

## Efecto de la Viscosidad del Mucílago de Nopal y Extracto de Algas en la Corrosión del Acero de Refuerzo

Effect of the Viscosity of Nopal Mucilage and Brown Algae Extract on the Corrosion of Reinforcing Steel

<https://doi.org/10.62407/rciya.v3i3.157>



Recibido: julio 2023

Aceptado: septiembre 2023

Eddisson Francisco Hernández<sup>1</sup>

Email: [eddisson.hernandez@uamv.edu.ni](mailto:eddisson.hernandez@uamv.edu.ni)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9602-5805>

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita<sup>2</sup>

Email: [pcano@ipn.mx](mailto:pcano@ipn.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-283X>

Andrés Antonio Torres Acosta<sup>3</sup>

Email: [atorresa@tec.mx](mailto:atorresa@tec.mx)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0058-9903>

### Resumen

Este trabajo presenta los resultados del efecto de la viscosidad del mucílago de nopal y extracto de algas pardas en el proceso de corrosión del acero de refuerzo. Se prepararon seis soluciones de aditivos naturales y comerciales a diferentes concentraciones. Se elaboraron pastas de cemento conteniendo adiciones orgánicas con relación a/c de 0.60. Se fabricaron prismas de concreto conteniendo varillas de acero, los cuales fueron sometidos a contaminación con NaCl (3.5%). Se realizaron mediciones reológicas a soluciones orgánicas preparadas y de poro extraídas de pastas de cemento endurecidas. Se realizaron mediciones de potenciales de media celda y resistencia a la polarización lineal a diferentes edades. Los resultados muestran que la viscosidad de las soluciones incrementa con la concentración de los aditivos. Los resultados de las mediciones electroquímicas indican que las adiciones orgánicas incrementan la velocidad de corrosión del acero en comparación con los aditivos comerciales, debido a su efecto retardante sobre el proceso de hidratación del cemento y por la concentración de NaCl utilizada.

### Palabras clave:

Viscosidad, Mucílago de nopal, Extracto de algas pardas, Corrosión, Acero de refuerzo

### Abstract

This paper presents the results of the effect of the viscosity of nopal mucilage and brown algae extract on the corrosion process of reinforcing steel. Six solutions of natural and commercial additives were prepared at different concentrations. Cement pastes containing organic additions were made with a water-to-cement ratio of 0.60. Concrete prisms containing steel rebar were fabricated and subjected to contamination with NaCl (3.5%). Rheological measurements were taken of the prepared organic solutions and pore solutions extracted from hardened cement pastes. Half-cell potential and linear polarization resistance measurements were performed at different ages. The results show that the viscosity of the solutions increases with the concentration of the additives. The electrochemical measurement results indicate that the organic additions increase the corrosion rate of the steel compared to the commercial additives, due to their retarding effect on the cement hydration process and the concentration of NaCl used.

<sup>1</sup> Doctor Instituto Politécnico Nacional de México. Ingeniero civil y arquitecto por la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua.

<sup>2</sup> Doctor Universidad de New Brunswick, Canadá. Ingeniero civil por el Instituto Tecnológico de Oaxaca.

<sup>3</sup> Doctor University of South Florida. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Yucatán.

**Keywords:** Viscosity, Nopal mucilage, Brown algae extract, Corrosion, Reinforcing steel.

## 1. Introducción

El problema del deterioro prematuro de estructuras de concreto reforzado, hace necesario realizar estudios acerca de las prácticas actuales de construcción que permitan entender y controlar las causas que afectan su durabilidad (Mehta, & Burrows, 2001). La corrosión del acero de refuerzo es una de ellas y ocurre principalmente por la presencia de iones cloruro y la carbonatación del concreto, que destruyen la capa de óxido que lo protege (Sideris & Savva, 2005). Una vez iniciada la corrosión, su propagación sucede rápidamente; y cuando el daño es severo, se producen pérdidas de área que reducen la capacidad estructural del acero. Además, genera agrietamientos dentro del concreto como resultado de los productos de corrosión, los cuales son de dos a cuatro veces de mayor tamaño de volumen del acero original (Rosenberg et al., 1989).

Para prevenir la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto, se emplean inhibidores de corrosión, recubrimientos epóxicos, protección catódica y adiciones puzolánicas. Aunque con ellos se logra un buen desempeño, su implementación resulta costosa y en algunos casos, no son amigables con el medioambiente por ser altamente tóxicos (Wu et al, 1998). Como una alternativa a los métodos anteriores, se propone el uso de aditivos de origen orgánico, los cuales, según estudios, mejoran el desempeño del concreto contra la penetración de iones cloruro y la carbonatación.

El mucílago de nopal y extracto de algas mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (Hernández et al., 2016). En pastas de cemento mejoran sus propiedades reológicas (Leon-Martínez et al., 2014), y en estudios de corrosión con soluciones de poro sintéticas, reducen la velocidad de corrosión del acero de refuerzo contaminado con NaCl (Hernández et al., 2017).

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la viscosidad de las soluciones orgánicas preparadas y de poro extraídas, en el proceso de corrosión del acero de refuerzo en un ambiente contaminado con NaCl.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Extracción de soluciones orgánicas

Mucílago de nopal: la extracción consistió en mezclar en un recipiente rebanadas de nopal y agua destilada en proporción 1:1.5 (p/p) a temperatura controlada no mayor de 60 °C por tres horas y agitación constante. El mucílago de nopal empleado fue la solución resultante del filtrado progresivo a través de los tamices No. 16 (1.18 mm), No. 100 (150 µm) y No. 200 (75 µm).

Extracto de algas pardas: se empleó una solución de algas pardas (*Macrocytis Pyrifera*) para preparar disoluciones a diferentes concentraciones. La solución concentrada inicial fue diluida con agua destilada a una relación 1:1 (v/v) y se agitó de manera constante hasta obtener una dispersión homogénea. Esta solución se sometió a un baño térmico a temperatura controlada de 40 °C durante cinco minutos para reducir su viscosidad y facilitar el filtrado. Los tamices empleados durante el proceso de filtrado fueron los No. 30 (0.59 mm), No. 50 (300 µm) y No. 100 (150 µm).

### 2.2. Extracción de solución de poro de pastas de cemento endurecidas

Para la extracción de la solución de poro de pastas de cemento endurecidas se construyó un dispositivo (Fig. 1), el cual consiste en un cuerpo integrado de un cilindro de acero, una placa base y un pistón. El pistón transfiere la presión de la prensa hidráulica al espécimen dentro del cilindro. La presión se aplicó de manera gradual, empleando una prensa hidráulica ELVEC con capacidad de 120 toneladas. El tamaño de los especímenes de cemento utilizado fue de 75 mm de diámetro x 45 mm de altura. La solución de poro obtenida se almacenó herméticamente en viales de vidrio de 10 ml para evitar la reacción con el



Fig. 1. Dispositivo para la extracción de solución de poro

dióxido de carbono del ambiente.

### 2.3. Caracterización reológica de soluciones conteniendo adiciones orgánicas

Se realizaron pruebas reológicas de soluciones de mucílago de nopal y extracto de algas pardas, con concentraciones de 0.50 y 1.538, empleando un reómetro de esfuerzos controlados Anton Paar modelo Physica MCR 301. Se usó un cilindro concéntrico de doble brecha (modelo DG26.7-SN21085) y un sistema Peltier (C-PTD200). Las soluciones se caracterizaron considerando su viscosidad  $\eta$  de cizalla constante, usando un flujo con velocidad de corte desde 0.01 a 600  $s^{-1}$ . El análisis de los datos fue realizado utilizando el software Rheoplus/32 versión 3.0. Los datos fueron ajustados al modelo Herschel-Bulkey (Chhabra & Richardson, 2008), alcanzando un coeficiente de determinación mayor a 0.98.

Las soluciones de poro extraídas se obtuvieron de pastas de cemento con relación a/c de 0.60 a los siete días de edad, conteniendo mucílago de nopal, extracto de algas pardas y un agente modificador de viscosidad (AMV), a dos concentraciones (0.50% y 1.538%, p/v). Para las mediciones se empleó una geometría de cono-plato (CP50-1) y sistema Peltier (C-PTD200). Para la caracterización de la viscosidad  $\eta$  de cizalla constante, se empleó un flujo con velocidad de corte desde 1 a 1000  $s^{-1}$ . Los datos fueron ajustados con el modelo de Ostwald de Waele (ley de la potencia), empleando como valor de la viscosidad el valor de la siguiente ecuación:

$$\tau = k (\dot{\gamma})^m \quad (1)$$

donde

$\tau$  = esfuerzo de corte (Pa)

$k$  = Índice de consistencia (o viscosidad aparente a 1  $s^{-1}$ )

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte ( $s^{-1}$ )

$m$  = índice de comportamiento al flujo

### 2.4. Efecto inhibitor de corrosión de aditivos orgánicos en varillas de acero embebidas en concreto

Se elaboraron prismas de concreto con relación a/c de 0.60, conteniendo mucílago de nopal (1.38%), extracto de algas pardas (3%), nitrito de calcio (20  $L/m^3$ ), un aditivo inhibitor de corrosión orgánico (8  $L/m^3$ ) y un sellador de poros de concreto (3% peso del cemento). Se empleó cemento CPO 30 RS, arena de río con módulo de finura de 2.67 y grava de sello de 3/8" como agregado grueso. Se emplearon barras de acero de 9.5 mm de diámetro. Las dimensiones de los prismas fueron de 50 mm x 100 mm x 200 mm (Fig. 2).

El electrodo de referencia empleado fue de titanio/óxido de titanio (Ti/TiO) de 3.2 mm de diámetro y 25 mm de longitud. Cada mezcla se hizo por triplicado. El total de prismas fue de 18, y fueron curados en húmedo durante 28 días empleando un rociador para humectar la superficie cubierta con franela húmeda. Posteriormente, fueron almacenados a temperatura ambiente hasta los 40 días de edad para dar inicio al proceso de corrosión por cloruros. Los ciclos de humedad y secado se realizaron colocando las probetas en recipientes con agua conteniendo 3.50% de NaCl (p/p) por siete días y otros 14 días de secado bajo condiciones ambientales. Las lecturas de potenciales de corrosión se tomaron diariamente. Las mediciones de resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ), se tomaron antes de iniciar y al finalizar los ciclos de humedad y secado. Para las mediciones de  $R_p$  se utilizó

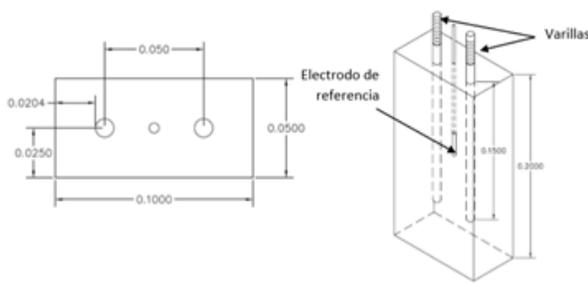


Fig. 2. Prisma de concreto con varillas de acero embebidas y electrodo de referencia de Ti/TiO. Dimensiones en metros.



Fig. 3. Prismas de concreto sometidos a ciclos de humedad y secado

como contra electrodo una varilla de acero y como electrodo de referencia el electrodo Ti/TiO.

Para las mediciones de potencial de corrosión se utilizó un Voltímetro DC con 200 mΩ de impedancia. Todas las mediciones fueron realizadas vs un electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sup>4</sup>). El equipo empleado para hacer las mediciones de Rp aparente, fue un potenciostato Gamry Instruments, Inc. Reference 600. El potencial impreso fue variable de circuito de potencial abierto en la dirección catódica, con una cantidad de 20mV

y velocidad de escaneo de 0.05 mV s<sup>-1</sup>. Los valores de Rp fueron estimados de la pendiente de la curva.

### 3. Resultados

En la Fig. 4 se observa que el índice de consistencia incrementa con la concentración de los aditivos. El agente modificador de viscosidad comercial (AMV), fue el que presentó los valores más altos. La viscosidad del extracto de algas pardas fue 20 veces mayor al valor

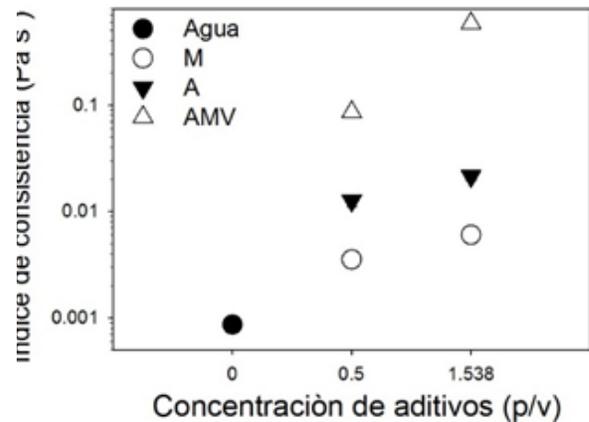


Fig. 4. Índice de consistencia vs concentración de las soluciones con aditivos

de la viscosidad del agua, mientras que la del mucílago de nopal fue de siete veces.

En la Fig. 5 se muestra el índice de consistencia de las soluciones de poro extraídas de pastas de cemento con relación a/c de 0.60. En la figura se observa que el valor del índice de consistencia del control fue similar al del agua. En las soluciones de poro de pastas con 0.50% de concentración de aditivos, la que contenía AMV comercial fue la que presentó el mayor índice de consistencia (35 % mayor al agua). Sin embargo, con la mayor concentración, no se observan cambios importantes. En las soluciones de poro conteniendo adiciones orgánicas con la mayor concentración, la viscosidad fue mayor con respecto a la del agua (ocho veces conteniendo mucílago de nopal y cuatro veces conteniendo extracto de algas pardas). Estos resultados sugieren que la

viscosidad de la solución de poro de materiales base cemento conteniendo adiciones orgánicas, pueden reducir el coeficiente de difusión de iones al interior del material. Lo cual, es congruente con la reducción en la difusión de iones cloruros en concretos observada en algunos estudios (Hernández et al., 2016; Ramírez-Arellanes et al., 2012). Bentz et al., (2008), plantean que es posible incrementar la vida de servicio de estructuras de concreto al incrementar la viscosidad de la solución de poro, utilizando aditivos modificadores de viscosidad. La ecuación Stokes-Einstein, establece que existe una relación inversa entre el coeficiente de difusión y la viscosidad de la solución (Bentz et al., 2009). Por lo tanto, cuando se duplica la viscosidad de la solución de poro, es posible reducir a la mitad el coeficiente de difusión. Si consideramos los valores de viscosidad de las soluciones de poro obtenidos en este trabajo, de acuerdo con Stokes-Einstein, es posible reducir hasta en ocho veces el coeficiente de difusión de iones con soluciones conteniendo mucílago

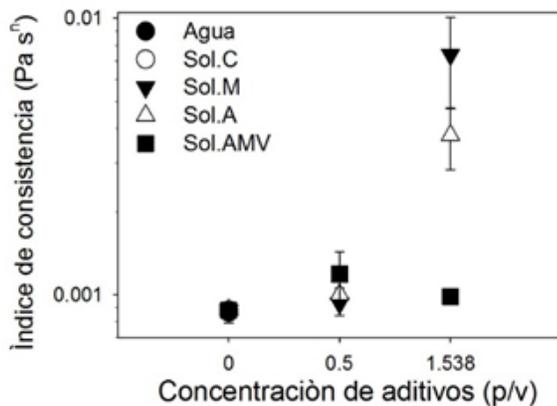


Fig. 5. Índice de consistencia vs concentración de solución de poros extraída (7 días)

de nopal, y en cuatro veces conteniendo extracto de algas pardas, ambas a 1.538% de concentración.

En la Fig. 6 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones Rp de las varillas de acero embebidas en los prismas de concreto. Se observa que antes de iniciar los ciclos de H-S, el valor Rp en todas las mezclas presenta valores superiores al del límite de corrosión. Sin

embargo, en el quinto ciclo de H-S, únicamente las varillas embebidas en concreto con nitrato de calcio y con aditivo sellador de poro WT, los valores Rp fueron superiores al límite de corrosión. Aunque en estos resultados se observa que la adición del mucílago de nopal y extracto de algas pardas no presentan un buen desempeño contra la corrosión del acero de refuerzo, no se puede descartar los buenos obtenidos en trabajos anteriores (Hernández et al., 2017). Una posible explicación a este fenómeno es el efecto retardante de estos aditivos sobre el proceso de hidratación del cemento, que impide una buena formación de su microestructura. La posible estructura porosa mejor interconectada de estos concretos en comparación con el resto de mezclas, permite difundir mejor los iones Cl<sup>-</sup> a su interior, y acelera el proceso de corrosión del acero de refuerzo. Otro factor determinante, es la concentración

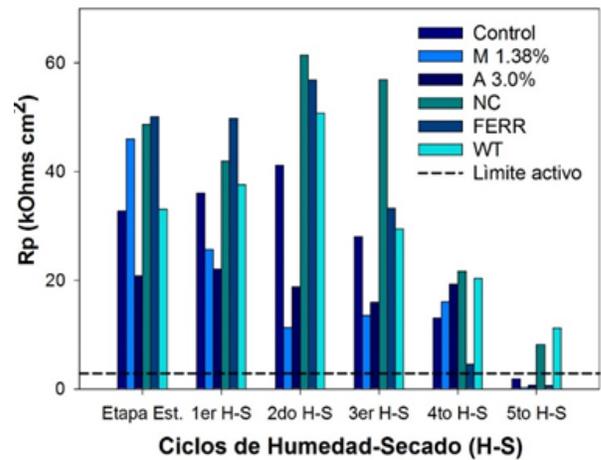


Fig. 6. Resistencia a la polarización lineal promedio

de NaCl agregada durante los ciclos de H-S (3.50%), la cual excede la concentración de polímero en la solución (1.38% p/v).

#### 4 Conclusiones

Los resultados reológicos de las soluciones de poro preparadas indican que la viscosidad incrementa con la concentración de los aditivos. En las soluciones de poro extraída de pastas de cemento conteniendo aditivos a 0.50%

de concentración, la viscosidad incrementó ligeramente en comparación con el control (agua). En pastas con 1.538% de aditivos, la viscosidad de la solución de poro conteniendo adiciones orgánicas fue mayor en comparación con las que contenían AMV y el control. A pesar de estos resultados, los valores de Rp de las varillas de acero embebidas en concreto conteniendo adiciones orgánicas, después del último ciclo de H-S, indican que las adiciones no tuvieron un buen desempeño contra la corrosión del acero de refuerzo. En futuras investigaciones es necesario realizar pruebas electroquímicas en probetas conteniendo adiciones orgánicas a edades tardías (120 días) y contaminadas a diferentes concentraciones de NaCl.

### Agradecimiento

Eddisson Hernández agradece al Dr. Prisciliano Cano por su apoyo y contribuciones para el desarrollo de su investigación.

### 5. Bibliografía

- Bentz, D.P., Peltz, M.A., Snyder, K.A. & Davis, J.M. (2009) VERDiCT: viscosity enhancers reducing diffusion in concrete technology. *Concrete International*, (31) 1, pp.31-36. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=56290>
- Bentz, D.P., Snyder, K.A., Cass, L.C. & Peltz, M.A. (2008) Doubling the service life of concrete structures. I: Reducing ion mobility using nanoscale viscosity modifiers. *Cement and concrete composites*, vol. 30(8), pp.674-678. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.001>
- Chhabra, R.P. & Richardson, J.F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology*. 2th Ed. Butterworth Heinemann.
- Hernández, E. F., Cano-Barrita, P. F. de J., & Torres-Acosta, A. A. (2016). Influence of cactus mucilage and marine brown algae extract on the compressive strength and durability of concrete. *Materiales de Construcción*, Vol. 66 (321).
- Hernández, E. F., Cano-Barrita, P. F. de J., León-Martínez, F. M., & Torres-Acosta, A. A. (2017) Performance of cactus mucilage and brown seaweed extract as a steel corrosion inhibitor in chloride contaminated alkaline media. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 64 (5), pp.529-539.
- Leon-Martinez, F., Cano-Barrita, P.F.J., Lagunez-Rivera, L. & 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 (2), pp.190–202.
- Mehta, P. K., & Burrows, R. W. (2001). Building durable structures in the 21st century. *The Indian Concrete Journal*. [https://www.researchgate.net/publication/286732918\\_Building\\_durable\\_structures\\_in\\_the\\_21st\\_century](https://www.researchgate.net/publication/286732918_Building_durable_structures_in_the_21st_century)
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P.F. de J., Julián-Caballero, F. & Gómez-Yáñez, C. (2012) Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. *Materiales de Construcción*, vol. 62 (307), pp.327-341. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4240712>
- Rosenberg, A. M., Hansson, C. M., & Andrade, C. (1989). *Mechanisms of corrosion of steel in concrete*. En J. P. Skalny (Ed.), *Materials science of concrete I* (pp. 285–313). The American Ceramic Society.
- Sideris, K. K., & Savva, A. E. (2005). Durability of mixture containing calcium nitrite based corrosion inhibitor. *Cement & Concrete Composites*, 27(3), 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.016>
- Wu, X., Chou, N., Lupher, D. & Davis, L.C. (1998) Benzotriazoles: Toxicity and Degradation. [Actas de la Conferencia de 1998 sobre Investigación de Residuos Peligrosos] pp. 374-382. <https://engg.k-state.edu/hsrc/98Proceed/32Wu/32wu.pdf>