DISMINUCIÓN DE LA CORROSIÓN MEDIANTE UNA ADICIÓN PUZOLÁNICA ECOLÓGICA PARA EL INCREMENTO DE LA DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES

J. J. GARCÍA CHÁVEZ¹⁻², E. M. ALONSO GUZMÁN¹, L. A. GONZÁLEZ LUNA¹,
E. TAFOLLA MARTÍNEZ¹, V. M. BÁEZ ÁNGEL¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Avenida Francisco J. Múgica, sin número, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

² Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica, sin número, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

La corrosión del acero en estructuras de concreto reforzado está estrechamente ligada a la degradación del concreto armado, lo cual provoca disminución de la vida útil. Una forma de mitigarlo es implementando ecomateriales (adiciones puzolánicas) al concreto reforzado. Las adiciones utilizadas fueron: ceniza de bagazo de caña (CBC) y ceniza de horno (CH). Se realizó un análisis y evaluación del comportamiento de concreto armado en probetas de 20cm x 10cm x 5cm y probetas de 10cm x 20cm con relación agua/cemento (a/c) = 0.45 con agregados triturados convencionales. Para conocer su caracterización se realizaron los estudios con base a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. Para analizar el potencial y la velocidad de propagación de corrosión se evaluaron sus propiedades físicas por medio de dos parámetros: potencial de corrosión (E_{corr}) y resistencia a la polarización lineal (R_p). Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del concreto por medio de pruebas no destructivas como: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica (R_e) con base a los parámetros de la RED DURAR y la norma NMX-C-530-ONNCCE-2017. Dando resultados favorables a edades tardías de estas adiciones en comparación con la muestra control. Además, se desarrollaron pruebas destructivas de resistencia a la compresión con base a la norma ASTM C-39/C39M-18. A través de los diseños por durabilidad de concretos y la implementación de ecomateriales podremos lograr densificar la matriz del concreto, mermando el paso de los agentes que oxidan al acero de refuerzo, así como mitigar el impacto ambiental disminuyendo la huella de carbono al utilizar ecomateriales, incrementando la vida útil de las obras de concreto reforzado.

Palabras clave: corrosión; concreto reforzado; ecomateriales; vida útil.

ABSTRACT

The corrosion of steel in reinforced concrete structures is closely linked to the degradation of the reinforced concrete, which causes decreased service life. A way to mitigate it is implementing ecological materials (additions puzolánicas) to reinforced concrete. The additions were used: ash of sugar cane bagasse (CBC) and ash from oven (CH). It conducted an analysis and evaluation of the behavior of reinforced concrete in test tubes of 20cm x 10cm x 5cm and cylinders of 10cm x 20cm with respect water/cement (a/c) = 0.45 with added crushed conventional. To know its characterization studies were performed with the basis of the Norm NMX-C-111-ONNCCE-2004. To analyze the potential and the speed of propagation of corrosion is assessed their physical properties by means of two parameters: potential of corrosion (E_{corr}) and resistance to the linear polarization (R_p). We evaluated the physical and mechanical properties of the concrete by means of non-destructive testing as: speed of ultrasound pulse (VPU) and electrical resistivity (R_e) on the basis of the parameters of the network last and the Norm NMX-C-530-ONNCCE-2017. Giving favorable results at a late age of these additions in comparison with the control sample. In addition, we developed destructive tests of resistance to compression on the basis of the ASTM C-39/C39M-18. Through the designs for durability of concrete and the implementation of ecological materials we can achieve compact the array of concrete, straining the step of the agents that oxidize the steel reinforcement, as well as mitigating the environmental impact by reducing the carbon footprint when using ecomateriales, increasing the working life of the works of reinforced concrete.

Keywords: corrosion; reinforced concrete; ecological materials; service life.

RESUMO

A corrosão do aço em estruturas de betão armado está intimamente ligada à degradação do betão armado, o que resulta numa diminuição da vida de serviço. Uma maneira de mitigá-lo é implementar ecomateriais (adições puzolánicas) para concreto armado. As adições utilizadas foram: cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) e cinzas do forno (CH). Realizou-se uma análise e avaliação do comportamento do concreto armado em espécimes de 20cm x 10cm x 5cm e espécimes de 10cm x 20cm com relação água/cimento (a/c) = 0,45 com agregados triturados convencionais. Para conhecer sua caracterização foram conduzidos estudos baseados no padrão NMX-C-111-ONNCCE-2004. Para analisar o potencial e a velocidade de propagação da corrosão, suas propriedades físicas foram avaliadas por meio de dois parâmetros: potencial de corrosão (E_{corr}) e resistência à polarização linear (R_p). Avaliamos as propriedades físicas e mecânicas do concreto por meio de testes não destrutivos, tais como: taxa ultra-sônica do pulso (VPU) e resistividade elétrica (R_e) com base nos parâmetros da última rede e no padrão NMX-C-530-ONNCCE-2017. Dando resultados favoráveis em idades tardias dessas adições em comparação com a amostra de controle. Além, o teste destrutivo da força compressiva foi desenvolvido baseado em ASTM C-39/C39M-18. Através dos designs para a durabilidade do concreto e a implementação de ecomateriais pode obter densificar a matriz a concreta, reduzindo o ritmo de agentes que oxidam o aço de reforço, bem como mitigar o impacto ambiental diminuindo a pegada de carbono usando ecomateriais, aumentando o tempo de trabalho de betão armado.

Palavras-chave: corrosão; Betão armado; ecomateriais; vida de serviço.

1. INTRODUCCIÓN

En México el deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se estiman gastos del 3.5% del PIB asociados al fenómeno de corrosión de cada país (González Fernández, 2007).

El 68% de los puentes están contruidos de concreto reforzado, lo cual repercute en la aplicación de técnicas y metodologías de mantenimiento, reparación o reconstrucción, y con lo cual el presente estudio fortalece su justificación (Ilustración 1). (IMT-pt-380, 2011)

Ilustración 1. Distribución de puentes por tipo de material. (IMT-pt-380, 2011)

Desde el punto de vista ambiental, la industria del cemento es responsable de cerca del 5% del total de las emisiones de CO₂ generadas por el hombre. (Cement Sustainability Initiative [CSI], 2012). La producción de una tonelada de Cemento Portland (CP) genera aproximadamente entre 0.67 y 1.0 tonelada de CO₂, siendo responsable del 7% de las emisiones de CO₂ en el mundo, según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), tomando en cuenta que para el año 2012 la producción de cemento en México fue mayor a 10 millones de toneladas. (Federación Interamericana del Cemento [FICEM], 2013)

Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de las industrias y academias para generar alternativas y tecnologías de construcción de materiales con criterios de sostenibilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementicios alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. (Bernabé Reyes, 2015) Una forma de mitigar las consecuencias es implementando adiciones ecológicas al concreto armado.

Las adiciones ecológicas, están compuestas principalmente de “puzolanas”. Estas puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto. (Roland Stulz, 1997) Estas adiciones ecológicas son residuos que resultan de la quema de materia orgánica, la cual al adicionarla al concreto permite densificar la matriz (Ilustración 2). (Lau, s.f.)

Ilustración 2. Matriz de concreto con adición de humo sílice. Vacíos interconectados unos con otros (a), Vacíos desconectados por la presencia de humo sílice (b). (Lau, s.f.)

2. OBJETIVO

Evaluar la incorporación de adiciones ecológicas para incrementar la vida útil de obras de infraestructura de concreto reforzado.

3. PROCEDIMIENTO

3.1. Materiales de estudio

3.1.1 3.1.1. Tipo de cemento, agregados pétreos y puzolanas.

- Se utilizó un cemento CPC 30R-RS para la elaboración de los especímenes.
- Se utilizó agregado convencional de Tamaño máximo de agregado (T.M.) de ½” obtenida de la empresa TRACSA¹.
- Se utilizó para todas las mezclas agregado triturado fino del banco Joyitas “La Unión”².
- Las puzolanas de estudio se dividen en 2 tipos: Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) y Ceniza de Horno (CH).

3.1.2 3.1.2. Caracterización de los materiales

En la Tabla 1, se muestran las propiedades del tipo de agregado utilizado para las diferentes mezclas con que se elaboraron los especímenes.

La cantidad de adición puzolánica para la fabricación de especímenes fue de 10% de adición.

Se colaron los especímenes con una relación a/c= 0.45. Debido a que; con relaciones de a/c bajas, la resistencia a la compresión (f'_c) es mayor. Cabe mencionar que se realizaron 3 diferentes tipos de mezclas de concreto.

	Grava Triturada			
	a/c=0.45	m.f=2.68	a/c=0.65	m.f=2.25
	Vol (lts)	Masa (Kg)	Vol (lts)	Masa (Kg)
Cemento	155	480	107	332
Grava	330	871	355	937
Arena	274	659	297	712
Agua	216	216	216	216
Aire	25	0	25	0
Total	1000	2225	1000	2198

Tabla 1. Propiedades del agregado triturado convencional utilizado para las diferentes mezclas de estudio. (García Chávez, 2019)

3.1.3 3.1.3. Elaboración de especímenes

Con las 3 diferentes mezclas de concreto se realizaron dos lotes de muestras:

- Especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm.
- Especímenes rectangulares de concreto con acero de refuerzo de: 20cm x 10cm x 5cm, se utilizó para cada una de las probetas 2 varillas corrugadas de 3/8” de aproximadamente 15 cm de longitud (con recubrimiento de concreto en cada extremo de 2cm) y 1 grafito como electrodo de referencia estable (al centro del espécimen entre varilla y varilla).

En la Ilustración 3 e Ilustración 4, se muestran imágenes de los especímenes elaborados.

¹ TRACSA. Empresa de donde se obtuvo el agregado triturado convencional de T.M de ½”. Ubicado en la carretera Salamanca - Morelia 850 C.P. 58880 Col. San José Trinidad, Morelia, Michoacán.

² Banco Joyitas “La Unión”. Banco de materiales de donde se obtuvo el agregado triturado fino (arena) para el estudio. Ubicado en la carretera Morelia - Quiroga km 28. localidad joyitas. Morelia, Michoacán.

Una vez fabricadas las muestras, en el transcurso de 24 a 48h se procedió a descimbrar y comenzar el proceso de curado, el cual fue por inmersión en agua durante 9 meses hasta el día de las primeras pruebas para que se tuviera una pasivación del acero (en el caso de las muestras con acero de refuerzo embebido) por parte del cemento de manera natural.

Ilustración 3. Partes y composición de un espécimen cilíndrico de 10cmx20cm. Elaborado con agregado triturado convencional con $a/c = 0.45$ (García Chávez, 2019)

Ilustración 4. Partes y composición de un espécimen rectangular de 20cmx10cmx5cm. Elaborado con agregado triturado convencional con $a/c = 0.45$. (García Chávez, 2019)

Para generalizar un poco, en la Tabla 2, se especifican las diferentes mezclas, relación a/c , y adiciones ecológicas que se utilizaron en el estudio en combinación con el agregado triturado.

Mezcla	Relación a/c	Nombre del Especimen
TT	0.45	Testigo con agregado triturado convencional
CHT	0.45	Ceniza de horno con agregado triturado convencional
CCT	0.45	Ceniza de bagazo de caña con agregado triturado convencional

Tabla 2. Especímenes de estudio elaborados con las diferentes adiciones puzolánicas. (García Chávez, 2019)

3.2. Métodos a utilizar

3.2.1. Pruebas destructivas y no destructivas

3.2.1.1. Resistividad eléctrica (R_e)

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un Resistómetro³ (Ilustración 5) que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos.

Ilustración 5. Resistómetro utilizado para determinar la resistividad eléctrica. (García Chávez, 2019)

Las pruebas se realizaron a los dos lotes de muestras:

- Probetas cilíndricas de 10cm x 20cm, las cuales se mantuvieron curando hasta el momento de su utilización. Las pruebas se llevaron a cabo a diferentes edades: tempranas (28,45,90 días) y edades tardías (504 días).
- Probetas rectangulares de 20cm x 10cm x 5cm. A diferencia de las probetas cilíndricas, éstas se mantuvieron en ciclos de humedecimiento y secado al momento de su utilización.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente Ecuación 1. Resistividad eléctrica. (ASTM-G57, 2012) (CYTED-RED DURAR, 1998).

$$\rho = R_e(A/L) \quad (1)$$

Se llevó a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de evaluación de la Norma (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017) para determinar la resistividad eléctrica del concreto armado. Estos parámetros se evalúan en criterios de riesgo a la corrosión, como se especifica en la Tabla 3.

Riesgo de Corrosión (NMX-C-530-ONNCCE-2017)	
Resistividad	Probabilidad de corrosión (porosidad interconectada)
$\rho > 100$ a $200 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad extremadamente baja
$100 > \rho > 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad baja
$50 > \rho > 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad de consideración
$\rho < 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad excesiva

Tabla 3. Criterios de riesgo con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017). (García Chávez, 2019)

³ Resistómetro no.400; marca: Nilsson electrical laboratory inc.

3.2.1.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Las mediciones correspondientes se realizaron mediante un equipo de sistema digital para ensayos ultrasónicos⁴ (Ilustración 6) la cual sirve para conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica.

Ilustración 6. Sistema digital para ensayos ultrasónicos, para determinar la VPU. (García Chávez, 2019)

Esta prueba se realizó a las probetas cilíndricas de 10cm x 20cm, las cuales se mantuvieron curando hasta el momento de su utilización. Estas se llevaron a cabo a diferentes edades: tempranas (28,45,90 días) y tardías (504 días).

Para el cálculo de VPU se utilizó la siguiente Ecuación 2 (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017) (CYTED-RED DURAR, 1998).

$$V = L / \Delta t \quad (2)$$

Se llevó a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de la Norma (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017) para determinar la VPU del concreto armado.

Estos parámetros se evalúan con base a la calidad del concreto y a los criterios de velocidad de propagación, como se especifica en la Tabla 4.

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Clasificación del concreto (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017)
$V > 4575$	EXCELENTE
$4575 > V > 3660$	BUENO
$3660 > V > 3050$	CUESTIONABLE
$3050 > V > 2135$	POBRE
$V < 2135$	MUY POBRE

Tabla 4. Criterios de VPU con base a la (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017) (García Chávez, 2019)

⁴ Sistema digital para ensayos ultrasónicos. Modelo: V-Meter MK IV TM marca NDT - JAMES INSTRUMENTS; con una escala de frecuencia de 24 a 500kHz; exactitud de la propagación de 0.1 microsegundos.

Ilustración 7. A la izquierda: Máquina de carga axial. Al centro: Placas de neopreno para dar uniformidad a la superficie de la probeta. A la derecha: Cilindro con placas de neopreno. (García Chávez, 2019)

Ilustración 8. Potenciostato para medir Potencial de corrosión. (García Chávez, 2019)

3.1.5 3.2.2. Pruebas destructivas

3.2.2.1. Resistencia a la compresión

Se utilizó una máquina de carga axial para calcular el esfuerzo a compresión de los especímenes, con la intención de verificar que los resultados sean concisos de acuerdo con lo que se requiere para simular resistencias de estructuras de altas especificaciones (puentes y carreteras).

Esta prueba se realizó a las probetas cilíndricas de 10cm x 20cm, las cuales se mantuvieron curando hasta el momento de su utilización. Estas se llevaron a cabo a diferentes edades: tempranas (28,45,90 días) y tardías (504 días). Se sometieron dos probetas por edad para obtener un promedio confiable.

Para el cálculo del esfuerzo a compresión se utilizó la siguiente Ecuación 3 (ASTM C39/C39M-18, 2018).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Se llevó a cabo la evaluación de los resultados con base al criterio de la Norma (ASTM C39/C39M-18, 2018)

3.1.6 3.2.3. Pruebas electroquímicas

Las partes que conforman el sistema electroquímico son:

- Electrodo de Referencia (grafito de carbón).
- Electrodo de Trabajo (varilla de acero corrugada de 3/8" de diámetro).
- Solución salina, al 3.5% de *NaCl* en peso.

Los especímenes se mantuvieron curando hasta después de los 2 meses de la elaboración, se sacaron y dejaron pasivar por 9 meses aproximadamente, después se realizó la inmersión en una solución de *NaCl* al 3.5% (porcentaje que se sugiere como equivalente a la concentración de sales en el agua de mar) con agua destilada. (Tórres Gómez, 2010)

3.2.3.1. Potencial y velocidad de corrosión

El equipo utilizado es un potenciostato⁵, el cual se encarga de medir el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Se procedió conforme a las normas (ASTM-G3, 2004) (ASTM-G5, 2004) (ASTM-G59, 2003)

Para tener un mejor control sobre el comportamiento de la velocidad y potencial de corrosión de cada uno de los especímenes y con la finalidad de tener los dos parámetros de control en una misma probeta se mide el potencial de ambas varillas de acero por separado.

Las pruebas se realizaron a las probetas mediante ciclos en estado húmedo (sacados de la solución de agua salina) y en estado seco. Para el cálculo de la densidad de corriente (i_{corr}) y la resistencia a la polarización lineal (R_p) se utilizó la siguiente Ecuación 4 (ASTM-G3, 2004) (ASTM-G5, 2004) (ASTM-G59, 2003) (CYTED-RED DURAR, 1998).

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad (4)$$

3.2 Resultados de pruebas no destructivas

3.2.1 Resultados de resistividad eléctrica

A continuación, en la siguiente gráfica (Ilustración 9), se mostrará una comparativa de la R_e de los diferentes especímenes con adiciones puzolánicas (CC y CH), con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas (28,45,60,90 días) y edades tardías (504 días).

Las líneas rojas muestran los límites de los criterios de riesgo con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017), para verificar estos valores véase Tabla 3 Tabla 3. Criterios de riesgo con base a la norma..

Como podemos observar, dentro de las primeras edades (hasta 90 días) la tendencia de la (R_e) es baja ($<10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$), pero a finales de edad la tendencia aumenta en un rango entre (10 a 50 $\text{k}\Omega\text{-cm}$) en la mayoría de los especímenes. Aun así, la mayoría de las mezclas muestran tendencia de seguir incrementando.

Siendo la CHT0.45 la mezcla que muestra mejores resultados en comparación con la CCT0.45, seguido de la TT0.45. (Para recordar nomenclatura de las mezclas; véase Tabla 2)

⁵ Potenciostato marca GAMRY modelo 600. Mantiene un intervalo de prueba entre: (-0,02 V a 0,02 V), con una velocidad de barrido de 0.125 mV/s.

Ilustración 9. Comparación de la R_e en especímenes de concreto convencional con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas y tardías. (García Chávez, 2019)

3.2.2 Resultados de velocidad de pulso ultrasónico

A continuación, en la siguiente gráfica (Ilustración 10), se mostrará una comparativa de la VPU de los diferentes especímenes con adiciones puzolánicas (CC y CH), con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas (28,45,60,90 días) y edades tardías (504 días).

Las líneas rojas muestran los límites de los criterios de evaluación con base a la norma (NMX-C-530-ONNCCE-2017, 2017) y el manual (CYTED-RED DURAR, 1998) para verificar estos valores véase Tabla 4.

Desde las primeras edades la tendencia de la VPU en la mayoría de las mezclas entra en buena categoría ($4575 > V < 3660$ m/s) a excelente (>4575 m/s). Aun así, la mayoría de las mezclas muestran tendencia de seguir incrementando.

Siendo la CHT0.45 la mezcla que muestra mejores resultados en comparación con la TT0.45, seguido de la CCT0.45.

Ilustración 10. Comparación de la VPU en especímenes de concreto convencional con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas y tardías. (García Chávez, 2019)

3.3 Resultados de Pruebas destructivas

A continuación, en la siguiente gráfica (Ilustración 11), se mostrará una comparativa de la resistencia a la compresión de los diferentes especímenes con adiciones puzolánicas (CC y CH), con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas (28,45 días) y edades tardías (504 días).

La línea roja muestra el (f'_c) de diseño, el cual fue de: $f'_c = 25 \text{ Mpa}$ o 250 kg/cm^2

Desde edades tempranas, las muestras de relación ($a/c = 0.45$) muestran una tendencia de altas tasas de resistencia a la compresión, manteniéndose así a lo largo del tiempo hasta alcanzar edades tardías. En comparación con los 2 tipos de ceniza (CH y CC), la mezcla testigo TT0.45; muestra mejores resultados a edades tardías, siguiendo de la CHT0.45 y por último CC0.45T. Cabe mencionar que la resistencia de compresión de las relaciones $a/c = 0.45$ supera significativamente la resistencia del proyecto.

Ilustración 11. Comparación de la resistencia a la compresión en especímenes de concreto convencional con relación $a/c=0.45$ a edades tempranas y tardías (García Chávez, 2019)

3.4 Resultados de Pruebas electroquímicas

A continuación, en las siguientes gráficas (Ilustración 12, Ilustración 13, Ilustración 14) se mostrarán comparativas de Potencial y Velocidad de corrosión de los diferentes especímenes con adiciones puzolánicas (CC y CH), con relación $a/c=0.45$ a diferentes ciclos de humedecimiento y secado en solución salina (3.5% NaCl).

Como podemos observar en la (Ilustración 12), la comparación es de la misma probeta (TT0.45) en cada una de sus 2 varillas embebidas en el concreto, teniendo un comportamiento similar. Durante los primeros cinco ciclos, no se sumergieron las probetas a la solución salina, teniendo un comportamiento corrosivo nulo, sin embargo; al someterlos a la salmuera, es cuando comienza la despasivación del acero en los especímenes, llegando a un Potencial de corrosión de $<-250\text{mV}$ a $<-500\text{mV}$ y con una Velocidad de corrosión máxima de 0.02mm/año .

Ilustración 12. Potencial y Velocidad de corrosión en especímenes de concreto con relación $a/c=0.45$ Comparación de las dos varillas de la TT0.45. (García Chávez, 2019)

Como se puede observar en al (Ilustración 13), la comparación es de las mezclas TT0.45 y CCT0.45, teniendo un mejor comportamiento el testigo o control sobre la ceniza de bagazo de caña, aun así la velocidad de corrosión máxima fue de 0.06mm/año.

Ilustración 13. Potencial y Velocidad de corrosión en especímenes de concreto con relación $a/c=0.45$ Comparación de las mezclas TT0.45 y CCT0.45 (García Chávez, 2019)

Como se puede observar en al (Ilustración 14), la comparación es de las mezclas TT0.45 y CHT0.45, teniendo un mejor comportamiento el testigo o control sobre la ceniza de horno, aun así, la velocidad de corrosión máxima fue de 0.023mm/año.

Ilustración 14. Potencial y Velocidad de corrosión en especímenes de concreto con relación a/c=0.45 Comparación de las mezclas TT0.45 y CHT0.45 (García Chávez, 2019)

Cabe mencionar que todas las mezclas muestran tendencia en los últimos ciclos de humedecimiento y secado a disminuir su velocidad de corrosión.

4. CONCLUSIONES

■ Pruebas no destructivas:

La R_e es baja dentro de las primeras edades ($<10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$), pero a edades tardías la tendencia aumenta en un rango entre (10 a $50 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) en la mayoría de los especímenes. Aun así, la mayoría de las mezclas muestran tendencia de seguir incrementando, esto lo podemos relacionar con que las cenizas puzolánicas están reaccionando con el cemento logrando cerrar los poros interconectados en la matriz cementicia y, por ende, densificándola.

La VPU en la mayoría de las mezclas entran en categoría de buena ($4575 > V < 3660 \text{ m/s}$) a excelente ($>4575 \text{ m/s}$). Aun así, la mayoría de las mezclas muestran tendencia de seguir incrementando.

■ Pruebas destructivas:

La resistencia de compresión de las relaciones a/c =0.45 supera significativamente la resistencia del proyecto (25Mpa) pudiendo relacionarse los resultados obtenidos (30 a 40Mpa) como concretos de alta resistencia.

Las proporciones bajas de a/c 0,45 proporcionan resistencias de compresión más altas., por lo que se cumple la hipótesis de: $a < a/c > f'c$

- Pruebas electroquímicas:

A pesar de que los especímenes se encuentren en su mayoría en una condición activa ($<-250\text{mV}$) al momento de someterlos a ciclos de humedecimiento y secado en la solución salina de 3.5% NaCl, la velocidad de la corrosión se encuentra entre los valores de 0.02 a 0.06 (mm/año), por lo que se podrían hacer reparaciones mantenimiento en caso de realizar alguna estructura de concreto reforzado con estas adiciones. Sin embargo; cabe mencionar que, en los últimos ciclos, la tendencia de las mezclas con adición puzolánica va en función de disminuir su velocidad de corrosión.

Finalmente, podemos decir que se analizaron los resultados obtenidos con el objeto de proponer la mejor opción respecto a todas las adiciones estudiadas, con las cuales podremos determinar de manera precisa el comportamiento de la vida útil de una obra de infraestructura de concreto reforzado, así como el procedimiento de adición, la cantidad óptima de la adición y todos los requerimientos para implementar la adición seleccionada adecuadamente.

Cabe mencionar que este trabajo está basado en la tesis de maestría de un servidor. Sin embargo; aun nos encontramos en la terminación de la misma, incluyendo todos ensayos por durabilidad al concreto como: permeabilidad rápida de cloruros, carbonatación, porosidad total y efectiva (Fagerlund), ataque por sulfatos, entre otros más. Así como mencionar que se llevará a cabo un análisis más de ciclos de humedecimiento y secado en el caso de las probetas con acero de refuerzo embebido para verificar su comportamiento.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), a los asesores (Dr. Wilfrido Martínez Molina y Dr. Elia M. Alonso Guzmán) pertenecientes al primer cuerpo académico consolidado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Y como co-asesor perteneciente a la Universidad Marista de Querétaro A.C. (UMQ) el Dr. Andrés A. Torres Acosta., quienes aportan sus conocimientos, su valioso tiempo e incondicional apoyo en la realización de este proyecto.

A los trabajadores y prestadores de servicio social del Laboratorio de Materiales “Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, quienes han aportado mucho al desarrollo del presente proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado.

6. REFERENCIAS

ASTM C39/C39M-18. (2018). *Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens*.

ASTM-G3. (2004). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*.

ASTM-G5. (2004). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*.

ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*.

ASTM-G59. (2003). *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*.

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”. Morelia.

Cement Sustainability Initiative [CSI]. (2012). *Global Cement Database on CO2 and Energy Information*. Obtenido de <http://www.wbcsdcement.org/>

CYTED-RED DURAR. (1998). “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”. (S. X. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Ed.) Venezuela: 2da Edición.

- Federación Interamericana del Cemento [FICEM]. (2013). Bogotá, Colombia.
- García Chávez, J. d. (2019). Elaboración propia. Morelia, Michoacán, México.
- González Fernández, J. &. (2007). *Corrosión en las Estructuras de Hormigón Armado: Fundamentos, Medidas, Diagnóstico y Prevención*. España: Gráficas Varona.
- IMT-pt-380. (2011). *P.T. No. 380. Evaluación Electroquímica de Cables de Preestrés para Aplicación Estructural en el Sector Transporte 2a Etapa*. Sanfandila, Querétaro.
- IPCC . (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Lau, B. a. (s.f.). *High Performance Concrete: Fundamentals and Application* . Cambridge, Massachusetts 02139.
- NMX-C-530-ONNCCE-2017. (2017). *Industria de la Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones*.
- Roland Stulz, S. K. (1997). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales revisado edición ampliado*. London WC1B 4HH, UK: IT Publications. Obtenido de <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>
- Tórres Gómez, R. A. (2010). *STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS*. Dyna(164).