


Figura 5.- Micrografías de cenizas a) CBC, b) CM, c) AR y d) CV

Lo anterior tiene un efecto negativo en la fluidez de los morteros pues al combinarse con las partículas del cemento portland, se incrementa la fricción entre ellas y la trabajabilidad se reduce, además el alto porcentajes de PI implica un contenido de carbón, por lo que las mezclas con estas cenizas requieren agua adicional para alcanzar la fluidez que marca la norma. La AR tienen forma semiesférica lo que puede mejorar la trabajabilidad de la mezcla con cemento portland. Finalmente se observa que las partículas de la CV son esféricas.

Cenizas de origen natural como posibles sustitutos de cemento portland

En la Figura 6 se presentan los resultados de IARs a 7, 14 y 28 días de las cenizas y la arcilla de origen natural.

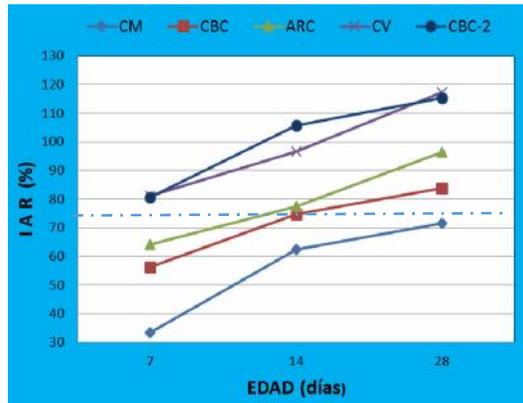


Figura 6.- IAR de las mezclas elaboradas

La mezcla con CM no superó el valor del IAR establecido por la norma en ninguna edad evaluada.

En cambio, las mezclas con CBC y ARC presentaron un IAR a 14 días cercano al 75% establecido en la norma. Las mismas mezclas a 28 días presentaron un IAR de 83.9 % y 96.3% respectivamente. Los resultados anteriores se explican por los % de óxidos de silicio identificados en el análisis de composición química de la misma (Evi et al., 2015).

Es muy importante destacar que las mezclas que se hicieron con la CBC₂ (75 μm), presentaron IAR superiores a lo especificado por la norma desde la primera edad de prueba. Estos resultados se deben a que, al reducir el tamaño de partícula de una puzolana, esta es más reactiva y otorga mejores propiedades cuando se incorpora a materiales de base cemento (Cordeiro et al., 2012).

Conclusiones

La CBC y la AR evaluadas en este proyecto son viables para ser consideradas como materiales puzolánico y sólo requieren un pre-tratamiento de cribado por la malla no. 100. Si se requiere obtener un mayor IAR es necesario cribar el material por la malla no. 200 para hacerlo más reactivo.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional (IPN), al CIIDIR Unidad Oaxaca y a la COFAA el apoyo otorgado para la realización del proyecto y la difusión del mismo.

Referencias

- ASTM C618-08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined NaturalPozzolan for Use in Concrete. United States: ASTM International.
- ASTM C311-04 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.

Antiohos, S.K., Papadakis V.G.E. (2007). Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes. *Cement and Concrete Research*, 37, 877–885.

Evi Aprianti, Payam Shafigh, Syamsul Bahri, Javad Nodeh Farahani, Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials* 74 (2015) 176–187.

G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials* 29 (2012) 641–646.

- Metha P. Kumar y Monteiro Paulo J. M. 1995. Reimpresión 2006. McGraw-Hill. *Concrete Microestructure, Properties and Materials*. Third Edition. United States of America. P 659.