



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA EN LA CORROSIÓN DEL FERROCEMENTO

M. A. Maldonado-García¹, U. I. Hernández-Toledo², P. Montes-García², P. L. Valdez-Tamez³

¹ Estudiante de la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. CIIDIR-Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional. Hornos No 1003, Col. Noche Buena., Sta Cruz Xoxocotlán, C. P. 71230, Oaxaca, México.

² Profesor Investigador del Grupo de Materiales y Construcción del CIIDIR-IPN-Unidad Oaxaca.

³ Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

RESUMEN

El ferrocemento es un material de construcción susceptible a la corrosión por la acción de agentes agresivos que penetran a través del mortero. Una posible solución a este problema es utilizar materiales suplementarios al cemento portland, por ejemplo la ceniza de bagazo de caña (CBC). Para evaluar su influencia se elaboraron cilindros de mortero y placas de ferrocemento con reemplazos de cemento por 0, 10 y 20% de CBC, aplicando tiempos de curado de 0, 7 y 28 días. Los cilindros se ensayaron a compresión y las placas fueron expuestas en una solución de cloruros y ciclos de humedecimiento y secado. Se efectuaron pruebas de inspección visual, potencial y densidad de corrosión. Se concluye que la CBC no afecta negativamente la resistencia a compresión del mortero, y después de 800 ciclos no se han encontrado daños físicos e incrementos en el potencial y velocidad de corrosión.

Palabras clave: Ferrocemento, durabilidad, ceniza de bagazo de caña.

ABSTRACT

Ferrocement is affected by corrosion due to the action of aggressive agents that penetrate the mortar. One possible solution to this problem is the use of supplementary cementing materials such as sugar cane bagasse ash (SCBA). In this research, mortar cylinders and ferrocement slabs with cements replacements for 0, 10 and 20% of SCBA were prepared. Curing regimes of 0, 7 and 28 days were studied. Compressive strength of the cylinders was estimated and the plates were exposed to wetting and drying cycles in a chloride solution. Visual inspection, corrosion potentials and current density were evaluated. The results indicate that the addition of SCBA

does not adversely affect the compressive strength of mortars; also that after 800 cycles there is no evidence of damage or significant increase in potential and corrosion current density.

Key words: Ferrocement, durability, sugar cane bagasse ash.

INTRODUCCIÓN

El ferrocemento es un material conformado por mortero y acero de refuerzo empleado en el sector de la construcción por su versatilidad y disminución de costos de edificación, entre otras ventajas. Sin embargo, actualmente se tiene la evidencia de daños ocasionados principalmente por la corrosión del acero; por ejemplo, algunas micropresas con edades de entre 9 a 11 años en la región de valles centrales de Oaxaca muestran alto riesgo de corrosión¹.

Una de las causas que promueven el fenómeno de la corrosión en el ferrocemento es el ingreso de agentes agresivos tales como iones cloruro y dióxido de carbono, los cuales penetran a través de la red de poros del mortero hasta alcanzar el acero de refuerzo. El resultado de este fenómeno es el decremento de la durabilidad, provocando en ocasiones la falla del elemento estructural. Una posible solución a este problema es mejorar la microestructura del mortero mediante el uso de materiales con potencial puzolánico para reemplazar parcialmente al cemento, los cuales proporcionan ventajas como la disminución de la permeabilidad puesto que densifican el mortero al crear nuevos productos cementantes. Uno de estos materiales es la ceniza de bagazo de caña (CBC), la cual es actualmente estudiada por diferentes grupos de investigación²⁻⁶. Algunos investigadores afirman que debido al potencial puzolánico, la CBC puede emplearse como sustituto parcial de cemento en concretos^{2,4,6} y en morteros^{5,7-8}, sin mostrar efectos negativos en aspectos mecánicos como la resistencia a compresión y además podría mejorar aspectos de durabilidad.

En México, cifras de la Unión Nacional de Cañeros reportan que en el periodo 2010-2011 se produjeron aproximadamente 44 millones de toneladas de caña de azúcar y se incineraron aproximadamente 12.8 millones de toneladas de bagazo de caña, generando cerca de 350 mil toneladas anuales de CBC⁹, la cual es desechada en gran parte a la intemperie, generando por consecuencia un problema ambiental. Debido a la actual disposición y potencial puzolánico de la CBC, en el presente trabajo se utilizó como sustituto parcial del cemento en mezclas de mortero para evaluar su influencia en la corrosión del ferrocemento y coadyuvar a desarrollar procesos sustentables.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El programa experimental se dividió en dos fases. En la primera se aplicaron distintos tratamientos de cribado a la CBC para seleccionar aquel con mejor potencial puzolánico y se realizaron los proporcionamientos de mezclas y probetas. En la segunda fase se analizó la influencia de la adición de CBC y el tiempo de curado en la corrosión del acero de refuerzo del ferrocemento.

Materiales empleados

La CBC fue recolectada de un predio propiedad del ingenio azucarero “Constancia” en Tezonapa, Veracruz., México, la cual es obtenida a partir de la calcinación del bagazo de caña a temperaturas entre 550 y 700°C durante la producción de azúcar. Para la determinación del Índice de Actividad resistente (IAR) se emplearon Cemento Portland Ordinario (CPO 40), arena de sílice graduada de Ottawa (ASTM C 778) y agua potable. Para la elaboración de las probetas de ensaye se utilizó Cemento Portland Compuesto (CPC 30R), arena de río con densidad relativa de 2.70 y módulo de finura de 2.45 (cumple con ASTM C 33), agua bidestilada y aditivo hiperfluidificante base policarboxilatos, el cual cumple con la norma ASTM C 494 como reductor de agua de alto rango tipo F.

Métodos

Fase 1. La CBC fue cribada por el tamiz No 4 ASTM con la finalidad de retirar vegetación y partículas pétreas (< al 1% en peso); se homogenizó, secó por 24 horas a una temperatura de 105°C, se determinó su densidad con base al método de prueba ASTM C 188, y posteriormente se determinó su composición química. Se obtuvieron tres lotes de CBC cribados por los tamices No. 8, 100 y 200, con la finalidad de disminuir sus tamaños de partículas y contenido de impurezas de carbón presente en las partículas de mayor tamaño. Una porción de estos lotes se molieron 1 hora a 62 revoluciones por minuto utilizando un molino para arcillas de 17 Lt de capacidad. Se obtuvieron los IAR’s de los diferentes tratamientos de acuerdo a las normas ASTM C 311 y ASTM C 109. Se seleccionó el lote con mayor IAR y menor requerimiento de energía para su postratamiento y se procedió a realizar los proporcionamientos de mezclas de mortero, en donde el cemento fue reemplazado parcialmente por CBC en porcentajes de 0, 10 y 20% (mezclas CBC0, CBC10 y CBC20, respectivamente), las proporciones de las mezclas se muestran en le Tabla 1. Se manejaron relaciones agua/materiales cementantes (a/mc) y cemento /arena de 0.63 y 1:3, respectivamente, puesto que son comúnmente utilizadas en diversas aplicaciones del ferrocemento, por cumplir las demandas de trabajabilidad en estado fresco y resistencia en estado endurecido. Solo en las mezclas con adición puzolánica se empleó aditivo hiperfluidificante para lograr la fluidez de morteros de 110±5% establecido en la norma ASTM C 1437, lo anterior debido a que al adicionar CBC se perdía trabajabilidad y se pretendía fijar la relación a/mc. Durante la elaboración de mezclas se realizaron pruebas de temperatura, fluidez, peso volumétrico y contenido de aire, todas cumpliendo con los procedimientos especificados en la normatividad ASTM para finalmente elaborar cilindros de mortero y placas de ferrocemento los cuales se sometieron a 0, 7 y 28 días de curado por inmersión en una solución saturada de hidróxido de calcio.

Tabla 1. Proporcionamientos de mezclas en kg por m³ de mortero

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

Fase 2. En estado endurecido se llevaron a cabo pruebas de resistencia a compresión en cilindros de mortero de 7.5cm de diámetro por 15cm de altura siguiendo lo estipulado en la norma ASTM C 305. La influencia de la adición de 0, 10 y 20 CBC, y el tiempo de curado también fueron evaluados por medio de pruebas de inspección visual, potenciales (Ecorr) y densidad (Icorr) de corrosión en las placas de ferrocemento, cuyas dimensiones fueron de 25 x 20cm y espesor de 3cm. El refuerzo consistió en dos mallas de acero galvanizado de 1mm de

diámetro y ½” de abertura, cuya sección rectangular fue de 21 x 16cm y fueron colocadas en el centro de la probeta. Para poder realizar las pruebas de Ecorr e Icorr se conectó un cable calibre No.14 AWG al acero de refuerzo, pintado en la zona de la unión con epóxico. Finalmente las placas de ferrocemento fueron expuestas en un ambiente agresivo simulado, el cual consistió en ciclos de humedecimiento y secado en una solución de cloruros al 3%. En estas condiciones se realizaron pruebas de Ecorr diariamente siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C 876 utilizando una media celda de plata-cloruro de plata y un multímetro digital de alta impedancia. Las pruebas de Icorr se realizaron semanalmente con un potenciostato/galvanostato (ASTM G 59), empleando como referencia un electrodo de plata-cloruro de plata y como contraelectrodo dos mallas de acero galvanizado de 1mm de diámetro y ½” de abertura

RESULTADOS

La densidad de la CBC fue de 2.20 g/cm³ y la composición química, mostrada en la Tabla 2, indica que la suma de óxidos mayores (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) fue de 76.02%, superando a lo establecido en la especificación ASTM C 618, la cual menciona que la suma de estos óxidos debe ser mayor al 70% para que un material sea considerado como puzolana clase F. En cuanto a los IAR’s, se observó y como era de esperarse que éstos incrementen conforme se utiliza CBC tamizada y molida, es decir incrementando su área superficial, así mismo, los IAR’s aumentan a mayor tiempo de curado en los morteros. Los mayores IAR’s se obtuvieron con la CBC cribada por el tamiz No. 200, teniendo valores superiores al 84% a 7 y 28 días, lo cual supera al 75% establecido en la ASTM C 618 para considerar a la CBC como material puzolánico. Con base en esto, se decidió trabajar con la CBC solamente cribada por el tamiz No. 200, ya que el molido implica consumo adicional de energía sin obtener mejoras importantes en la actividad puzolánica⁵.

Tabla 2. Composición química de la CBC

Compuesto	Porcentaje
SiO ₂	56.37
Al ₂ O ₃	14.61
Fe ₂ O ₃	5.04
CaO	2.36
K ₂ O	3.29
MgO	1.43
Na ₂ O	1.57
P ₂ O ₅	0.85
PXC	10.53
Σ de óxidos mayores	76.02

En la Figura 1 se muestran los resultados de pruebas de resistencia a la compresión a 28 días de los morteros. Se corrobora que a mayor tiempo de curado la resistencia a compresión se incrementa en todas las mezclas, esto ocurre porque un curado extendido provee la suficiente humedad para favorecer las reacciones de hidratación del cemento y de la reacción puzolánica.

En lo referente a los morteros con CBC se observa que el tiempo de curado influye significativamente en el desarrollo de su resistencia, ya que a 0 y 7 días de curado las resistencias de los morteros CBC10 fueron menores que la del control (CBC0); sin embargo, a 28 días de curado la resistencia fue mayor que la de éste. Las resistencias de los morteros CBC20 fueron

menores (25 a 32%) que las de los controles y menores que las que tenían 10% de CBC para todos los tiempos de curado. Los resultados son congruentes con la literatura en donde diversos investigadores^{4-8,10} reportan disminuciones de la resistencia a compresión cuando se utiliza más del 10% de CBC en una mezcla. Esto podría atribuirse al alto contenido de impurezas de carbón presentes en la CBC y determinadas por las pérdidas por ignición (PXC), estas partículas resultan del proceso de calcinación incompleta del bagazo.

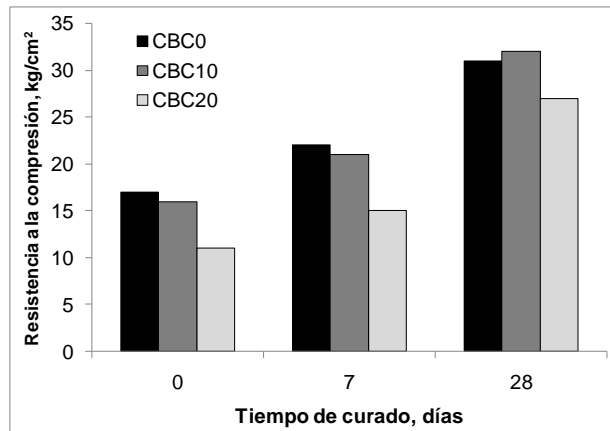


Figura 1. Resultados de pruebas de resistencia a compresión en cilindros de mortero.

Los resultados de las pruebas de potenciales de corrosión después de 800 ciclos de humedecimiento y secado se muestran en la Figura 2. Los valores son más negativos que los del acero al carbono debido al consumo del recubrimiento de zinc del acero de refuerzo.

En las probetas sin adiciones (Figura 2-A) se observan las siguientes tres regiones:

Primera región (0 a 100 días): Periodo de pasivación. Se observa gran variabilidad de los valores de potenciales de corrosión del acero galvanizado en etapas tempranas si se compara con aquellos del acero al carbón¹¹. **Segunda región (hasta 250 días):** Periodo de iniciación (<-550 mV). En esta región se considera el tiempo en el cual los iones cloruros penetran el recubrimiento de mortero y alcanzan una alta concentración en la interfase con el acero de refuerzo, lo cual inicia la corrosión. **Tercera región (más de 250 días):** Propagación de la corrosión (-550 a -800 mV).

Los resultados son consistentes con aquellos publicados por diversos autores que han evaluado la corrosión del acero galvanizado con zinc y reportan que cuando se registran potenciales de corrosión muy negativos, entre -550mV hasta -1200mV, existe corrosión activa en el sistema^{12,13}.

De manera similar que en los resultados de resistencia a la compresión, en las probetas control se observa un efecto benéfico del tiempo de curado en los potenciales de corrosión debido al mejoramiento de la matriz del mortero causado por la reacción de hidratación y la reacción puzolánica. La inspección visual de las probetas que se realizó después de 800 ciclos de exposición no muestra daño físico externo causado por corrosión.

En lo que respecta a las probetas con adiciones (Figuras 2-B y 2-C) los resultados no son concluyentes sobre la influencia de la CBC en el fenómeno de la corrosión. Sin embargo, los potenciales de corrosión para 0 y 7 días de curado son considerablemente menos negativos que los del control. Esto puede deberse a un periodo de iniciación de la corrosión más largo o una menor actividad corrosiva. Los potenciales registrados al término del experimento para las probetas con CBC sugieren un efecto benéfico del curado y de la actividad puzolánica puesto que hay mayor densificación de la matriz cementante. No obstante se requiere continuar con el monitoreo para poder afirmar esta propuesta.

Las densidades de corrosión (Figura 3) muestran el incremento de la actividad corrosiva en el tiempo para todas las probetas. A los 250 días (término del periodo de iniciación sugerido por los potenciales de corrosión en las probetas control) se observa un incremento considerable de la actividad corrosiva; los valores oscilan entre 1 y $1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual indica corrosión activa¹³.

El efecto del curado en la corrosión empieza a observarse después de los 600 días, por lo que al igual que en los potenciales de corrosión se requiere extender el periodo de monitoreo de las probetas para determinar la influencia de la adición de CBC en las mezclas de mortero y del tiempo de curado.

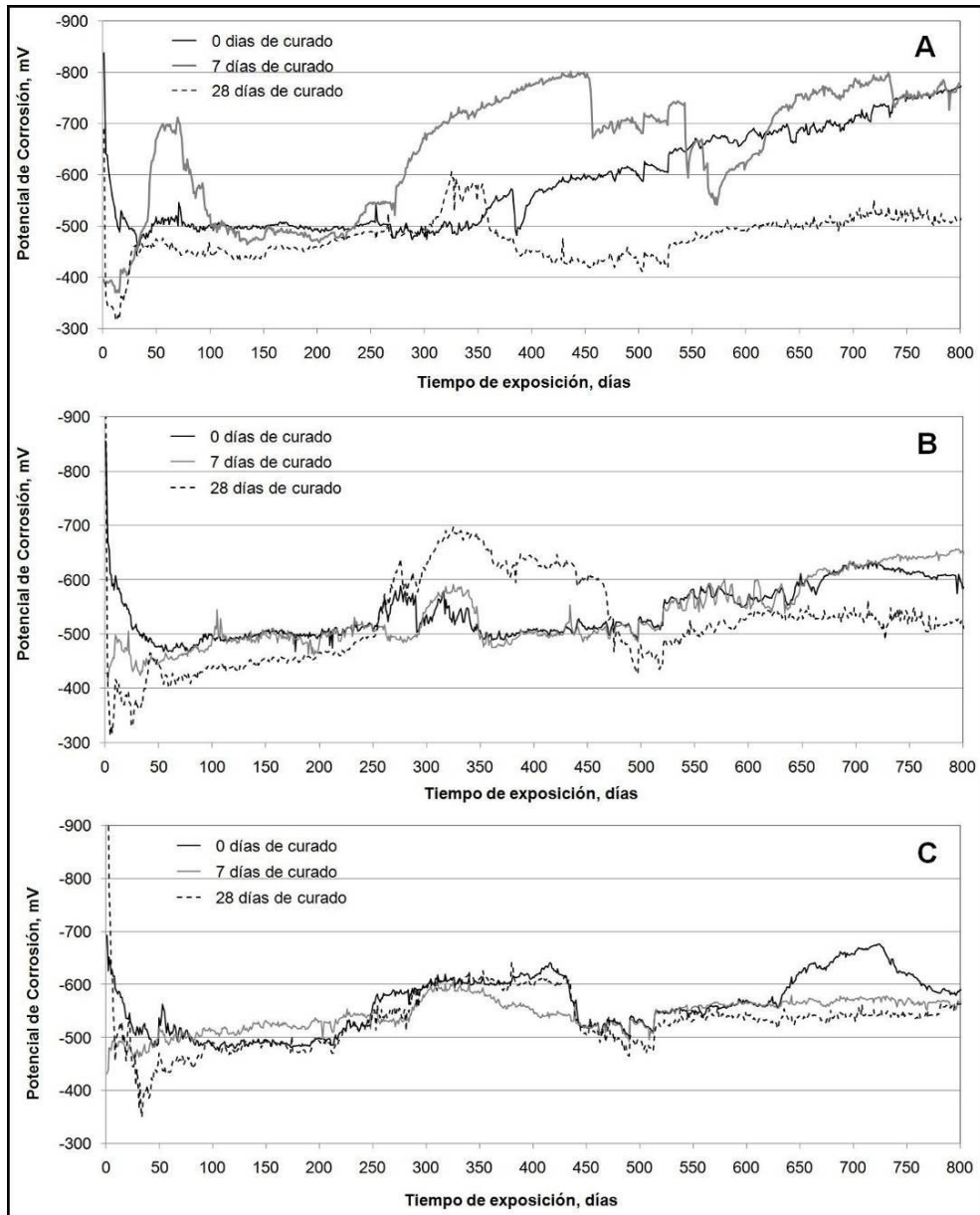


Figura 2. Potenciales de corrosión de las placas de ferrocemento después de 800 ciclos de exposición al ambiente agresivo simulado A) Mezcla CBC0, B) Mezcla CBC10 y C) Mezcla CBC20

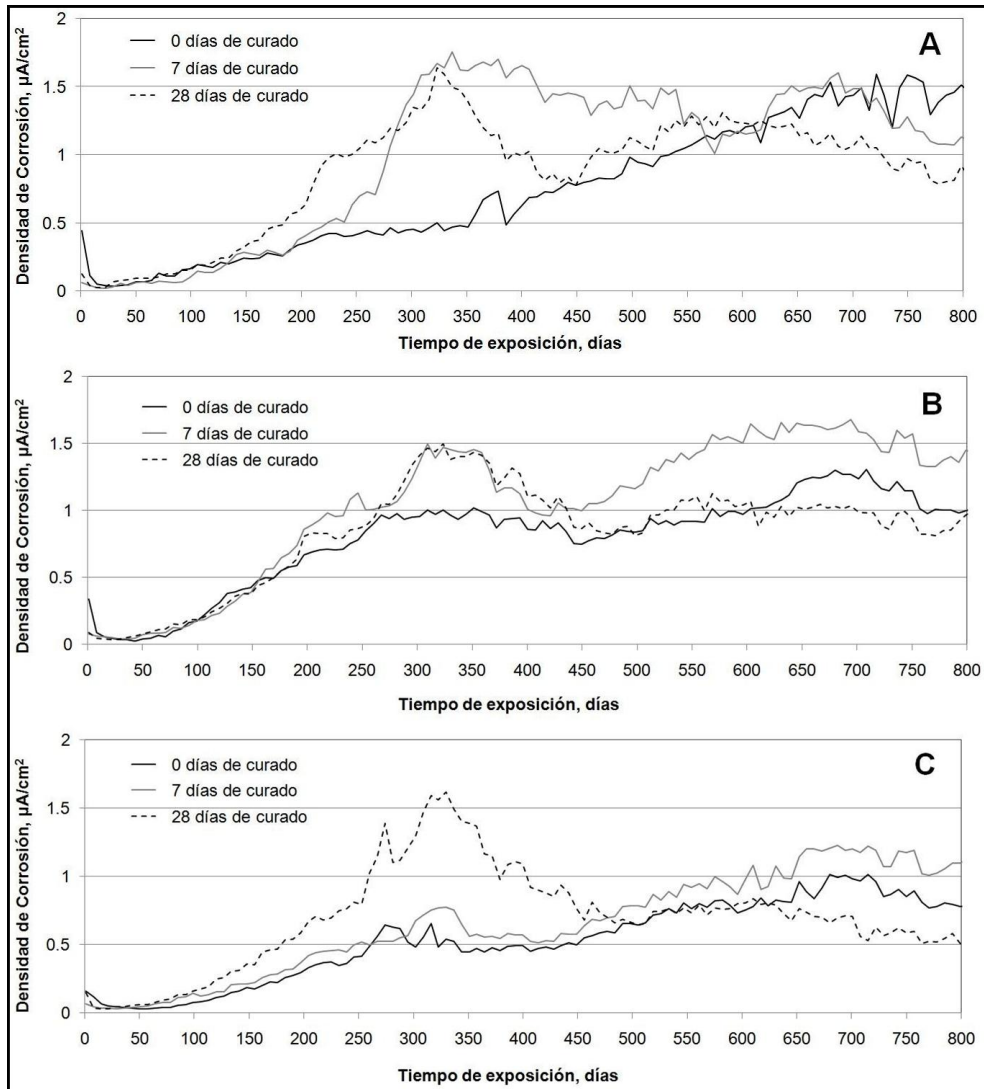


Figura 3. Densidades de corrosión de las placas de ferrocemento después de 800 ciclos de exposición al ambiente agresivo simulado A) Mezcla CBC0, B) Mezcla CBC10 y C) Mezcla CBC20

CONCLUSIONES

El tiempo de curado influye significativamente en el desarrollo de las resistencias de morteros con CBC. Para 10% de sustitución las resistencias a 0 y 7 días de curado fueron menores que la del control; sin embargo, a 28 días de curado la resistencia fue mayor, se espera que la actividad puzolánica continúe y como consecuencia se favorezca el comportamiento del sistema cementante. Finalmente, las resistencias de los morteros con 20% de CBC fueron menores que las controles y menores que las que tenían 10% de CBC para todos los tiempos de curado.

Los potenciales de corrosión de morteros con 10 y 20% de CBC para 0 y 7 días de curado fueron considerablemente menos negativos que los del control. Los potenciales registrados al término del experimento sugieren un efecto benéfico del curado, teniendo mejoras en la durabilidad.

Las densidades de corrosión muestran el incremento de la actividad corrosiva en el tiempo para todas las probetas. El efecto del curado no es claro a la conclusión de ese estudio, por lo que se requiere extender el periodo de monitoreo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al IPN de México y CIIDIR-Unidad Oaxaca por los financiamientos brindados a través de los proyectos SIP-20110104, SIP-20100266 y SIP-20120783, y por la beca otorgada a través del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI). Así mismo por la beca a nacional nivel maestría otorgada por el CONACyT.

REFERENCIAS

- [1] P. Montes-García, V. Jiménez-Quero, T. Caballero-Aquino, A. Fernández-González, “Corrosión en presas de ferrocemento” *Revista ALCONPAT* 1, 1(2011): pp. 31-40.
- [2] K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material” *Cement and Concrete Composites* 29 (2007): pp. 515-524.
- [3] E. V. Morales, E. Villar-Cociña, M. Frías, S. F. Santos, H. Savastano Jr, “Effects of calcining on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation” *Cement and Concrete Composites* 31 (2009): pp. 22-28.
- [4] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo-Fhilo, E. M. R. Fairbairn, “Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries”, *Revista IBRACON* 3, 1(2010): pp. 50-67.
- [5] U. I. Hernández-Toledo, “Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento” Tesis de Maestría, IPN-CIIDIR-Oaxaca, (2010).
- [6] A. Noor-ul, “Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity” *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* (2011).
- [7] U. I. Hernández-Toledo, M. A. Maldonado-García, P. Montes-García, “Efecto de la ceniza de bagazo de caña en la resistencia a compresión y velocidad de pulso ultrasónico en mortero” VI Jornadas Politécnicas de Investigación en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, (2010), IPN-CIIDIR-Oaxaca, Oaxaca de Juárez (México).
- [8] M. A. Maldonado-García, U. I. Hernández-Toledo, P. Montes-García, P. Valdez, “Efecto de la ceniza de bagazo de caña en la microestructura y permeabilidad de iones cloruros de morteros”, VI International Conference on Physical Engineering, (2012), UAM-Azcapotzalco, México D.F (México).
- [9] Unión Nacional de Cañeros de México, www.caneros.org.mx, consultado 13 de febrero de 2012.
- [10] N. B. Sing, V. D. Sing, S. Rai, “Hydration of bagasse ash-blended portland cement” *Cement and Concrete Research* 30 (2000): pp. 1485-1488.
- [11] Raquel R. Aveldaño, Néstor F. Ortega, “Characterization of concrete cracking due to corrosion of reinforcements in different environments” *Construction and Building Materials* 25 (2011): pp. 630-637
- [12] S. B. Farina, G. S. Duffö, “Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions” *Electrochemical Data* 52 (2007): pp 5131-5339.
- [13] F. Tittarelli, G. Moriconi, “ Comparison between surface and bulk hydrophobic treatment against corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete” *Cement and Concrete Research* 41 (2011): pp. 609-614