



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

## **ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE LA CARBONATACIÓN DE MORTEROS MODIFICADOS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.**

**J. C. Saucedo-Lizárraga<sup>1</sup>, R. E. Núñez-Jaquez<sup>1</sup>, C. P. Barrios-Durstewitz<sup>1</sup>, P. G. Pérez-Rabago<sup>1</sup>, I. A. Manzanarez<sup>1</sup>, D. Gaxiola-Apodaca<sup>1</sup>, I. E. Calderón-Flores<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Mochis, Unidad Regional Norte. Universidad Autónoma de Sinaloa. Fuente de Poseidón y Pról. Ángel Flores S/N  
Los Mochis, Ahome, Sinaloa C.P. 81223, México.

### **RESUMEN**

Se investigó el fenómeno de la carbonatación en especímenes de mortero con y sin refuerzo, con distintos porcentajes de sustitución de cemento Portland ordinario (0, 5, 10, 15, 20 %) por ceniza de bagazo de caña (CBCA), utilizando una cámara de carbonatación acelerada para obtener condiciones estables (0.4 % CO<sub>2</sub>, humedad relativa 65-70%, temperatura 30-35 °C). Se obtuvo la constante de carbonatación en los especímenes sin refuerzo, y se estudió el proceso de corrosión en los especímenes con refuerzo mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). En los resultados se aprecia que el proceso de carbonatación en los morteros con mayor sustitución es alto, sin embargo no se aprecian efectos notables en cuanto a las velocidades de corrosión hasta en los últimos días de monitoreo, en los especímenes con mayor sustitución de cemento por CBCA. Se concluye que la sustitución óptima de CBCA es de 10% en peso de cemento para reducir el proceso de carbonatación.

**Palabras Clave:** Corrosión, EIS, aditivos, puzolanas.

## INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que los aditivos minerales tales como el humo de sílice, las cenizas volantes y ceniza de cáscara de arroz son subproductos de procesos industriales o agroindustriales. La aplicación de estos subproductos en la producción de concreto trae efectos positivos para el medio ambiente una vez que reduce los problemas asociados a su disposición.

En cuanto a su uso como sustituto del cemento, los aditivos minerales afecta a las actuaciones de pasta, mortero y concreto, debido a los efectos físicos y químicos. Los efectos físicos se asocian principalmente con su influencia sobre las características de aglomeración de la mezcla, que depende del tamaño, forma y textura de las partículas. Los efectos químicos se asocia con su capacidad de proporcionar compuestos silíceos / aluminoso que reaccionen químicamente con hidróxido de calcio en presencia de agua [1].

Una buena solución para el problema del reciclaje de los residuos agroindustriales sería quemarla en un ambiente controlado y el uso de las cenizas en medios más nobles. El uso de residuos como biomasa en la cogeneración de energía eléctrica es un punto interesante, ya que cuando se quema, el CO<sub>2</sub> que se deja salir a la atmósfera vuelve al ciclo de carbono de la biosfera, capaces de ser absorbidos por las plantas en el proceso de fotosíntesis.

Sin embargo, en el sector de la construcción con caracterización incorrecta de estos residuos industriales pueden provocar el fallo o la pérdida de rendimiento. Por esta razón, los estudios rigurosos de los aspectos relacionados con la caracterización, evaluación y aprovechamiento de los residuos es tan importante. Por lo tanto las variaciones en la temperatura y la duración de la quemadura, el tamaño de las partículas, la composición (química, morfológica y mineralógica, y cristalinidad entre otros); da como resultado en las ceniza componentes químicos completamente diferentes, lo que influye en la forma en que el material se comporta como puzolana cuando se mezcla con el cemento [2].

Los cambios significativos que las puzolanas aportan a los cementos puzolánicos, comparados con el cemento portland ordinario, son: menor calor de hidratación, mayor dureza final, endurecimiento más lento, curado más duradero. Los beneficios que aportan las puzolanas son, entre otros, la reducción de los gastos de producción, incremento de la capacidad de la planta y prevención de la expansión excesiva, como resultado de la reacción entre ciertos agregados y los álcalis en mezclas de cemento Portland [3].

La caña de azúcar bagazo ceniza (CBA) es uno de los principales subproductos generados en todo el mundo y puede ser utilizado como un aditivo mineral debido principalmente a su alto contenido en sílice (SiO<sub>2</sub>) [1].

La aplicación de puzolanas como remplazos parciales de cemento Portland es debido a la presencia de fases activas de su constitución química. La sílice amorfa es la fase principal activo de puzolanas, y en contacto con agua a temperatura ambiente, solubilizado en un medio alcalino y reacciona con los iones Ca<sup>+2</sup> para formar silicatos hidratados de calcio (CSH, de acuerdo con la notación utilizada en la química de cemento C-CaO, S-SiO<sub>2</sub>, H-H<sub>2</sub>O).

Los CSH puzolánicos formado en estas reacciones es similar a los CSH producidos en las reacciones de hidratación de cemento Portland. El hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento Portland es la fuente primaria de calcio para las reacciones puzolánicas.

La ceniza de la quema de bagazo, caña de azúcar presenta la sílice, compuesto químico principal, generalmente en cantidades superiores al 60% en masa. De acuerdo con las condiciones de cocción adoptadas, es posible mantener la sílice contenida en el bagazo en estado amorfo [4].

El acero en estructuras de concreto es protegido del ambiente atmosférico debido a la alcalinidad de la solución del poro ( $\text{pH} > 12.5$ ). Sin embargo, el acero puede corroerse si la protección se pierde, debido al ingreso de iones agresivos de cloruros -en ambientes marinos- o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes de hidratación del cemento con el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto, desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. La corrosión uniforme inducida por carbonatación, acelera la formación de grietas si las condiciones adecuadas de temperatura y humedad están presentes [5].

Un concreto permeable puede carbonatarse rápidamente, para esto, basta la pequeña concentración de  $\text{CO}_2$  (0.03%) presente en la atmósfera. Cabe señalar que esta concentración puede incrementarse en lugares específicos, tales como estacionamientos con poca ventilación, túneles, cierto tipo de industrias, laboratorios, etc., lo que acentuará el fenómeno.

El proceso de carbonatación es completamente natural y es afectado también por variables naturales, consecuencia de las condiciones de exposición del concreto. El avance del frente de carbonatación depende principalmente del contenido de humedad relativa (HR), de la permeabilidad de concreto y de la concentración de  $\text{CO}_2$  disponible en el ambiente. Ha sido comprobado que el mecanismo de reacción de la carbonatación es más rápido cuando la HR está entre el 50 y 75 %. Cuando la HR es menor, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades importantes de hidróxido de calcio. Superior al 75% de HR, la situación es inversa y los poros pueden llegar a saturarse de agua, en este caso, aunque se permite que el hidróxido de calcio se disuelva libremente, el ingreso del  $\text{CO}_2$  en los poros saturados es restringido en gran medida [6].

Una técnica de gran importancia para el estudio de la corrosión en concretos es la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), técnica que trabaja en el dominio de la frecuencia. El concepto básico de la técnica EIS es que una interfase electroquímica puede ser vista como una combinación de elementos pasivos de un circuito eléctrico, es el caso de resistencias, capacitores e inductores. Adicionalmente entrega información fundamental sobre las características del sistema, aunque a veces es difícil de hacer la interpretación y además es una técnica que utiliza bastante tiempo en su ejecución. La técnica EIS se empezó a aplicar en la evaluación de la corrosión de los aceros embebidos en los concretos a principios de la década del 90 y hoy en día se considera de gran utilidad para entender el comportamiento del sistema acero/concreto. La respuesta de la técnica es un diagrama de los valores absolutos del imaginario contra el componente real de los valores de la impedancia que da lugar a un semicírculo, en el cual el diámetro es la resistencia de la polarización y la intercepción en el eje X (componente real), en el extremo de alta frecuencia, nos da la resistencia del concreto. En el caso del concreto, la

resistividad es considerable, en ocasiones del orden de  $k\Omega \cdot \text{cm}$ , por lo que puede interferir en la respuesta de la interfase acero-concreto y proporcionar una lectura incorrecta. Es por esto, que la medición de la resistencia a la polarización debe hacerse con compensación óhmica [7].

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Elaboración de los especímenes para pruebas electroquímicas

Para la elaboración de los especímenes de mortero se utilizó la norma ASTM C-109 [8], obteniendo una resistencia mínima de  $250 \text{ Kg/cm}^2$  y relación agua/cemento 0.5.

Se elaboraron especímenes cilíndricos de  $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  de diámetro a los cuales se les embebió una varilla de refuerzo y dos electrodos de grafito como electrodo auxiliar (Figura 1), se sustituyó un porcentaje de cemento Portland ordinario por ceniza de bagazo de caña (0, 10, 15, 20%). El refuerzo es una varilla de 0.95 cm de diámetro corrugada, de 22.5 cm de longitud, posteriormente se recubrió una sección con pintura epóxica, dejando una longitud expuesta de 5 cm (Figura 2). Enseguida se colocaron en una cámara de carbonatación y se monitorearon con las técnicas electroquímicas cada semana.



Figura 1. Espécimen con electrodo de grafito. Figura 2. Varilla recubierta con pintura epóxica.

### Elaboración de los especímenes para medición del avance de carbonatación

Los especímenes para avance de carbonatación se elaboraron con los mismos parámetros que los especímenes para pruebas electroquímicas, solo que sin refuerzo y los electrodos de grafito.

Los especímenes se expusieron en un ambiente acelerado de  $\text{CO}_2$  en una cámara de carbonatación acelerada, con una concentración de 4% de  $\text{CO}_2$ , una HR de 65-70% y una temperatura de 30-35 °C.

Cada semana se cortó una rodaja de 1 cm de grosor en cada espécimen, a la cuál posteriormente se le realizó la prueba de fenolftaleína para determinar el avance de la carbonatación, obteniendo la constante de carbonatación y el tiempo remanente.

### Pruebas electroquímicas

La prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica se realizó cada semana utilizando un potenciostato-galvanostato Gill A.C. de un canal marca ACM Instruments, la celda se compone de una varilla de refuerzo como electrodo de trabajo, se utilizó un electrodo de Calomel

como electrodo de referencia y un electrodo de grafito como electrodo auxiliar. Las pruebas de impedancia se realizaron con un rango de frecuencia de 0.1 Hz hasta 100 kHz, la amplitud de 20 mV rms, con 100 puntos de lectura. Para el análisis de resultados se utilizó el programa “Analysis” de ACM versión 4.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos de las constantes de carbonatación, en esta se aprecia que a mayor sustitución la constante va aumentando en el tiempo, lo cual implica un proceso muy acelerado de carbonatación, sin embargo de las sustituciones la de mejor comportamiento es la del 5%.

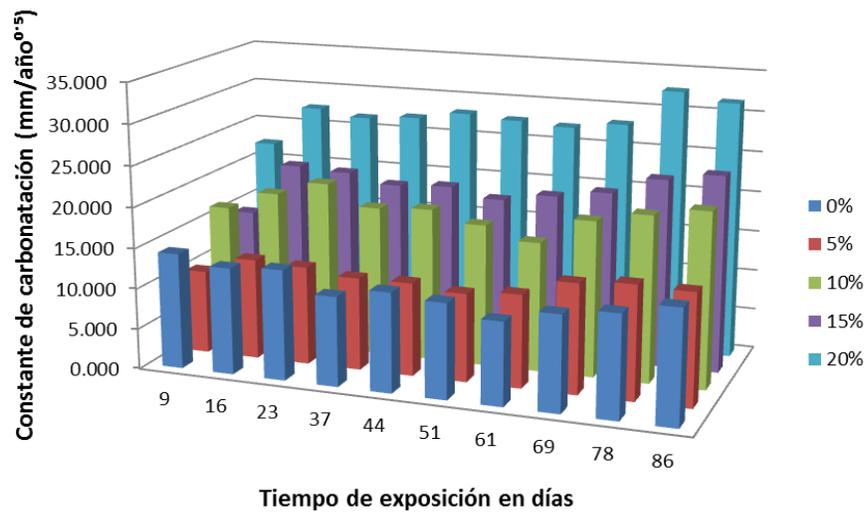


Figura 3. Constantes de Carbonatación.

En la figura 4, se muestran los tiempos remanentes de carbonatación de los refuerzos a diferentes profundidades propuestas (15, 20 y 30 mm), en esta se aprecia que los especímenes con mejor comportamiento son aquellos con el 5% de sustitución, al inicio existe un aumento en la carbonatación, pero posteriormente hay una disminución de la misma, esto debido probablemente a que la reacción puzolánica de la CBCA tarda en presentarse, por lo tanto es hasta entonces que se forma una especie de gel que llena la porosidad del concreto y con esto se retarda el proceso de carbonatación, aumentando de nuevo el tiempo remanente de servicio.

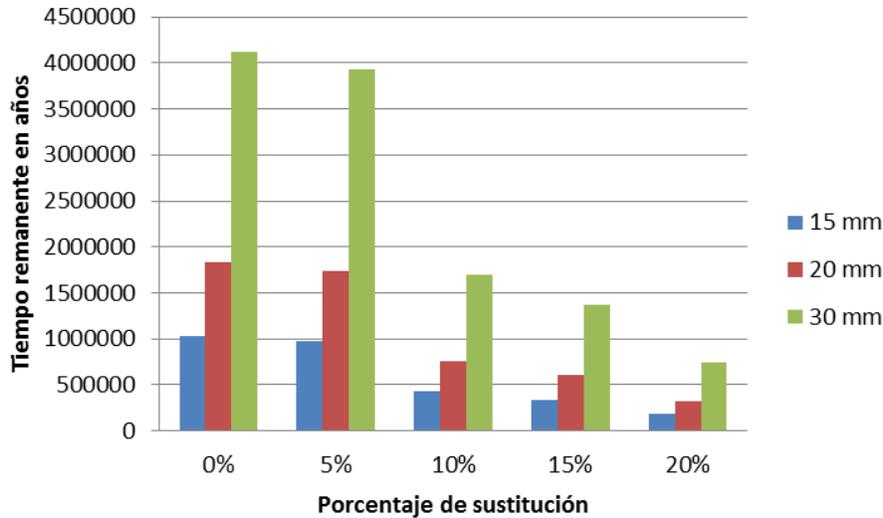


Figura 4. Tiempo remante.

Para finalizar, en la gráfica de la figura 5 se muestran los diagramas de Nyquist obtenidos para cada espécimen expuesto con diferentes sustituciones de CBCA por cemento portland, en estas se aprecia que la mayoría presentan resistencias a la transferencia de carga menores que la del blanco, no se observa la formación de un semicírculo, esto debido tal vez al alto comportamiento resistivo del sistema, sin embargo con la ayuda del software del equipo se aprecia que la  $R_{ct}$  va disminuyendo conforme aumenta el porcentaje de sustitución.

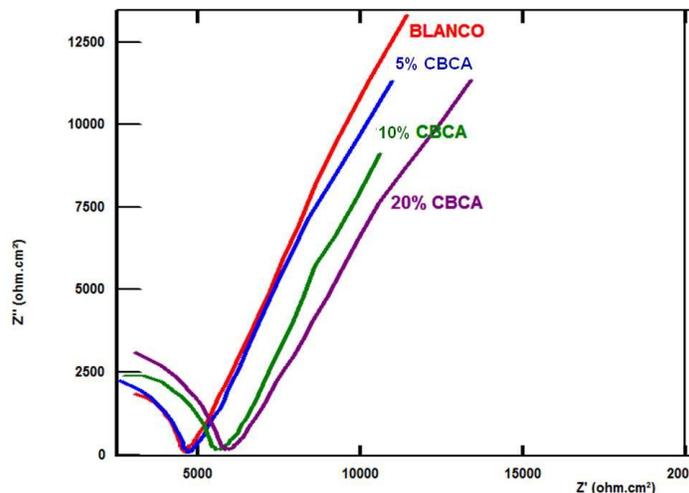


Figura 5. Diagrama de Nyquist.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados anteriores se puede concluir que las sustituciones propuestas disminuyen el proceso de carbonatación, sin embargo no logran presentar un comportamiento igual o mejor que el cemento portland, la que mejor comportamiento presenta es la del 5 %.

Una probable forma de mejorar el comportamiento de las cenizas es la activación alcalina de las mismas o la disminución del tamaño de partícula.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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 ordinario portland 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 2011/120 para el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1]. Cordeiro C. Toledo R. Tavares L. Fairbairn E. *Pozzolan activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*. ELSEVIER. Pg. 410, (2008).
- [2]. Oliveira de Paula M., Ferreira Tinoco I., De Souza Rodrigues C., Osorio Saraz J., *Sugarcane bagasse ash as a partial-portland-cement-replacement material*. Dyna, vol. 77, Pg. 47-54, (2009).
- [3]. Costafreda Mustelier, *Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolitas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería)*, Tesis doctoral, Pg. 231, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, (2008).
- [4]. Cordeiro G., Dias Toledo F., Rego Fairbairn E., *Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios*, Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, Pg. 82-86, (2009).
- [5]. Moreno E., Domínguez Lara G., Cob Sarabia E., Duarte Gómez F., *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración*, Ingeniería 8-2, Pg. 117-130, (2004).
- [6]. Valdez Tamez P., Durán Herrera A., Fajardo San Miguel G., Juárez Alvarado C., *Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Portland y ceniza volante*. Estudios e investigaciones recientes, Pg. 39-49, 2008.
- [7]. Aperador W., Delgado A., Vera E., *Monitoreo mediante EIS del acero embebido en un concreto de escoria activada alcalinamente expuesto a carbonatación*. Ingeniería de construcción. Vol. 26. Pg. 81-94, (2011).
- [8]. ASTM C-109, *Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico*, (1999).