

Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto

Y. Díaz-Blanco¹ , C. Menchaca-Campos¹ , C. I. Rocabruno-Valdés² ,
J. Uruchurtu-Chavarín^{1*} 

*Autor de Contacto: juch25@uaem.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>

Recepción: 29/07/2019 | Aceptación: 21/08/2019 | Publicación: 30/08/2019

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto del mucílago de Nopal sobre las propiedades electroquímicas del concreto. Se diseñaron tres concentraciones de este aditivo con una relación Nopal-agua de 1:1, 1:2 y 1:3. Las pruebas de compresión se realizaron a los 28 días de curado. Las muestras se evaluaron durante 270 días a través de diversas técnicas electroquímicas como: Potencial a Circuito Abierto (OCP), Ruido Electroquímico (EN) y Resistencia a la Polarización Lineal (LPR). Los resultados indican una disminución de la resistencia a la compresión en muestras con mucílago de Nopal a los 28 días. El inicio de la corrosión se retrasó y la velocidad de corrosión fue menor para las muestras con mucílago de Nopal. La conservación y el almacenamiento de este aditivo antes de usarse en el concreto puede ser un desafío para analizar.

Palabras clave: mucílago de nopal; concreto reforzado; técnicas electroquímicas; corrosión.

Citar como: Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Rocabruno-Valdés, C. I., Uruchurtu-Chavarín J. (2019), “Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto”, Revista ALCONPAT, 9 (3), pp. 260 – 276, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México.

² Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Tecnológico Nacional de México (TecNM), Cuernavaca, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2020.

Natural additive (nopal mucilage) on the electrochemical properties of concrete reinforcing steel

ABSTRACT

In this investigation the effect of Nopal mucilage on the electrochemical properties of concrete was evaluated. Three concentrations of this additive were designed with a Nopal-water ratio of 1:1, 1:2 and 1:3. Compressive tests were performed after 28 days of curing. Specimens were evaluated for 270 days through various electrochemical techniques such as: Open Circuit Potential (OCP), Electrochemical Noise (EN) and Linear Polarization Resistance (LPR). Results indicate a decrease in compressive resistance in samples with Nopal mucilage at 28 days. The onset of steel corrosion was delayed and the corrosion rate was lower for samples with Nopal mucilage. The conservation and storage of this additive before being used in concrete can be a challenge to analyze.

Keywords: Nopal mucilage; reinforcing concrete; electrochemical techniques; corrosion.

Influência de um aditivo natural (mucilagem nopal) nas propriedades eletroquímicas do aço de reforço de concreto

RESUMO

Nesta investigação, avaliou-se o efeito da mucilagem de Nopal sobre as propriedades eletroquímicas do concreto. Três concentrações deste aditivo foram desenhadas com uma relação Nopal-água de 1: 1, 1: 2 e 1: 3. Os testes de compressão foram realizados após 28 dias de cura. As amostras foram avaliadas por 270 dias através de várias técnicas eletroquímicas, tais como: Potencial de Circuito Aberto (OCP), Ruído Eletroquímico (EN) e Resistência à Polarização Linear (LPR). Os resultados indicam uma diminuição na resistência à compressão em amostras com mucilagem de Nopal aos 28 dias. O início da corrosão do aço foi retardado e a taxa de corrosão foi menor nas amostras com mucilagem de Nopal. A preservação e armazenamento deste aditivo antes de ser usado em concreto pode ser um desafio para analisar.

Palavras-chave: Mucilagem de pera espinhosa; concreto armado; técnicas eletroquímicas; corrosão.

1. INTRODUCCIÓN.

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto expuestas a ambientes contaminados con cloruros es la causa más común del deterioro prematuro (Hansson, 1984; Pech-Canul y Castro, 2002). Lo anterior conduce a grandes pérdidas económicas, así como a la reducción de la vida útil de las estructuras (Valipour et. al., 2014). En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en este campo para analizar las causas y características de este fenómeno, y proporcionar soluciones a esta importante patología del concreto. Normalmente, un concreto de buena calidad mantiene el acero protegido debido a su alta alcalinidad, además, la cubierta de concreto actúa como una barrera física que impide el acceso de agentes agresivos del entorno (Hansson, 1984). Estas propiedades se pierden a una edad temprana, por lo que el uso de materiales naturales o aditivos que mejoren las propiedades del concreto y extiendan su vida útil es un aspecto muy importante por considerar.

Actualmente, los aditivos forman una parte integral de los componentes en mezclas a base de cemento (Ramírez-Arellanes et. al., 2012). Sin embargo, a pesar de la efectividad de los aditivos sintéticos para mejorar las diferentes propiedades del concreto, estos son altamente contaminantes.

En ese sentido, la investigación de aditivos naturales provenientes de plantas y su uso en el concreto son cada vez más relevantes.

El género *Opuntia* pertenece a la familia Cactácea y también se conoce como planta de pera de cactus (Sáenz et. al., 2004). Uno de los principales usos de la familia Cactácea está directamente relacionado con la producción de mucílago. Los tallos y las hojas segregan un líquido viscoso que es una goma o hidrocoloide, compuesto principalmente por polisacáridos. Los polisacáridos están compuestos por largas cadenas de unidades de monosacáridos, que dan como resultado moléculas de carbohidratos poliméricos (Zhang et al., 2019). Este carbohidrato complejo tiene usos potenciales como aditivo para varios productos industriales (Sáenz et. al., 2004). Se ha utilizado como purificador de agua, como aditivo en morteros de cal para mejorar su adhesión, así como aditivo que es capaz de modificar las propiedades en morteros tanto en estado fresco como endurecido. Su uso en concreto varía según las propiedades a modificar, tales como: trabajabilidad, aspectos como la homogeneidad de la pasta, así como el tiempo de fraguado de la mezcla (Zhang et. al., 2019). Además, se considera una fuente potencial de hidrocoloides industriales con muchas aplicaciones en la industria alimenticia (Cárdenas et. al., 1997; Sáenz et. al., 2004; León-Martínez et. al., 2010).

Opuntia ficus-indica, es una planta nativa de México que crece en zonas áridas y semiáridas. Actualmente su cultivo por razones comerciales se ha extendido a países tales como: Italia, Estados Unidos, Chile y Argentina (Torres-Acosta, 2007; Martínez-Molina et. al., 2015). En México, esta planta se llama Nopal y es una gran fuente de alimento para la población en general, así como para el ganado. Desde la antigüedad, el gel producido por este cactus se ha utilizado para pintar y cubrir paredes de adobe, así como para el mantenimiento y la preservación de iglesias y edificios históricos en América Latina (Chandra et. al., 1998; Torres-Acosta y Martínez -Madrid, 2005; Torres-Acosta, 2007).

Diferentes estudios coinciden en que los compuestos presentes en el mucílago Nopal son muy variados, pudiéndose encontrar proteínas, así como diferentes tipos y composiciones de polisacáridos (Chandra et. al., 1998). En general, la composición de los carbohidratos en el mucílago contiene proporciones variables de l-arabinosa, d-galactosa, l-ramnosa y d-xilosa, así como las principales unidades de azúcar (León-Martínez et. al., 2011). Algunos polímeros naturales son capaces de modificar propiedades específicas en los materiales cementosos durante la construcción (Peschard et. al., 2004). Algunas propiedades de los morteros de cemento en estado fresco se pueden mejorar con la adición de polímeros solubles en agua. Las mezclas de cemento modificadas con estos polímeros tienen una alta retención de agua respecto a los morteros ordinarios. Este comportamiento se debe principalmente a las partes hidrofílicas de los polímeros que fijan las moléculas de agua en la mezcla fresca, evitando el secado por evaporación y absorción en el material poroso circundante (Knapen y Van Gemert, 2009).

Ramírez-Arellanes et. al. (Ramírez-Arellanes et. al., 2012) analizaron el efecto del Nopal en pastas de cemento, determinando que los tiempos de fraguado aumentaron con la adición de este aditivo natural. Además, reportaron que hubo cambios en la microscopía de las mezclas con mucílago. Otros autores informan que los tamaños de los cristales de hidróxido de calcio se reducen (Chandra et. al., 1998) y en presencia de polímeros solubles en agua se modifica la microestructura del hormigón (Peschard et. al., 2004; Knapen y Van Gemert, 2009).

Otros hallazgos preliminares sugieren que pequeñas concentraciones de gel de Nopal podrían ser útiles como inhibidores de la corrosión del acero de refuerzo en morteros contaminados con cloruros. Hubo una mejora en la durabilidad de las muestras de gel de Nopal, debido a un aumento en la resistencia a la polarización y una disminución en el agrietamiento inducido por corrosión (Martínez-Molina et. al., 2015).

La presente investigación se enfoca al estudio del mucílago de Nopal como un aditivo modificador de las propiedades electroquímicas del concreto reforzado. En ese sentido, el objetivo de esta

investigación es proporcionar una solución que minimice los daños causados por la corrosión del acero de refuerzo, siendo esta la patología que más afecta las estructuras de concreto reforzado. Un parámetro importante del análisis es determinar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo con la adición de diferentes concentraciones de mucílago Nopal y analizar su efecto a lo largo del tiempo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1 Extracción del mucílago de Nopal.

Las hojas de cactus que se utilizaron tenían un estado fresco de conservación y se encontraban libres de espinas. Para proceder a la extracción del mucílago Nopal, se realizó el siguiente procedimiento: i) se realizó la limpieza de las hojas para eliminar restos de polvo y otros residuos, ii) las hojas se cortaron en trozos de 1 cm x 1 cm para extraer la mayor cantidad de gel posible y iii) los pedazos se mezclaron con agua para obtener tres concentraciones de mucílago con una relación en peso de Nopal-agua de 1:1, 1:2 y 1:3, como se observa en la Figura 1.

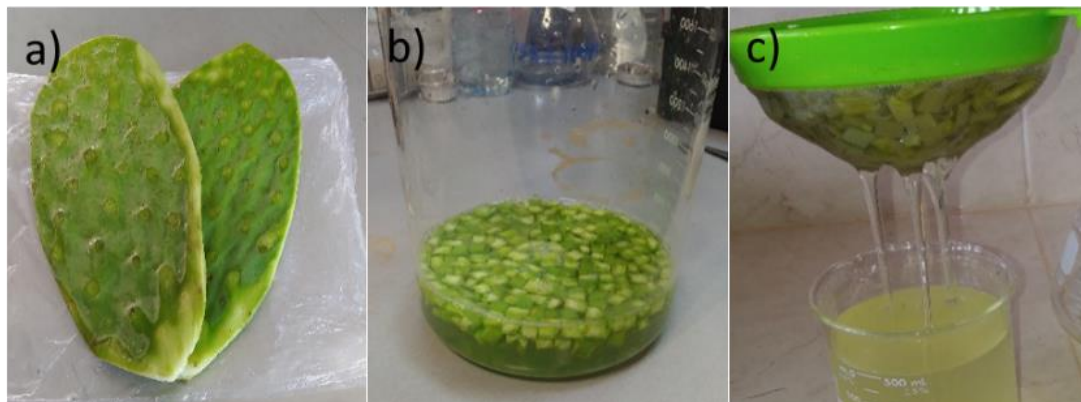


Figura 1. a) Hojas de cactus frescas, b) Nopal mezclado con agua y c) Proceso de filtración del mucílago de nopal.

La extracción del mucílago de Nopal se realizó mediante dos métodos, los cuales se describen a continuación. Maceración a temperatura ambiente, en la que cada mezcla de Nopal con agua se dejó macerar durante 48 horas para su posterior uso en el concreto. Después de este tiempo, la solución comenzó a adquirir un tono más oscuro y un cierto olor a descomposición, como afirman otros autores (Chandra et. al., 1998). El siguiente método de extracción fue maceración aplicando temperatura, en este caso las mezclas de Nopal y agua se colocaron en una parrilla aplicando una temperatura de 95°C durante 10 minutos. Luego, se dejó en reposo durante 24 horas, momento en el cual la solución se incorporó al concreto. En ambos métodos de extracción, la solución se filtró antes de ser incorporada.

2.2 Diseño de las mezclas de concreto.

Las mezclas de concreto se diseñaron utilizando un cemento CPC30R (Tipo II ASTM-C-150), teniendo en cuenta una resistencia característica de 250 kg/cm². La relación agua / cemento utilizada fue de 0.45 para cada una de las mezclas elaboradas. Se usó arena de río como agregado fino y el agregado grueso de piedra triturada tenía un tamaño máximo de 20 mm. El acero de refuerzo formado por barras corrugadas de 3/8 de pulgada grado 42 no tenía tratamiento superficial. Las proporciones para las mezclas de concreto se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación de mezcla de concreto para cada muestra cilíndrica (CS) y muestra prismática (PS).

Materiales	Cantidad de materiales por muestra													
	CO		CO+1-1N		CO+1-2N		CO+1-3N		CO+1-1NT		CO+1-2NT		CO+1-3NT	
	CS	PS	CS	PS	CS	PS	CS	PS	CS	PS	CS	PS	CS	PS
Cemento (kg)	0.041	0.231	0.041	0.231	0.041	0.231	0.041	0.231	0.041	0.231	0.041	0.231	0.041	0.231
Arena (kg)	0.081	0.452	0.081	0.452	0.081	0.452	0.081	0.452	0.081	0.452	0.081	0.452	0.081	0.452
Grava (kg)	0.127	0.711	0.127	0.711	0.127	0.711	0.127	0.711	0.127	0.711	0.127	0.711	0.127	0.711
Agua (l)	0.019	0.105		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mucílago de Nopal (l)	-	-	0.019	0.105	0.019	0.105	0.019	0.105	0.019	0.105	0.019	0.105	0.019	0.105

Las muestras se diseñaron con una cobertura de concreto de 30 mm entre el borde de las barras y los lados del cubo. Por lo tanto, las probetas tenían 7 cm de ancho, 10 cm de largo y 10 cm de alto, y el área expuesta de las barras de acero en contacto con el concreto fue de 18 cm², como se ve en la Figura 2. Cada barra de acero estaba recubierta con cinta adhesiva en la interfaz mortero-aire según lo describen otros autores (González et. al., 2004; Caré y Raharinaivo, 2007; Poursae, 2010).

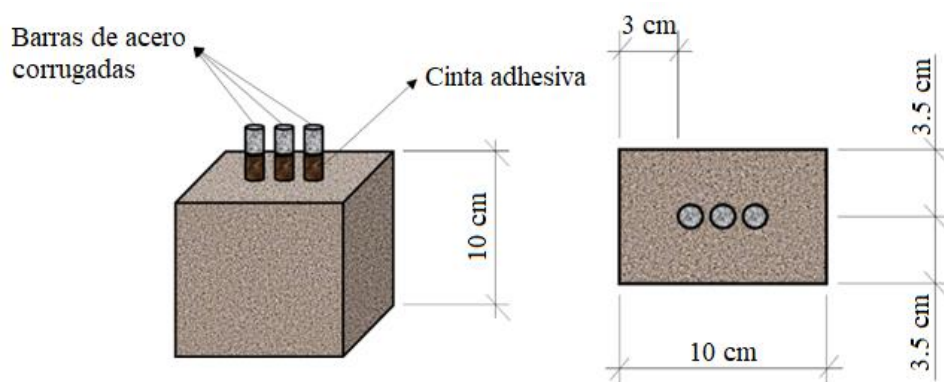


Figura 2. Dimensiones de las muestras de concreto.

La preparación de las mezclas se realizó a temperatura ambiente dentro del laboratorio. Una vez que se mezclaron todos los elementos sólidos, se añadió el mucílago Nopal según la concentración obtenida. Solo se agregó agua a la muestra control, en el resto el agua fue reemplazada por el mucílago de Nopal. A las 24 horas de fabricación, las probetas se colocaron en agua durante 28 días, tiempo durante el cual se realizó el curado del concreto. Después, permanecieron parcialmente sumergidos durante el resto del período de prueba en una solución de cloruro de sodio al 3%, simulando un entorno marino. La distancia entre el borde superior de las muestras y la solución se mantuvo alrededor de 2 cm.

Las primeras pruebas electroquímicas se iniciaron después de 24 horas de mezclar los materiales y durante los siguientes 270 días. Todas las pruebas se realizaron manteniendo las muestras en la solución de curado al principio y luego en la solución de cloruro de sodio. Las técnicas utilizadas para analizar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo fueron las siguientes: Potencial a Circuito Abierto, Ruido Electroquímico y Resistencia a la Polarización Lineal.

La Tabla 2 muestra la nomenclatura utilizada para identificar cada muestra con las diferentes concentraciones de mucílago Nopal, así como la muestra control.

Tabla 2. Identificación de las muestras.

Muestras	Relación por peso Nopal-Agua	Método de extracción	Nomenclatura
1	----	Sin mucílago de Nopal (CO)	CO
2	1:1	Maceración a temperatura ambiente (N)	CO+1-1N
3	1:2	Maceración a temperatura ambiente (N)	CO+1-2N
4	1:3	Maceración a temperatura ambiente (N)	CO+1-3N
5	1:1	Maceración aplicando temperatura (NT)	CO+1-1NT
6	1:2	Maceración aplicando temperatura (NT)	CO+1-2NT
7	1:3	Maceración aplicando temperatura (NT)	CO+1-3NT

2.3 Técnica de resistencia a la compresión.

La técnica de resistencia a la compresión es una de las herramientas más utilizadas en el análisis de las propiedades mecánicas del concreto. Se diseñaron tres muestras de concreto para cada concentración de mucílago Nopal, incluidas las muestras sin mucílago. La prueba de resistencia a la compresión se realizó a los 28 días del proceso de curado de todas las muestras, mientras permanecían húmedas. Las muestras cilíndricas se diseñaron a partir de tubos de PVC con una relación altura /diámetro igual a 2, con las siguientes dimensiones: 4.3 cm de diámetro y 8.6 cm de altura. Los especímenes fueron escalados, teniendo en cuenta que en cada paso de este proyecto se aseguró garantizar el menor consumo de energía y materiales. Los parámetros se definieron de acuerdo con la norma ASTM C39 (Dúran-Herrera et. al., 2012; Rahmani et. al., 2013).

2.4 Parámetros de las técnicas electroquímicas.

2.4.1 Técnica de potencial a circuito abierto.

La técnica de potencial a circuito abierto es una de las herramientas más utilizadas para el análisis de estructuras de concreto reforzado (Morozov et. al., 2013). La medición del potencial a circuito abierto se realizó contra un Electrodo Saturado de Calomel (SCE). En este caso, se realizó una medición a los electrodos de acero de cada muestra. El valor final obtenido fue el promedio de las tres mediciones. La primera lectura se tomó 24 horas después de que se elaboraron las muestras, y se realizaron mediciones semanales durante un período de 270 días. Para esto, se utilizó un multímetro conectando una terminal al electrodo de trabajo y la otra al electrodo de referencia de calomel. Para medir el potencial a circuito abierto, el electrodo de referencia se colocó dentro de la solución de curado y la solución salina, lo más cerca posible de los electrodos de trabajo. Se tuvo en cuenta que la punta del electrodo de referencia de calomel estuviera separado del fondo del recipiente de la solución.

La Tabla 3 muestra los rangos de los valores de potencial de corrosión para las estructuras de concreto reforzado y los criterios de probabilidad de corrosión según la norma ASTM C876 (Morris et. al., 2002; Pérez-Quiroz et. al., 2008).

Tabla 3. Criterios de probabilidad de corrosión para el acero de refuerzo relacionados con la medición del Potencial a Circuito Abierto (OCP).

Valores de potencial a circuito abierto (OCP) (mV vs. SCE)	Criterio de probabilidad de corrosión
> -125	Probabilidad de corrosión del 10%.
-126 to -275	Riesgo de corrosión intermedio.
< -276	Probabilidad de corrosión del 90%.

2.4.2 Técnica de ruido electroquímico.

Los procesos de corrosión tales como: corrosión generalizada y localizada, agrietamiento por corrosión bajo tensión, así como fenómenos de pasivación, generan fluctuaciones espontáneas en el potencial de corrosión libre del electrodo (Gusmano et. al., 1997). Se utilizó un potencióstato ZRA automático de ACM Instruments para analizar el ruido electroquímico de todas las muestras. Las lecturas para cada prueba fueron de 1024 datos con una frecuencia de muestreo de un dato por segundo. Además, se utilizó el método estándar de análisis de tres electrodos nominalmente idénticos (Cottis, 2001).

Una de las ventajas más importantes que ofrece esta técnica electroquímica es que su aplicación no implica ninguna alteración artificial del sistema durante el tiempo de prueba (Legat et. al., 2004). Un parámetro ampliamente utilizado en el análisis de la señal de ruido electroquímico es la resistencia de ruido (R_n), definida como la relación entre la desviación estándar del ruido en potencial y en corriente, según la ecuación (Bing et. al., 2007):

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_i} \quad (1)$$

donde, σ_v es la desviación estándar del ruido en potencial y σ_i es la desviación estándar del ruido en corriente. Se realizó una eliminación lineal de la tendencia de las series de tiempo de potencial y corriente. Algunos autores han analizado la relación existente entre la resistencia de ruido (R_n) y la resistencia a la polarización (R_p), concluyendo que pueden considerarse equivalentes para muchos sistemas (Aballe et. al., 2001; Girija et. al., 2007).

2.4.3 Técnica de resistencia a la polarización lineal.

La técnica de resistencia a la polarización lineal es una herramienta muy versátil que se usa con frecuencia para los estudios electroquímicos del acero de refuerzo incrustado en concreto (Andrade et. al., 2001). Una de sus principales ventajas es que permite determinar la cinética del proceso corrosivo. De acuerdo con otros estudios, se aplicó una señal de voltaje en el rango de ± 20 mV sobre el potencial de corrosión (E_{corr}), y se registró una señal de corriente como respuesta (Poursaee, 2010). Para la medición de la resistencia a la polarización lineal se aplicó una velocidad de barrido de 10 mV/mín. Además, el electrodo de referencia y el contra-electrodo de grafito se colocaron dentro de la solución de curado y la solución salina. Ambos electrodos se colocaron uno al lado del otro y lo más cerca posible de los electrodos de trabajo. La resistencia a la polarización puede determinarse mediante la expresión (2), establecida como la pendiente de la curva de polarización alrededor del potencial de corrosión, E_{corr} (Andrade y Alonso, 1996; Morris et al., 2002):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2)$$

donde, R_p es la resistencia a la polarización en (Ω), ΔI es el cambio en la corriente en (A) y ΔE es el cambio en el potencial en (V) (Poursaee, 2010). Según la ecuación (3) propuesta por Stern-Geary, es posible determinar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo a través de una constante de proporcionalidad B. Esta ecuación establece que la densidad de corriente I_{corr} es inversamente proporcional a la R_p (Hansson, 1984; Morris et al., 2002):

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

Los rangos de los valores de la velocidad de corrosión, en términos de la vida útil del acero de refuerzo en el concreto se muestran en la Tabla 4 (Andrade y Alonso, 1996).

Tabla 4. Intervalos de velocidad de corrosión relacionados con el grado de corrosión del acero en el concreto en términos de vida útil.

Corriente de corrosión $I_{corr}(\mu A/cm^2)$	CR (mm/y)	Condición de las barras de refuerzo
$I_{corr} < 0.1$	< 0.001	Despreciable.
$I_{corr} 0.1 - 0.5$	$0.001-0.005$	Corrosión de baja a moderada.
$I_{corr} 0.5 - 1.0$	$0.005-0.010$	Corrosión de moderada a elevada.
$I_{corr} > 1.0$	> 0.010	Corrosión elevada.

A partir de los valores de I_{corr} , se determinó la eficiencia del mucílago de Nopal como inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto, de acuerdo con la siguiente ecuación (Díaz-Cardenas et al., 2017):

$$I.E. (\%) = \left[\frac{I_{corr} - I'_{corr}}{I_{corr}} \right] * 100 \tag{4}$$

donde: I.E. es la eficiencia del inhibidor, I_{corr} es la densidad de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$) sin inhibidor e I'_{corr} es la densidad de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$) con inhibidor.

3. RESULTADOS Y DISCUSION.

3.1 Resistencia a la compresión.

La Tabla 5 muestra los valores promedios de la resistencia a la compresión después de 28 días de curado del concreto.

Tabla 5. Valores promedio de resistencia a la compresión después de 28 días.

Muestras	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
CO	248.9
CO+1-1N	223.5
CO+1-2N	234.9
CO+1-3N	246.5
CO+1-1NT	225.8
CO+1-2NT	234.6
CO+1-3NT	244.1

Como se puede apreciar, no hay diferencias significativas en los valores de resistencia a la compresión, independientemente del método de extracción del mucílago Nopal. Por otro lado, como se puede observar después de 28 días, todas las muestras con mucílago de Nopal mantienen valores de resistencia a la compresión más bajos que la muestra control. Esto se debe al hecho, de que el mucílago de Nopal atrapa el agua, por lo que disminuye la velocidad de hidratación del cemento a edades tempranas, debido a que la parte hidrofílica de los polímeros presentes en el mucílago fijan las moléculas de agua en la mezcla fresca (Knapen y Van Gemert, 2009). Para las muestras con una concentración 1-3 de mucílago de Nopal, hubo una disminución en la resistencia entre 2.4 y 4.8 kg/cm², sin embargo, para la concentración de mucílago de concentración 1-1, la disminución en la resistencia a la compresión se mantuvo entre 23.3 y 25.4 kg/cm² respecto a las muestras control. Algunos autores describen una tendencia similar y muestran que la presencia de polisacáridos en la solución de mucílago son las principales causas de este comportamiento (Chandra et. al., 1998). También se conoce que el mucílago de Nopal como aditivo natural en el

concreto puede retrasar el fraguado del cemento (Peschard et. al., 2004). Sin embargo, de acuerdo con Chandra et. al. (Chandra et. al., 1998) a largo plazo, el mucílago de Nopal favorece el aumento de la resistencia a la compresión, superando los valores de la muestra control.

3.2 Potencial a circuito abierto.

Los valores de potencial de corrosión para todas las muestras con mucílago Nopal se detallan en la Figura 3.

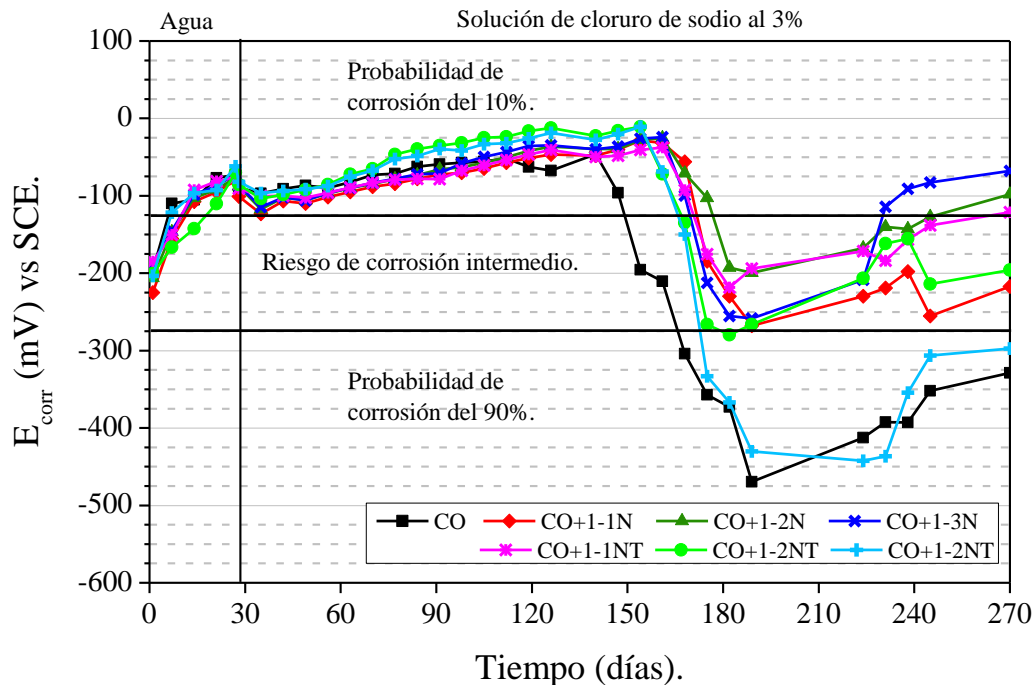


Figura 3. Comportamiento de los valores de potencial de corrosión (E_{corr}) en el tiempo.

Durante el proceso de curado del concreto, está claro que el potencial de todas las muestras adquiere valores más nobles, entre -90 y -50 mV. Estos valores permanecen en el rango de un de una probabilidad de corrosión del 10% (Pérez-Quiroz et. al., 2008). La alta alcalinidad, así como la presencia de humedad y oxígeno en la red de poros del concreto, son factores que influyen en estos valores de potencial. Bajo estas condiciones, el acero desarrolla una capa pasiva de óxidos, compacta e impermeable (Hansson, 1984). Todas las muestras con mucílago de Nopal presentan una caída en los valores y alcanzan el rango con un riesgo de corrosión intermedio. Posiblemente, debido a la presencia de iones cloruros en la superficie del acero, se produce corrosión localizada y, en consecuencia, la ruptura de la capa pasiva (Caré y Raharinaivo, 2007). Con el avance del período de exposición, las condiciones ideales del concreto parecen mantenerse y los valores de potencial se recuperan gradualmente, acercándose a valores de potencial más nobles, entre -210 y -60 mV, a diferencia de la muestra control que alcanza valores cercanos a -500 mV con una probabilidad de corrosión del 90%. La muestra de CO+1-3N mostró el mejor comportamiento con valores de potencial más nobles, alrededor de -60 mV a los 270 días de prueba. Varios factores influyen en el comportamiento de las muestras con mucílago de Nopal. El gel de cactus actúa como un aditivo retardante del fraguado del cemento (Zhang et. al., 2019). Además, es capaz de retener la humedad durante un período más largo, porque los polisacáridos tienen un carácter de retención de agua y disminuyen la velocidad de secado del concreto (Chandra et. al., 1998). Por lo tanto, se reduce el proceso de micro-agrietamiento del concreto, un fenómeno que ocurre especialmente en climas cálidos (Zhang et. al., 2019).

3.3 Ruido electroquímico.

Como ejemplo, las siguientes series de tiempo muestran las fluctuaciones de corriente de las muestras con mucílago de Nopal obtenidas por maceración a temperatura ambiente, ver Figuras 4 y 5.

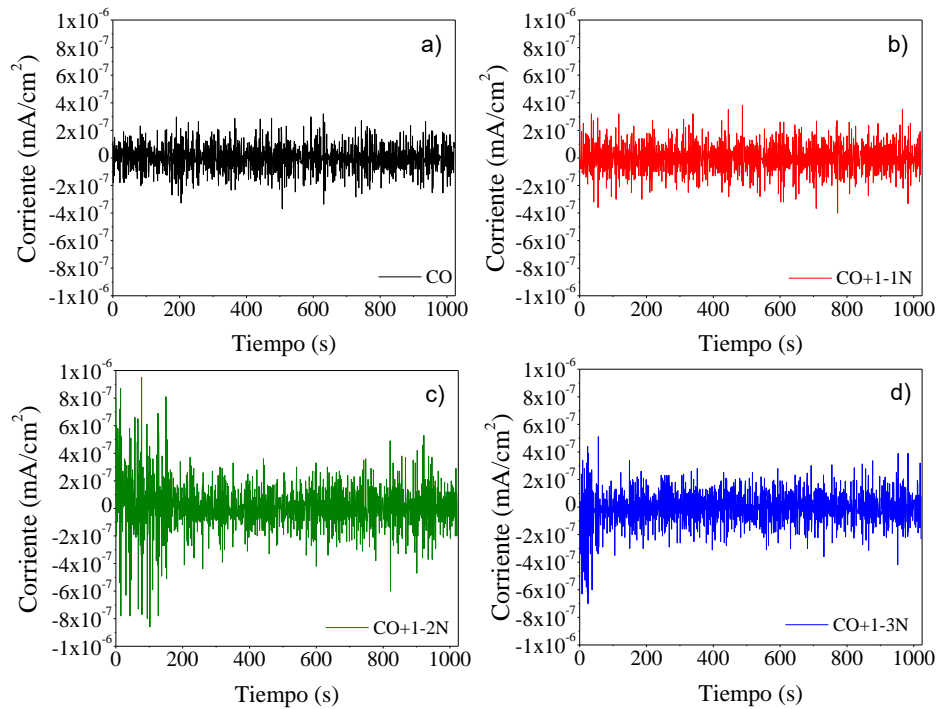


Figura 4. Series de tiempo de corriente a los 28 días de curado del concreto para las siguientes muestras: a) CO, b) CO+1-1N, c) CO+1-2N y d) CO+1-3N.

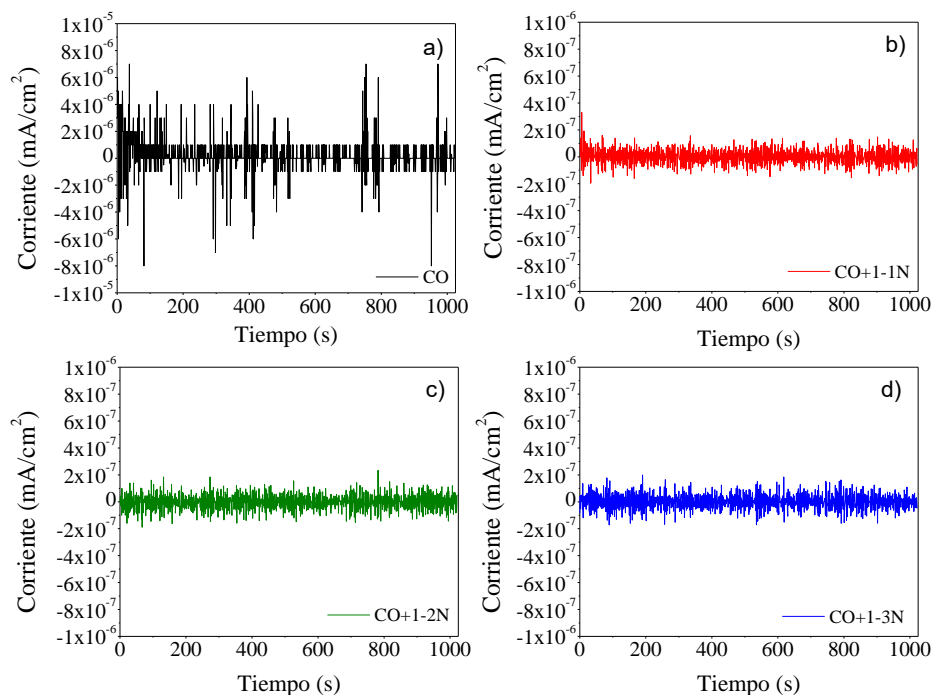


Figura 5. Series de tiempo de corriente a los 161 días de prueba del concreto para las siguientes muestras: a) CO, b) CO+1-1N, c) CO+1-2N y d) CO+1-3N.

Después de 28 días de curado del concreto, todas las series de tiempo de corriente muestran un comportamiento similar con fluctuaciones que alcanzan valores de hasta 2×10^{-7} mA/cm². Estos pequeños valores de corriente son un indicativo de un estado de pasivación del acero de refuerzo. La capa pasiva del acero evoluciona con el tiempo (Hansson, 1984) y a través de esta técnica se pueden detectar estos pequeños cambios en los valores de corriente (Gusmano et al., 1997; Cottis, 2001). Solo la muestra CO+1-3N presenta algunos transitorios con valores de hasta 8×10^{-7} mA/cm². Con el avance del tiempo de exposición al medio agresivo, se puede ver un cambio significativo en el comportamiento de las series de tiempo para la muestra CO. En general, se observa un cambio en los valores de las series de tiempo de corriente de hasta un orden de magnitud, con algunos transitorios que alcanzan valores de hasta 8×10^{-6} mA/cm². Este comportamiento puede estar asociado a la presencia de iones cloruro en la superficie del acero, que causan la ruptura de la capa de óxido (Hansson, 1984). Por otro lado, las muestras con mucílago de Nopal para el día 161 muestran una disminución en los valores de corriente y no se observan cambios abruptos. Esto es una indicación de que se mantiene la pasivación del acero, así como las condiciones para que permanezca en ese estado.

La Figura 6 muestra los valores de resistencia de ruido, determinados a partir de los valores de desviación estándar de voltaje y corriente de las series de tiempo analizadas.

Al comienzo de las pruebas, se observa un aumento progresivo de R_n . Estos resultados muestran que el mucílago de cactus no afecta negativamente el proceso de curado del concreto y garantiza las condiciones para que el acero de refuerzo desarrolle una película pasiva. Después de 150 días de prueba, la muestra control presenta una caída en los valores de R_n cercanos a 2×10^4 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, con fluctuaciones significativas en sus valores. Este comportamiento indica que el inicio de la corrosión consiste en una serie de eventos severos localizados (Legat et. al., 2004).

Al final del período de prueba, todas las muestras con Nopal mantienen valores superiores a 1×10^5 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, a excepción de la muestra CO+1-3NT, que mantuvo un comportamiento ligeramente superior con respecto a la muestra control. Por el contrario, la muestra CO+1-3N alcanzó valores superiores a 4×10^5 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ mejorando significativamente las propiedades electroquímicas del concreto reforzado. Esta respuesta evidencia parte de las ventajas que ofrece este gel de Nopal, ya que no solo actúa como un retardador del fraguado del concreto, sino también como un aditivo que puede mejorar la respuesta electroquímica del acero de refuerzo, retrasar el inicio y la propagación activa de la corrosión (Martinez-Molina et. al., 2015).

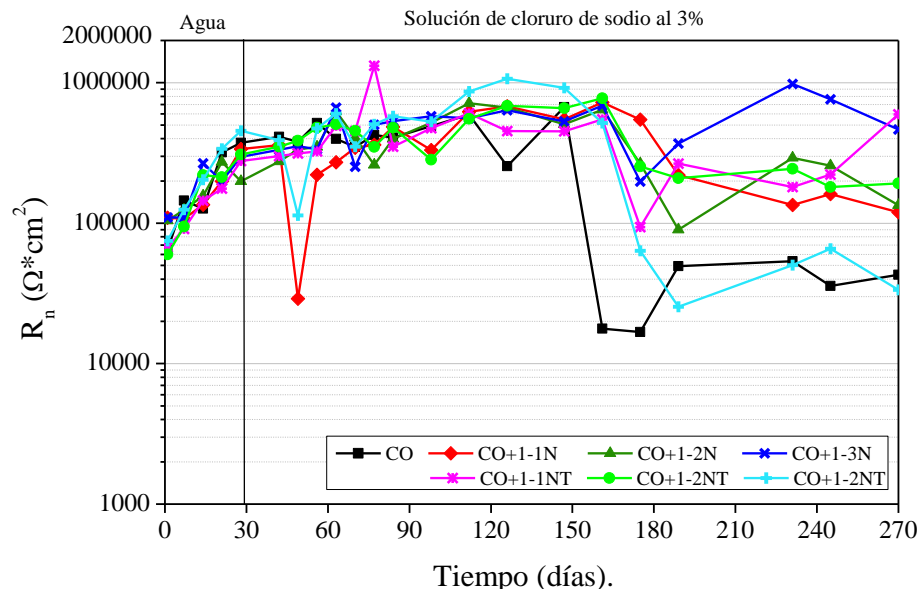


Figura 6. Comportamiento de los valores de resistencia al ruido (R_n) en el tiempo.

3.4 Resistencia a la polarización lineal.

En la Figura 7 se pueden observar los valores de R_p obtenidos de la técnica de resistencia a la polarización lineal.

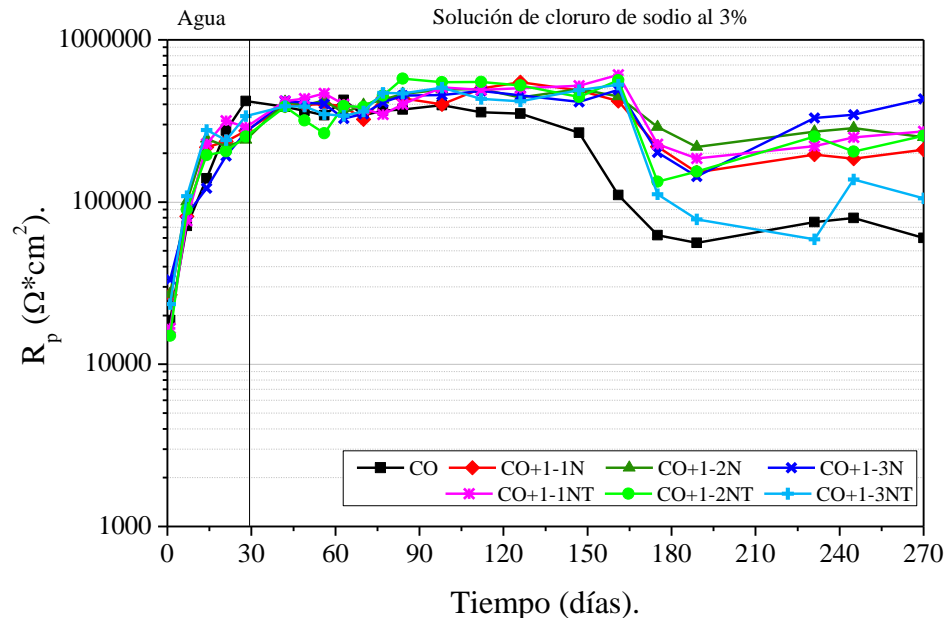


Figura 7. Comportamiento de los valores de resistencia a la polarización (R_p) en el tiempo.

En general, se puede observar que estos resultados muestran una tendencia similar a los valores de resistencia de ruido. El buen desempeño del mucílago Nopal dentro de la matriz de concreto es evidente, porque a pesar de presentar una caída en los valores de R_p después de 150 días de exposición al ambiente agresivo, la resistencia de todas las muestras aumenta progresivamente al final del período de prueba.

Una propiedad muy importante que influye en el comportamiento descrito por las muestras con mucílago de Nopal es su alta viscosidad, un parámetro que mejora la trabajabilidad de la mezcla y la homogeneidad del concreto (Knapen y Van Gemert, 2009; León-Martínez et. al., 2014). Algunos estudios afirman que ciertos polímeros naturales (polisacáridos) presentes en el mucílago Nopal, reaccionan con los compuestos de cemento formando complejos que reducen la porosidad del concreto, principalmente porque son compuestos más pequeños (Chandra et. al., 1998; Ramírez-Arellanes et. al., 2012).

Se realizó una correlación lineal a partir de los resultados R_n y R_p de todas las muestras, como se muestra en la Figura 8.

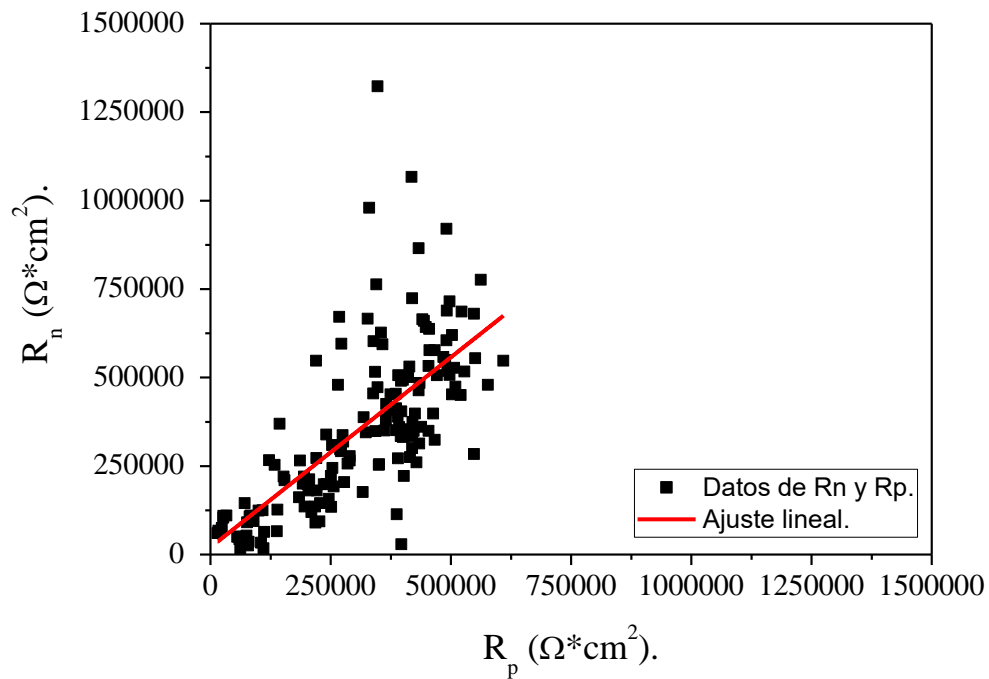


Figura 8. Correlación entre los valores R_n y R_p de todas las muestras.

A partir de este análisis se obtuvo un coeficiente de correlación con un valor de 0.695. Este valor indica una correlación razonable entre los resultados de ambas técnicas electroquímicas (Kearns et al., 1996), teniendo en cuenta que un valor de cero indica que no hay correlación y un valor de uno indica una muy buena correlación. Estos resultados confirman que ambas técnicas son equivalentes y adecuadas para el estudio electroquímico del acero de refuerzo en el concreto. De hecho, muchos estudios sobre el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo, en particular con el uso de estas técnicas han sido reportados en la literatura (Andrade et. Al., 2004; Legat et. al., 2004; Bing et. al., 2007; Poursaee, 2010).

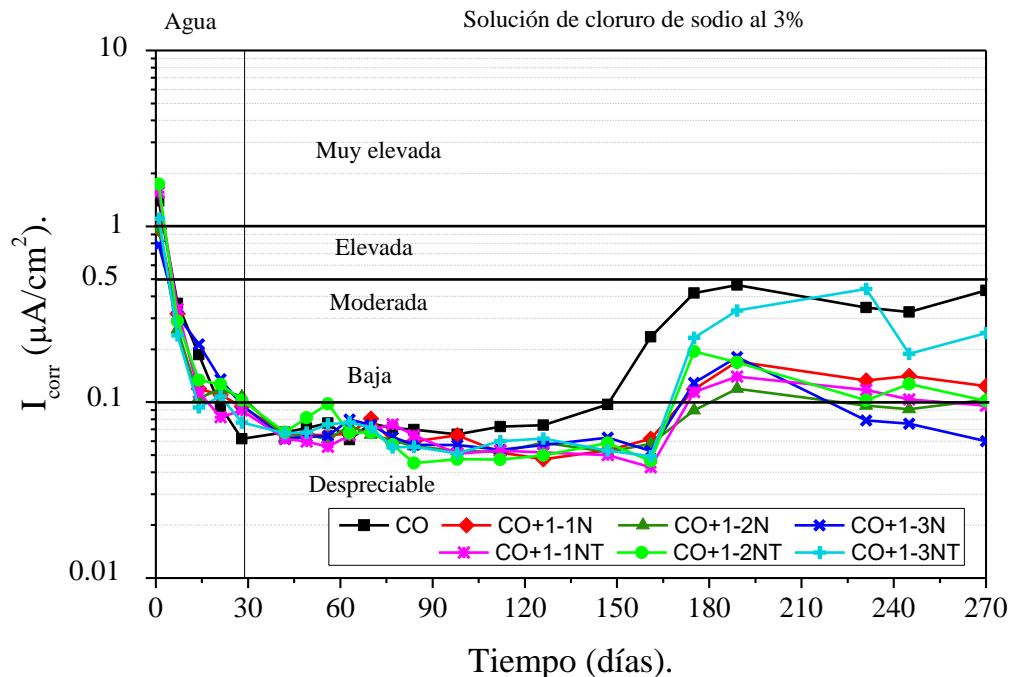


Figura 9. Comportamiento de los valores de la velocidad de corrosión (I_{corr}) en el tiempo.

La velocidad de corrosión es inversamente proporcional a los valores de resistencia a la polarización lineal a partir de los cuales se determinó la I_{corr} para todas las muestras (Andrade y Buják, 2013). Según algunas investigaciones, el factor de proporcionalidad (constante B) varía de 13 a 52 mV. En este estudio sobre el análisis de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en concreto, se aplicó un valor de $B = 26$ mV (Andrade et. al., 2004). Todos los valores de velocidad de corrosión en términos de densidad de corriente se muestran en la Figura 9.

Durante el proceso de curado del concreto, se puede observar una rápida disminución de la I_{corr} hasta alcanzar valores por debajo de $0.1 \mu A/cm^2$ en el rango de velocidad de corrosión insignificante (Andrade y Alonso, 1996). A estos valores, el acero posiblemente ya desarrolló un estado de pasividad debido a la presencia de oxígeno, humedad y un medio altamente alcalino (Hansson, 1984). Con el avance del tiempo de exposición al medio agresivo, todas las muestras con mucílago mantienen valores de I_{corr} muy bajos. Este comportamiento, como lo afirman otros estudios, posiblemente se deba al hecho de que este aditivo natural es capaz de reducir el coeficiente de difusión de cloruros, causado por un aumento en la viscosidad de la solución de los poros del concreto (Ramírez-Arellanes et al., 2012).

Al final del período de prueba, las muestras con mucílago de Nopal mantuvieron valores de velocidad de corrosión entre 0.1 y $0.2 \mu A/cm^2$, excepto para la muestra CO+1-3N, que mantuvo valores inferiores a $0.08 \mu A/cm^2$ en el rango de velocidad de corrosión insignificante (Andrade y Alonso, 1996). Esto indica que el mucílago de Nopal no solo mejora las propiedades electroquímicas del acero, sino que también, en presencia de cloruros puede mantener el acero de refuerzo protegido durante más tiempo (Martinez-Molina et al., 2015). Por el contrario, la muestra control se mantiene en el rango de velocidad de corrosión moderada.

La Tabla 6 muestra los valores de densidad de corriente de corrosión y las eficiencias del mucílago de Nopal alcanzadas al final del período de prueba. Como se puede ver, la eficiencia más alta del inhibidor fue del 86% para la muestra CO+1-3N, con una concentración 1-3 de mucílago Nopal extraído por maceración a temperatura ambiente durante 48 horas.

Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos después de 270 días de prueba.

Muestras	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	I.E (%)
CO	0,432	-
CO+1-1N	0,124	71
CO+1-2N	0,103	76
CO+1-3N	0,060	86
CO+1-1NT	0,095	78
CO+1-2NT	0,102	77
CO+1-3NT	0,247	43

4. CONCLUSIONES.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo el estudio de las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo en concreto con la adición de mucílago Nopal. Se realizó un análisis a partir de tres concentraciones de mucílago obtenidas por dos métodos de extracción. El efecto favorable de este aditivo natural se apreció en el retraso del inicio de la corrosión y protección el acero de refuerzo.

Las conclusiones son las siguientes:

Para las muestras con la concentración 1-3 de mucílago de Nopal, se lograron los valores más altos de resistencia a la compresión, teniendo en cuenta que este aditivo natural actúa como un retardante del fraguado del concreto.

A partir del potencial a circuito abierto, se apreció el efecto favorable del mucílago de Nopal como un aditivo que puede retrasar la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. La muestra CO+1-3N alcanzó valores de potencial más nobles al final del período de prueba, siendo la mezcla más favorable.

Durante el proceso de curado del concreto, todas las muestras exhibieron un comportamiento similar y se observó un rápido aumento en los valores de resistencia de ruido (R_n) y resistencia a la polarización (R_p). Se puede afirmar que el mucílago de Nopal dentro de la matriz de concreto mantiene las condiciones ideales para que el acero adquiriera un estado de pasivación.

Todas las muestras con mucílago Nopal mostraron los valores más altos de R_n y R_p con respecto a la muestra control durante un período más largo. Se obtuvo un coeficiente de correlación razonable entre ambos resultados electroquímicos de R_n y R_p , con un valor de 0.695.

El mucílago Nopal fue capaz de retrasar el inicio de la corrosión en el concreto y mantener una velocidad de corrosión entre, insignificante y baja hasta el final del período de prueba.

La mezcla CO+1-3N presentó el mejor comportamiento electroquímico, con una eficiencia del 86% para la concentración de mucílago Nopal de 1-3, obtenida por maceración a las 48 horas sin cocción a 95° Celsius.

5. AGRADECIMIENTOS.

CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México).

6. REFERENCIAS.

- Aballe, A., Bautista, A., Bertocci, U. and Huet, F. (2001), ‘*Measurement of the noise resistance for corrosion applications*’, Corrosion. 57(1):35–42. doi: <https://doi.org/10.5006/1.3290327>
- Andrade, C., Keddani, M., Nóvoa, X. R., Pérez, M. C., Rangel, C. M. and Takenouti, H. (2001), ‘*Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry*’, Electrochimica Acta. 46: 3905–3912. doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(01\)00678-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00678-8)
- Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland Ø., Salta, M., Raharinaivo, A. and Elsener, B. (2004), ‘*Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*’, Materials and Structures/Materiaux et Constructions. 37(273):623–643. doi: <https://doi.org/10.1617/13952>
- Andrade, C. and Alonso, C. (1996), ‘*Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*’, Construction and Building Materials. 10(5):315–328. doi: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, C. and Buják, R. (2013), ‘*Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion*’, Cement and Concrete Research. 53:59–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.004>
- Bing, Z., Jian-Hua L., Rong-Gang H., Rong-Gui D. and Chang-Jian L. (2007), ‘*Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in cement mortar by electrochemical noise measurements*’, Electrochimica Acta. 52(12):3976–3984. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.11.015>
- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I. and Goycoolea, F. M. (1997), ‘*Rheology and Aggregation of Cactus (Opuntia ficus-indica) Mucilage in Solution*’, Journal of the Professional Association for Cactus Development. 2:152–159.
- Caré, S. and Raharinaivo, A. (2007), ‘*Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel*’, Cement and Concrete Research. 37(12):1598–1612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.022>

- Chandra, S., Eklund, L. and Villarreal, R. R. (1998), '*USE OF CACTUS IN MORTARS AND CONCRETE.*', Cement and Concrete Research. 28(1):41-51.
- Cottis, R. A. (2001), '*Interpretation of Electrochemical Noise Data*', Corrosion. 57(3):265–285.
- Díaz-Cardenas, M. Y. Valladares-Cisneros, M. G., Lagunas-Rivera, S., Salinas-Bravo, V. M., Lopez-Sesenes, R. and Gonzalez-Rodríguez, J. G. (2017) '*Peumus boldus extract as corrosion inhibitor for carbon steel in 0.5 M sulfuric acid*', Green Chemistry Letters and Reviews, 10(4): 257–268. doi: <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1369167>
- Dúran-Herrera, A., De-León, R., Juárez, C. A. and Valdez, P. (2012), '*Mucilago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable*', ANAIS DO 54o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012 – 54CBC, (Brazil), pp. 1-18.
- Girija, S., Kamachi Mudali, U., Khatak, H. S. and B. Raj, (2007), '*The application of electrochemical noise resistance to evaluate the corrosion resistance of AISI type 304 SS in nitric acid*', Corrosion Science. 49:4051–4068. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.04.007>
- González, J. A., Miranda, J. M. and Feliu, S. (2004), '*Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete*', Corrosion Science. 46:2467–2485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.02.003>
- Gusmano, G., Montesperelli, G., Pacetti, S., Petitti, A. and D'Amico, A. (1997), '*Electrochemical Noise Resistance as a Tool for Corrosion Rate Prediction*', Corrosion. 53(11):860–868. doi: <https://doi.org/10.5006/1.3290271>
- Hansson, C. M. (1984), '*Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete*', Cement and Concrete Research. 14(4):574–584. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90135-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90135-2)
- Kearns, J. R., Scully, J. R., Roberge, P. R., Reichert, D. L. and Dawson, J. L. (1996), *STP 1277. Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications*, ASTM International. Edited by J. Kearns et al. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959. doi: <https://doi.org/10.1520/STP1277-EB>
- Knapen, E. and Van Gemert, D. (2009), '*Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers*', Cement and Concrete Research. 39:6–13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>
- Legat, A., Leban, M. and Bajt, Ž. (2004), '*Corrosion processes of steel in concrete characterized by means of electrochemical noise*', Electrochimica Acta. 49:2741–2751. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.036>
- León-Martínez, F. M., Rodríguez-Ramírez, J., Medina-Torres, L. L., Méndez Lagunas, L. L. and Bernad-Bernad, M. J. (2011), '*Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (Opuntia ficus-indica)*', Carbohydrate Polymers. 84:439–445. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.004>
- León-Martínez, F. M., Cano-Barrita, P. F. de J., Lagunez-Rivera, L. and Medina-Torres, L. (2014), '*Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials*', Construction and Building Materials. 53:190–202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068>
- León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L. and Rodríguez-Ramírez, J. (2010), '*Spray drying of nopal mucilage (Opuntia ficus-indica): Effects on powder properties and characterization*', Carbohydrate Polymers. 81(4):864–870. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.061>
- Martinez-Molina, W., Torres-Acosta, A., Hernández-Leos, R., Alonso-Guzman, E., Mendoza-Pérez, I. and Martínez-Peña, I. (2015), '*The inhibitive properties of Nopal slime on the corrosion of steel in chloride-contaminated mortar*', Anti-Corrosion Methods and Materials. 63(1):65–71. doi: <https://doi.org/10.1108/acmm-05-2014-1381>

- Morozov, Y., Castela, A. S., Dias, A. P. S. and Montemor, M. F. (2013), '*Chloride-induced corrosion behavior of reinforcing steel in spent fluid cracking catalyst modified mortars*', Cement and Concrete Research. 47:1–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.011>
- Morris, W., Vico, A., Vazquez, M. and De Sanchez, S. R. (2002), '*Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements*', Corrosion Science. 44(1):81–99. doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00033-6)
- Pech-Canul, M. A. and Castro, P. (2002), '*Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere*', Cement and Concrete Research. 32(3):491–498. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00713-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00713-X)
- Pérez-Quiroz, J.T., Terán, J., Herrera, M.J., Martínez, M. and Genescá, J. (2008), '*Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation*', Journal of Constructional Steel Research. 64:1317–1324. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.024>
- Peschard, A., Govin, A., Grosseau, P., Guilhot, B. and Guyonnet, R. (2004), '*Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages*', Cement and Concrete Research. 34:2153–2158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.001>
- Poursae, A. (2010), '*Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern-Geary constant of reinforcing steel in concrete*', Cement and Concrete Research. 40(9):1451–1458. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.04.006>
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H A, Allahyari, H. and Nikbin, I. M. (2013), '*On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles*', Construction and Building Materials. 47:1302–1308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. de J., Julián-Caballero, F. and Gómez-Yañez, C. (2012), '*Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*', Materiales de Construcción. 62(307):327–341. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211>
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. and Matsuhira, B. (2004), '*Opuntia spp mucilage's: A functional component with industrial perspectives*', Journal of Arid Environments. 57:275–290. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)
- Torres-Acosta, A. A. (2007), '*Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media*', Journal of Applied Electrochemistry. 37(7):835–841. doi: <https://doi.org/10.1007/s10800-007-9319-z>
- Torres-Acosta, A. A. and Martínez-Madrid, M. (2005), '*Mortar improvements from Opuntia Ficus Indica (Nopal) and Aloe Vera Additions*', Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction. IAC-NOCMAT, Rio de Janeiro (Brazil), pp. 655-664.
- Valipour, M., Shekarchi, M. and Ghods, P. (2014), '*Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments*', Cement and Concrete Composites. 48:98–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.001>
- Zhang, H., Feng, P., Li, L. and Wang, W. (2019), '*Effects of starch-type polysaccharide on cement hydration and its mechanism*', Thermochemica Acta. 678:1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178307>