COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 304 EMBEBIDO EN CONCRETOS ECOLÓGICOS CON BASE CBCA Y HS EXPUESTOS A CLORUROS

L. LANDA-RUIZ^{1,6}, J. L. PÉREZ-DÍAZ², C. GAONA-TIBURCIO³,
F. ALMERAYA-CALDERÓN³, F. J. OLGUÍN COCA⁴, L. D. LÓPEZ LEÓN⁴,
B. RENÉ CROCHE⁵, S. MÁRQUEZ-MONTERO⁶, M. A. BALTAZAR-ZAMORA⁶

¹Universidad Veracruzana, Doctorado en Ingeniería, FIME, Xalapa, Veracruz, México

²Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

³Universidad Autónoma de Nuevo León. FIME – CHIA. Av. Universidad S/N.
Ciudad Universitaria. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

⁴Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

⁵Universidad Veracruzana, FIME-Xalapa, Xalapa, Veracruz, México

⁶Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Circ. G. Aguirre Beltrán S/N,
Lomas del Estadio, CP 91000, Xalapa, Veracruz, México

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se reportan los resultados obtenidos del comportamiento de la corrosión del acero inoxidable AISI 304 y el acero AISI 1018, ambos utilizados como refuerzo en concretos ecológicos base sustitución del 10% parcial del Cemento Portland por residuos como la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) y Humo de Sílice (HS). Las mezclas del presente estudio se diseñaron de acuerdo al Método del ACI 211.1, para una relación agua/cemento = 0.65 ($F'c = 250$ kg/cm²). Las barras de aceros fueron de 15 cm de longitud y de 3/8" de diámetro. Como medio agresivo se utilizó una solución al 3.5% de concentración de NaCl, simulando las condiciones presentes en el agua de mar. Las técnicas electroquímicas utilizadas para evaluar la corrosión presente en el sistema acero concreto, fueron la de potencial de corrosión (E_{corr}) de acuerdo a la norma ASTM C-876-15 y la de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) como lo indica la norma ASTM G59. Los resultados que se presentan después de más de 300 días de exposición al medio agresivo indican una gran resistencia del acero AISI 304, con valores de E_{corr} menores a -200 mV lo que indican de 10% de probabilidad de corrosión y un nivel de corrosión despreciable, con valores menores a 0.1 $\mu A/cm^2$ en las tres mezclas, presentando valores ligeramente menores los concretos ecológicos. Dichos valores indican una resistencia de más de 20 veces mayor en comparación con los resultados obtenidos en el acero AISI 1018.

Palabras clave: Corrosión, Concretos Ecológicos, CBCA, AISI 304.

ABSTRACT

In the present work of investigation the results obtained of the behavior of the corrosion of the stainless steel AISI 304 and the steel AISI 1018 are reported, both used like reinforcement in ecological concrete base replacement of the partial 10% of the Portland Cement by residues like the Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) and Silica Fume (SF). The mixtures of the present study were designed according to method of ACI 211.1, for a water/cement ratio = 0.65 ($F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$). The steel bars were 15 cm long and 3/8 "in diameter. As an aggressive medium, was used a solution of NaCl at 3.5% of concentration, simulating the conditions present in seawater. The electrochemical techniques used to evaluate the corrosion in the concrete-steel system were the corrosion potential (E_{corr}) according to the ASTM C-876-15 standard and the Linear Polarization Resistance (LPR) as indicated by the ASTM G59 standard. The results that appear after more than 300 days of exposure to the aggressive medium, indicate a great resistance of the AISI 304 steel, with E_{corr} values lower than -200 mV which indicate a 10% probability of corrosion, and a level of negligible corrosion, with values lower than $0.1 \mu\text{A/cm}^2$ in the three mixtures, with slightly lower ecological concrete values. These values indicate a resistance of more than 20 times higher compared to the results obtained in AISI 1018 steel.

Keywords: Corrosion, Ecological Concrete, SCBA, AISI 304.

RESUMO

Nesta pesquisa os resultados do comportamento à corrosão do aço inoxidável AISI 304 e 1018 aço são relatados, ambos utilizados como reforço na fundação de concreto 10% de substituição de resíduos orgânicos parcial de cimento Portland como cinza do bagaço de Cana de Açúcar (CBCA) e Sílica Fumaça (SF). Misturas deste estudo foram concebidos de acordo com a ACI 211,1 Método para um cimento = 0,65 ($F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) relação de água /. As barras de aço tinham 15 cm de comprimento e 3/8 "de diâmetro. Como meio agressivo de uma solução 3,5% de concentração de NaCl foi utilizado para simular as condições presentes na água do mar. técnicas electroquímicas utilizados para avaliar o aço presente corrosão no sistema de cimento era o potencial de corrosão (E_{corr}), de acordo com a norma ASTM C 876-15 padrão e de resistência linear de polarização (RPL), como indicado pela Padrão ASTM G59. Os resultados apresentados após 300 dias de exposição a meios agressivos, indicam um aço de alta resistência AISI 304, com valores de menos de -200 mV E_{corr} que indicam 10% possibilidade de corrosão, e um nível de corrosão negligenciável, com valores de menos do que $0,1 \mu\text{A/cm}^2$ em três misturas, apresentando valores específicos ecológicos ligeiramente inferiores. Estes valores indicam uma resistência de mais de 20 vezes superior em comparação com os resultados obtidos no aço AISI 1018.

Palavras-chave: Corrosão, Concreto Ecológico, CBCA, AISI 304

1. INTRODUCCIÓN

El problema de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto reforzado es a nivel mundial que repercute, tanto en lo económico como en lo social, y que alcanza costos por miles de millones de dólares [Troconis et. al., 2016, Landa A.E, 2018, García, 2019], además de ser causa en algunos casos de pérdidas humanas debido a colapsos de las estructuras, como puentes, edificios, etc. Por anterior el fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto es de gran importancia para un gran número de investigadores, constructores y autoridades alrededor del mundo, que trabajan arduamente para contribuir a la disminución de dicho problema, con medidas de control y de protección, preventivas, siendo atacado el problema con investigaciones desde diferentes perspectivas, como lo es

fabricación del concreto, el uso de aditivos, materiales alternativos, etc., simulando medios agresivos de contacto que deterioran el concreto de diferentes formas [Santiago et. al., 2016; Baltazar et. al., 2016; Santiago et. al., 2016; Bellezze T., 2006]. De este problema se sabe que el principal causante de la corrosión en concreto reforzado es causado por el ataque de los iones cloruros, mismos que se tienen presentes en los medios marinos principalmente, pero también pueden ser incluidos por circunstancias externas desde la elaboración de las mezclas de concreto, es poco común concentraciones altas de NaCl en los suelos, así como en las aguas freáticas, es más común encontrar presencia de sulfatos, tanto los iones cloruros como los iones sulfatos, puede dañar elementos como las pilas o pilotes de un puente, una zapata de un edificio, como una losa de una núcleo eléctrica etc., por lo anterior es de suma importancia, el contribuir a la solución del problema desde una perspectiva sustentable que permita mejorar la resistencia a la corrosión por cloruros de las estructuras de concreto reforzado y que contribuya a un menor impacto al medio ambiente al reutilizar residuos industriales o agroindustriales en la elaboración de dichos concretos ecológicos, se ha demostrado que la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) presenta excelentes propiedades puzolánicas [Chusilp et. al, 2009, Cordeiro et. al, 2008; Cordeiro et. al, 2009; Ganesan et. al., 2007;]. La CBCA es un desecho agroindustrial que tan solo en el estado de Veracruz es de más de 3000 toneladas anuales [www.elfinanciero.com.mx, 2014] y de las cuales no tienen un uso específico y es considerado como basura, aunque se han reportado recientemente trabajos o investigaciones para usar la CBCA en la construcción de carreteras sustentables [Ojeda et. al., 2018], son más los trabajos realizados en el concretos con sustitución de CBCA para evaluar la corrosión al ser expuestos a sulfatos [Landa, A.E., 2018, Ariza, 2019; García, 2019; Ruiz, M., 2019] y en medios marinos reales y simulados [Landa A.E., 2018; Landa A.E., 2018; Landa, 2019; Landa, 2019;]. Por todo lo anterior fue de interés de los autores el desarrollar la presente investigación, en la cual se evalúa el comportamiento de la corrosión del acero inoxidable 304, comparándolo con el acero AISI 1018, que es el más utilizado a nivel mundial para la construcción de cualquier tipo de estructura de concreto reforzado, dichos aceros fueron embebidos como refuerzos en dos concretos ecológicos, uno fabricado a base de la sustitución parcial de 10% de del Cemento Portland tipo CPC 30R RS por un 10% de Humo de Silice (Desecho Industrial) y el segundo con una sustitución parcial del CPC 30R RS por 10 % de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA). Los dos concretos ecológicos se compararon con un concreto normal (100% CPC 30R RS) y con los mismos tipos de aceros como refuerzos. Se presentan para su discusión los resultados de los potenciales de media celda E_{corr} y la cinética de corrosión i_{corr} de más de 300 días de exposición a una solución al 3.5% de NaCl como medio agresivo y en agua potable como medio control o de referencia, el propósito es contribuir con información para poder construir estructuras de concreto reforzado que sean resistentes a la corrosión por sulfatos, pero además que sean estructuras a base de concretos ecológicos que representen un beneficio para el desarrollo sostenible de nuestras sociedades.

2. PROCEDIMIENTO

El procedimiento para la realización del presente proyecto fue dividirlo en tres etapas, la primera fue la del diseño de las mezclas de concreto, así como la caracterización en estado fresco y endurecido de dichas mezclas, la segunda contemplo la preparación de los aceros de estudios para la fabricación de los especímenes de estudio y la tercera fué la puesta a punto de la celda electroquímica para la evaluación de los potenciales de media celda (E_{corr}) y la cinética de corrosión (I_{corr}).

2.1 Dosificación y Proporcionamiento de las Mezclas de Concreto

La dosificación se realizó de acuerdo al método del ACI 211.1 [ACI, 2004], metodología que considera la calidad del concreto requerida, tomando en cuenta principalmente la resistencia a compresión (f'_c), el revenimiento (trabajabilidad o consistencia) tamaño máximo de agregado, además de la caracterización de las propiedades físicas de los agregados (finos y gruesos) a emplear, conociendo

dichos parámetros se lleva a cabo la dosificación para el concreto deseado, que es determinar cantidad de materiales a utilizar (Cemento, Agua, Grava, Arena). La Tabla 1, resume las características físicas de los materiales utilizados en la presente investigación, las pruebas se realizaron de acuerdo a las normas ASTM [ASTM, 2007; ASTM, 2014; ASTM, 2015; ASTM, 2015; ASTM, 2016]

Tabla 1. Resumen de resultados de la caracterización de los agregados

Propiedades físicas de los materiales	Agregado Grueso Natural	Agregado Fino
Masa específica seca (Mes) gr/cm ³	2.38	2.60
Masa Volumétrica Varillada (Mvv) Kg/cm ³	1381	1764
Absorción (A) %	5.1	1.56
Módulo de Finura		3.4
Tamaño Máximo Nominal	¾"	

La Tabla 2 muestra el proporcionamiento obtenido para elaborar las tres mezclas de estudio, se utilizó en el presente trabajo una relación a/c = 0.65. La primera mezcla es con 100% de CPC 30R RS [ONNCCE, 2014], la segunda con sustitución parcial de 10% de CBCA y la tercera con 10% de HS.

Tabla 2. Proporcionamiento de las mezclas de concreto para 1 m³

Materiales Kg/m ³	Relación a/c=0.65		
	CPC 30R RS	CBCA	HS
Agua	205	205	205
Cemento	456	410.4	410.4
Sustituto Parcial	0	45.6	45.6
Agregado Grueso	913	913	913
Agregado Fino	631	631	631

2.2. Caracterización del Concreto Fresco y Endurecido

De acuerdo a los ensayos de la normativa ONNCCE y ASTM, se determinaron las características del concreto en estado fresco y su resistencia mecánica, las pruebas y los resultados de ellas se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánica de los concretos empleados.

Parámetro	CPC 30R RS	CBCA	HUMO DE SÍLICE
Revenimiento [ONNCCE, 2010]	2 cm	1.5 cm	1.0 cm
Temperatura [ASTM, 2008]	22.0 °C	22.0 °C	22.0 °C
Masa volumétrica [ONNCCE, 2010]	1896 kg/m ³	1892 kg/m ³	1703 kg/m ³
Resistencia a compresión	216 kg/cm ²	211 kg/cm ²	257 kg/cm ²

2.3. Especificaciones de los Especímenes de Prueba

2.3.1. Características de las barras de refuerzo

En cada espécimen se embebieron dos barras de 3/8" de diámetro, una de acero inoxidable 304, la segunda de acero AISI 1018, y una tercer barra de acero AISI 304 de 1/8" de diámetro, las dos primeras barras de acero se utilizaron como electrodos de trabajo (ET) para la evaluación del comportamiento de la corrosión (monitoreo de E_{corr} e i_{corr}), y la tercera como electrodo auxiliar (EA), utilizándose como electrodo de referencia el de Cobre Sulfato de Cobre, el arreglo de los refuerzos es similar a lo reportado en la [Santiago et. al., 2013], además a las dos barras se les delimitó el área de exposición como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Características barras acero inoxidable 304 y AISI 1018 (cotas en cm)

2.3.2. Nomenclatura de los Especímenes

Para los especímenes de prueba y de acuerdo a los parámetros a monitorear se elaboró la nomenclatura que se muestra en la siguiente tabla 4.

Tabla 4. Nomenclatura de especímenes de prueba.

Concreto Normal 100% CPC 30R RS	Concreto Ecológico 10% CBCA	Concreto Ecológico 10% HUMO DE SÍLICE
CP-304	CC-304	HS-304
CP-1018	CC-1018	HS-1018

- CP=Concreto sin sustitución (100% CPC 30R RS)
- CC=Concreto con sustitución de 10% de CBCA
- HS=Concreto con sustitución de 10% de HUMO DE SÍLICE
- 304= Acero inoxidable 304
- 1018= Acero AISI 1018

2.3.3. Celda electroquímica.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento electroquímico de concretos ecológicos a base de CBCA y HS como sustitutos parciales en un 10% por Cemento Portland, los especímenes de estudio fueron cubos de 15 cm por lado, la celda electroquímica fue de acuerdo a la norma ASTM G59 [ASTM, 2009] para poder emplear la técnica electroquímica de resistencia a la Polarización Lineal (RPL), mediante el uso de un Potenciostato/Galvanostato como se observa en la figura 2.

Figura 2. Celda electroquímica para el monitoreo de la corrosión

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos electroquímicos de los especímenes a base de concretos ternarios se muestran a continuación.

3.1 Potencial de Corrosión

Para interpretar los resultados obtenidos del Potencial de Corrosión de cada uno de los especímenes de prueba, se analizaron acorde a norma ASTM C876-15 [ASTM, 2015], agregando un rango más de acuerdo a la literatura [H. Won-Song, 2007], lo anterior se resume en la tabla 6.

Tabla 6. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

Potenciales de corrosión mV vs Cu/CuSO ₄	
< - 500	Corrosión severa
< -350	90% de Probabilidad de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Probabilidad de Corrosión

3.1.1 E_{corr} del acero AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos expuestos al medio control

Figura 3. E_{corr} aceros AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos (medio control).

La figura 3 presenta el comportamiento del monitoreo de los potenciales de corrosión (E_{corr}) que se realizaron a los aceros AISI 304 y 1018, embebidos en las tres mezclas, control con 100% de Cemento Portland (CP), y las dos restantes considerados concretos ecológicos al tener un 10% de sustitución de Cemento Portland por Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CC) y Humo de Sílice (HS). Para los especímenes con acero AISI 1018 se tienen a lo largo de los 300 días de exposición valores de E_{corr} con valores por debajo de -150 mV para los concretos CP y CC, en cambio se observan valores cercanos a -100 mV para el acero AISI 1018 del concreto con 10% de Humo de Sílice, HS-1018. Los valores indican un 10% de probabilidad de corrosión, concordando con el medio que no es

agresivo. Así también los especímenes con acero AISI 304 presentan una tendencia a valores menos negativos, teniendo valores un comportamiento similar en las tres mezclas de estudio, con valores de E_{corr} que indican, incertidumbre hasta el día 84, para a partir del día 91 hasta el final de los 300 días de exposición y monitoreo reportar valores de E_{corr} menores a -200 mV, lo que indica una condición de pasividad, con un 10% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876-15.

3.1.2 E_{corr} del acero AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos expuestos a NaCl al 3.5%

Figura 4. E_{corr} aceros AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos (NaCl al 3.5%).

En la figura 4 se presenta el comportamiento de los potenciales de corrosión E_{corr} , de los especímenes de concretos ecológicos expuestos al medio agresivo, solución al 3.5% de NaCl, simulando un medio marino. Se observa como el acero AISI 1018 que muestra en la etapa de curado valores de E_{corr} que indican incertidumbre, entre -210 y -280 mV, en los tres concretos, 100% CPC, 10% CBCA (CC-1018) y 10% HS (HS-1018), sin embargo el espécimen CC-1018 para el día 56 empieza a presentar una tendencia a los valores más negativos de E_{corr} con el paso del tiempo, indicando una activación del sistema, llegando a E_{corr} de hasta -510 mV el día 154, lo que indica una corrosión severa, esto debido al medio agresivo. Así mismo el espécimen CP-1018, presenta un comportamiento similar al CC-1018, con valores de incertidumbre hasta el día 84, valores de E_{corr} menores a -350 mV, pero activándose el sistema después del día 91 llegan al día 154 a valores de -360 mV, con una tendencia a más negativos llegando al final del monitoreo a valores de E_{corr} de hasta -600 mV, indicando un nivel de corrosión severa. Si bien el espécimen HS-1018 presente un mejor desempeño, relacionado al humo de sílice y su acción para hacer más impermeable la matriz del concreto, solo retardó el comportamiento presentado por los especímenes CP-1018 y CC-1018, retrasando su proceso de activación hasta el día 147 entrando en el rango de valores de E_{corr} que indican un 90% de probabilidad de corrosión, manteniéndose en el hasta el día 256, para después presentar valores más negativos que -500 mV los últimos tres monitores indicando de acuerdo a la norma ASTM C-876-15 un nivel de corrosión severa, pero con valores más positivos que los especímenes CP-1018 y CC-1018. Para el caso de los especímenes con acero AISI 304, los concretos ecológicos CC-304 y HS-304 presenta un excelente desempeño en el ambiente marino simulado de la presente investigación, presentando valores entre -180 y -220 mV hasta el día 77, indicando incertidumbre de corrosión, para después del día 84 hasta el final del monitoreo presentar una tendencia a valores más positivos de E_{corr} para ambos especímenes.

elaborados con concretos ecológicos a base de CBCA y HS, presentando valores más positivos de -200 mV, lo que indica de acuerdo a la norma ASTM C-876-15 un 10% de probabilidad de corrosión, o pasividad del sistema. Para el espécimen elaborado con 100% CPC, CP-304, presenté valores más negativos de E_{corr} , manteniéndose en zona de incertidumbre con valores en el rango de -200 y -350 mV, desde el primer día de exposición al medio agresivo, pero con una tendencia a valores más positivos, pasando a la zona de 10% de probabilidad de corrosión para el día 217, con valores de -185 hasta -170 mV al final del periodo de exposición indicando la pasividad del acero.

3.2 Cinética de Corrosión (I_{corr})

Los resultados obtenidos de la cinética de corrosión I_{corr} , fueron interpretados de acuerdo al criterio del Manual de la red Durar [O. Trocónis et. al., 1997].

Tabla 7. 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

3.2.1 I_{corr} del acero AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos expuestos al medio control

En la siguiente tabla, se visualiza, la velocidad de corrosión que presentaron los especímenes de estudios en los 300 días de exposición al Medio Control, como puede observarse, tanto los especímenes con acero inoxidable AISI 304 y los reforzados con acero AISI 1018 presentaron un nivel de corrosión despreciable, pero los valores de Intensidad de Corrosión son 5 veces menores en los especímenes con acero AISI 304, además de presentar menor intensidad los concretos ecológicos con valores de $0.011 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el CC-304 y $0.008 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el HS-304, se relaciona este comportamiento noble en todos los especímenes a que están expuestos a un medio no agresivo.

Tabla 8. Intensidad de corriente especímenes expuestos al medio control
(Evaluación a los 300 días)

Espécimen	(I_{corr}) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Nivel de Corrosión
CP-1018	0.064	Despreciable
CC-1018	0.057	Despreciable
HS-1018	0.053	Despreciable
CP-304	0.013	Despreciable
CC-304	0.011	Despreciable
HS-304	0.008	Despreciable

3.2.2 I_{corr} del acero AISI 304 y AISI 1018 en concretos ecológicos expuestos a NaCl al 3.5%

La tabla 9, muestra la velocidad de corrosión que presentaron los especímenes de estudios a los 300 días de exposición a una solución al 3.5% de NaCl, como medio agresivo, se tiene que los especímenes con aceros inoxidable AISI 304, presentan un excelente comportamiento contra la corrosión, con valores de I_{corr} de $0.0216 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el espécimen elaborado con 100% de CPC (CP-304), de $0.0197 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el elaborado con 10% de CBCA (CC-304) y de $0.0153 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el elaborado con un 10% de Humo de Sílice (HS-304), valores que indican una protección de hasta 100 veces mayor contra

la corrosión en comparación de los concretos con acero AISI 1018, además de identificarse una matriz más impermeable para los concretos ecológicos con sustitución de un 10% humo de sílice, seguida por el concreto con 10% de CBCA, en comparación del concreto normal, 100% CPC. Para el caso de los especímenes con acero AISI 1018 todos presentaron valores de I_{corr} por arriba de $1.0 \mu A/cm^2$ lo que indican un nivel de corrosión muy elevados. Presentando una mayor protección los concretos ecológicos, misma que es relativa debido a los niveles de corrosión muy elevados, pero que permitió presentar en dichos concretos valores menores de I_{corr} en comparación con el espécimen CP-1018 (concreto con 100% CPC 30R) que presentó el mayor valor con un $I_{corr} = 1.887 \mu A/cm^2$, por arriba del presentado en los concretos ecológicos, teniendo una pequeña disminución en los dos concretos ecológicos, presentando el espécimen CC-1018 un $I_{corr} = 1.643 \mu A/cm^2$ y el espécimen HS-1018 un I_{corr} de $1.298 \mu A/cm^2$, si bien se puede ver una influencia al utilizar Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar y Humo de Sílice como sustituto parcial del Cemento Portland CPC 30R en un 10%, debido a presentar dichos concretos menores valores de velocidad de corrosión, se concluye que para un medio agresivo como lo es el medio marino, la mejor opción es reforzar a los concretos con acero AISI 304 para optimizar el beneficio del uso de este residuo agroindustrial, los presentes resultados concuerdan con los presentados en diferentes investigaciones a nivel mundial.

Tabla 9. Intensidad de corriente especímenes expuestos a NaCl al 3.5%
(Evaluación a los 300 días)

Espécimen	(I_{corr}) $\mu A/cm^2$	Nivel de Corrosión
CP-1018	1.887	Muy Elevada
CC-1018	1.643	Muy Elevada
HS-1018	1.298	Muy Elevada
CP-304	0.0216	Despreciable
CC-304	0.0197	Despreciable
HS-304	0.0153	Despreciable

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- Los concretos ecológicos con sustitución de 10% de CBCA y 10% de HS, presentan propiedades en estado fresco como lo es el revenimiento, temperatura y masa volumétrica muy similares.
- Los concretos ecológicos en estado endurecido presenta el elaborado con 10% de CBCA una resistencia 211 kg/cm^2 , teniendo el concreto normal una resistencia de 216 kg/cm^2 , considerándose de acuerdo a la literatura de la misma calidad. El concreto ecológico con 10% de Humo de sílice logró una resistencia mayor en un 19% con respecto al concreto normal con una resistencia de 257 kg/cm^2 , asociado a una matriz más densa característica que se atribuye a las características propias del Humo de sílice en el concreto.
- En lo que respecta al comportamiento de la corrosión del acero AISI 304 como refuerzo en concretos ecológicos al ser expuestos a cloruros por más de 300 días, el acero AISI 304 presento un excelente desempeño con valores de potenciales de corrosión, E_{corr} menores a 200 mV, indicando 10% de probabilidad de corrosión o pasividad del acero. Siendo validado la pasividad del acero AISI 304 con los valores de I_{corr} presentados al final del monitoreo, valores menores a 0.1, indicando un nivel de corrosión despreciable o de no corrosión en los tres concretos de estudio, normal y ecológicos.
- Se puede identificar de acuerdo a los valores de I_{corr} presentados por el acero AISI 304, una diferencia pequeña pero asociada a la protección ofrecida por los concretos ecológicos, teniendo

mayor protección el elaborado con un 10% de Humo de Sílice y el elaborado con un 10% de CBCA.

- Es viable el uso de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar como sustituto parcial de Cemento Portland para elaborar concretos ecológicos, que en conjunto con el acero AISI 304 como acero de refuerzo logran un Concreto Reforzado 100 veces más resistente a la corrosión debida a los cloruros a diferencia del Concreto Reforzado con acero AISI 1018.

5. AGRADECIMIENTOS

M.A. Baltazar-Zamora, et. al., agradecen a PRODEP por el Apoyo otorgado por la SEP, al Cuerpo Académico UV-CA-458 "Sustentabilidad y Durabilidad de Materiales para la Infraestructura Civil", en el marco de la Convocatoria 2018 para Fortalecimiento de Cuerpos Académicos con IDCA 28593.

6. REFERENCIAS

- Ariza H.A., Croche R., Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Villegas R., Márquez S., Baltazar-Zamora M.A. (2019). "Evaluación de la corrosión del acero galvanizado y acero AISI 304 embebidos en concretos ecológicos con sustitución de CPC por 10, 20 y 30% de CBCA-HS expuestos a Na_2SO_4 al 3.5%." Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- ASTM International. (2007), *ASTM C29 / C29M-07-Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- ASTM International. (2014), *ASTM C136 / C136M -14-Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM International. (2015), *ASTM C127-15-Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.
- ASTM International. (2015), *ASTM C128-15-Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*.
- ASTM International. (2016), *ASTM C33/C33M-16e1-Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM International. (2015), *ASTM C 876-15, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete*.
- ASTM International. (2008) *ASTM C1064/C1064M - 08 Standard test method for temperature of freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete*.
- ASTM International. (2009) *ASTM G 59-97(2009), Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*.
- Baltazar-Zamora M.A., Santiago, G., Moreno V., Croche R., De la Garza M., Estupiñan, F., Zambrano, P., Gaona, C. (2016). *Electrochemical Behaviour of Galvanized Steel Embedded in Concrete Exposed to Sand Contaminated with NaCl*. Int. J. Electrochem. Sci. 11, 10306–10319, doi: 10.20964/2016.12.28.
- Bellezze T., Malavolta M., Quaranta A., Ruffini N., Roventi G. (2006). *Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars*. Cement and Concrete Composites., 28, 246-255.
- Chusilp N., Jaturapitakkul C., Kiattikomol K. (2009). *Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete*. Construction and Building Materials, 23, 3352-3358.
- Comité ACI 211.1, ACI. (2004) "Proporciónamiento de Mezclas, Concreto Normal, Pesado y Masivo ACI 211.1", IMCYC, México, D.F.
- Cordeiro G.C., Toledo R.D., Tavares E.R. (2008). *Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*. Cement and Concrete Composites, 30, 410-418.

- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., & Fairbairn, E. M. (2009). *Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash*. Construction and Building Materials, 23, 3301-3303.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). *Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*. Cement and Concrete Composites, 29, 515-524.
- García D.L, Cabral J.A, Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Croche R., Baltazar-Zamora M.A. (2019) “*Influencia del medio ambiente de exposición y tipo de curado en la cinética de corrosión de concreto reforzado*” Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- García D.L, Cabral J.A, Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Villegas R., Marquez S., Baltazar-Zamora M.A. (2019). “*Eficiencia anticorrosiva del acero AISI 304 como refuerzo en concretos ecológicos ternarios base CBCA-HS expuestos a sulfato de magnesio*”. Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- Chávez, H. (2014), *Producción de azúcar crecerá 5.47% para ciclo 2014-2015*. El financiero, Bloomberg, Consultado en: <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/produccion-de-azucar-crecera-47-para-ciclo-2014-2015.html>
- Landa A.E., Croche R., Márquez S., Galván R., Gaona C., Almeraya F., Baltazar-Zamora M.A. (2018). *Correlation of Compression Resistance and Rupture Module of a Concrete of Ratio w/c= 0.50 with the Corrosion Potential, Electrical Resistivity and Ultrasonic Pulse Speed*, ECS transactions, 84, 217-227
- Landa A.E., Croche R., Márquez S., Villegas R., Ariza H.A., Estupiñán F., Gaona C., Almeraya F., Baltazar-Zamora M.A. (2018). *Corrosion Behavior 304 and 316 Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Based on Sugar Cane Bagasse Ash Exposed to Na₂SO₄*, ECS transaction, 84, 179-188
- Landa A.E., Croche R., López O.M., Galván R., Cabral J.A., Gaona C., Almeraya F., Baltazar-Zamora M.A. (2018). *Corrosion Behavior of AISI 316 Stainless Steel As Reinforcement in Ternary Sustainable Concrete Based on SCBA-SF Exposed in Seawater*, ECS Meeting Abstracts, MA2018-02 584-584
- Landa A.E., Castillo S., Reyes J.A., Villegas R., Galván R., Cabral J.A., Gaona C., Almeraya F., Baltazar-Zamora M.A. (2018). *Evaluation of the Corrosion of AISI 304 Stainless Steel Embedded in Sustainable Concrete with High Volumes of SCBA-SF Exposed in Marine Environment*, ECS Meeting abstracts, MA2018-02 587
- Landa A., Cabral J., Gaona C., Almeraya F., Ramírez A.C., Ruiz M., Malpica R., Márquez S., Baltazar-Zamora M.A. (2019) “*Evaluación electroquímica del acero inoxidable AISI 316 embebido en concretos sustentables base ceniza de bagazo de caña de azúcar expuestos a un medio marino*” Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- Landa A., Landa A., Rangel J.M., Almeraya F., Croche B., Baltazar-Zamora M.A., (2019). “*Comportamiento de la corrosión del acero AISI 316 como refuerzo en concretos ternarios sustentables con sustitución parcial de CPC en 10%, 20% y 30% de CBCA-HS inmersos en agua de mar*”. Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2014) “*NMX-C-083-ONNCCE-2002: Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes – Método de Ensayo*”, ONNCCE, S.C., México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2010) “*NMX-C-156-ONNCCE-2010: Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco*”, ONNCCE, S.C., México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2010) “*NMX-C-162-ONNCCE-2010: Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación de*

- la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico”, ONNCCE, S.C., México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2014) “*NMX-C-414-ONNCCE-2014: Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*”, ONNCCE, S.C., México
- Ojeda Farías, O., Baltazar Zamora, M., Mendoza Rangel, J. (2018). *Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material*. Revista ALCONPAT, 8(2), 194-208. doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>.
- Ruíz M., Landa A., Cabral J.A., Gaona C., Almeraya F., Malpica R., Márquez S., Baltazar M.A., (2019) “*Influencia del tipo de acero en el comportamiento de la corrosión de concretos sustentables ternarios elaborados con ceniza de bagazo de caña de azúcar y humo de sílice expuestos a sulfato de sodio*” Memorias del XXXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 12th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, SMEQ, Querétaro (México).
- Santiago-Hurtado G., Baltazar-Zamora M.A., Galindo A., Cabral J.A., Estupiñán F., Zambrano Robledo P., Gaona-Tiburcio C. (2013). *Anticorrosive Efficiency of Primer Applied in Carbon Steel AISI 1018 as Reinforcement in a Soil Type MH*. Int. J. Electrochem. Sci., 8, 8490.
- Santiago, G., Baltazar-Zamora M.A., Galván, R., López, L.D., Zapata, F., Zambrano, P., A. Gaona, C. and Almeraya, F. (2016), *Electrochemical evaluation of reinforcement concrete exposed to soil type sp contaminated with sulphates*. Int. J. Electrochem. Sci. 11, 4850-4864, doi: 10.20964/2016.06.31
- Santiago, G., Baltazar-Zamora M.A., Olguín, J., López, L.D., Galván, R., Ríos, A. Gaona, C. and Almeraya, F. (2016), “*Electrochemical evaluation of a stainless steel as reinforcement in sustainable concrete exposed to chlorides*”. Int. J. Electrochem. Sci. 11, 2994
- Troconis de Rincon, O., et al. (2016), “*Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long-Term Exposure*”. Corrosion. 72, 824.
- Troconis de Rincón, O., et. al. (1997). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Red DURAR. CYTED. Venezuela. pp.134
- Won-Song H. and V. Saraswathy V. (2007), “*Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review*” . Int. J. Electrochem. Sci., 2, 1-28.