

Diseño de un material cementicio con mucílago de nopal y agregados de PET para mejorar las propiedades electroquímicas del concreto reforzado.

E. C. Menchaca-Campos¹ , Y. Díaz-Blanco^{2*} , C. I. Rocabrundo-Valdes¹ ,
Y. Tamayo-Aguilar³ , A. Flores-Nicolas⁴ , J. Uruchurtu-Chavarín¹ 

*Autor de Contacto: yohadiaz12@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1012>

Recibido: 11/01/2026 | Correcciones recibidas: 05/04/2026 | Aceptado: 07/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

RESUMEN

Este trabajo se centró en el estudio del concreto reforzado (RC) con la adición de mucílago de nopal (NM) y polietileno tereftalato (PET). Se prepararon muestras con diferentes geometrías de PET: partículas (P), mezcla de fibras largas y partículas (LF-P), y fibras cortas (SF) combinadas con NM. Las muestras se evaluaron mediante potencial de media-celda (HCP), ruido electroquímico (EN) y resistencia a la polarización lineal (LPR). Los valores de resistencia a la compresión (f_c) disminuyeron con la adición de PET. Las muestras con PET y NM obtuvieron valores más bajos de velocidad de corrosión (I_{corr}). El diseño de PET y el almacenamiento de NM pueden ser un desafío de analizar. Ambos materiales aportaron propiedades que aumentaron la durabilidad del RC.

Palabras clave: hormigón reforzado, PET, mucilaje de nopal, corrosión, técnicas electroquímicas.

Citar como: Menchaca-Campos, E. C., Díaz-Blanco, Y., Rocabrundo-Valdes, C. I., Tamayo-Aguilar, Y., Flores-Nicolas, A., Uruchurtu-Chavarín, J. (2026), “Diseño de un material cementicio con mucílago de nopal y agregados de PET para mejorar las propiedades electroquímicas del concreto reforzado.”, Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 202 – 222, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1012>.

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62210.

² Posdoc. SECIHTI. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62210.

³ Posdoc. SECIHTI. Posgrado en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62210.

⁴ Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana, 3917, Playitas, 22860, Ensenada, B.C. México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, la idea original de la investigación fue de Y. Díaz-Blanco Yohandry (30%), C. Menchaca-Campos (40%) y J. Uruchurtu-Chavarín (40%). La administración del proyecto supervisó a C. Menchaca-Campos (60%) y J. Uruchurtu-Chavarín (40%). La metodología y experimentación supervisaron a Y. Díaz-Blanco (50%), C. I. Rocabrundo-Valdés (30%), C. Menchaca-Campos (10%) y J. Uruchurtu-Chavarín (10%). El procesamiento de datos fue realizado por Y. Díaz-Blanco (40%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), Y. Tamayo-Aguilar (20%), A. Flores-Nicolas (20%). La redacción, revisión y edición supervisaron a Y. Díaz-Blanco (20%), C. Menchaca-Campos (20%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), Y. Tamayo-Aguilar (15%), A. Flores-Nicolas (15%), J. Uruchurtu-Chavarín (10%). El análisis y la discusión de los resultados fueron realizados por Y. Díaz-Blanco (30%), C. Menchaca-Campos (20%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), A. Flores-Nicolas (10%), J. Uruchurtu-Chavarín (20%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Design of a cementitious material with nopal mucilage and PET aggregates to improve the electrochemical properties of reinforced concrete.

ABSTRACT

This work focused on the study of reinforced concrete (RC) with the addition of nopal mucilage (NM) and (polyethylene terephthalate) PET aggregates. Samples were prepared with different PET geometries: particles (P), a mixture of long fibers and particles (LF-P), and short fibers (SF) combined with NM. Samples were evaluated using half-cell potential (HCP), electrochemical noise (EN), and linear polarization resistance (LPR). A decrease in compressive strength (f_c) values was observed with increasing PET percentage. Samples with PET and NM achieved lower values of corrosion rate (I_{corr}). PET design and storing the NM can be a challenge to analyze. Both materials contributed to increased the durability of RC.

Keywords: reinforcing concrete, PET, nopal mucilage, corrosion, electrochemical techniques.

Projeto de um material cimentício com mucilagem nopal e agregados PET para melhorar as propriedades eletroquímicas do concreto armado.

RESUMO

Este trabalho teve como foco o estudo do concreto armado (RC) com adição de mucilagem de nopal (NM) e agregados de tereftalato de polietileno (PET). Foram preparadas amostras com diferentes geometrias de PET: partículas (P), mistura de fibras longas e partículas (LF-P) e fibras curtas (SF), combinadas com NM. As amostras foram avaliadas por meio de potencial de meia-célula (HCP), ruído eletroquímico (EN) e resistência à polarização linear (LPR). Os valores de resistência à compressão (f_c) diminuíram com a adição de PET. As amostras com PET e NM apresentaram menores valores de velocidade de corrosão (I_{corr}). A configuração geométrica do PET e o armazenamento da NM podem representar desafios analíticos. Ambos os materiais contribuíram para aumentar a durabilidade do concreto armado.

Palavras-chave: concreto armado, PET, mucilagem de nopal, corrosão, técnicas eletroquímicas.

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2026.

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. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

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

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

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Diseño de un material cementicio con mucilago de nopal y agregados de PET para mejorar las propiedades electroquímicas del concreto reforzado.

NOMENCLATURA

Término	Abreviatura
Concreto reforzado	RC.
Mucílago de nopal	NM.
Polietilén tereftalato	PET.
Partículas	P.
Fibras largas y partículas	LF-P.
Fibras cortas	SF.
Potencial de media celda	HCP.
Ruido electroquímico	EN.
Resistencia a la polarización lineal	LPR.
Resistencia a la compresión	f_c .
Velocidad de corrosión	I_{corr} .
Acero de refuerzo	RS.
Inhibidores de corrosión	CI.
Resistencia a la polarización	R_p .
Acero de refuerzo del concreto	CRS.
Potencial de corrosión	E_{corr} .
Resistencia de ruido electroquímico	R_n .

1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, la durabilidad del concreto es una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en el diseño de estructuras de concreto reforzado. La durabilidad del concreto depende de diversos factores internos y externos, tales como: i) la calidad de los materiales utilizados en la mezcla, el tipo de refuerzo y la relación agua/cemento; así como ii) las condiciones de exposición a las que estarán sometidas las estructuras durante su vida útil (Valipour, Shekarchi y Ghods, 2014). Dentro de la matriz de concreto, el acero de refuerzo (RS) es capaz de desarrollar una capa pasiva de óxido férrico (barrera electroquímica) (Ben Harb et al., 2020), que lo mantiene protegido mientras se mantengan las condiciones de alta alcalinidad de la pasta de cemento y no haya agentes externos que puedan corroer la superficie del acero (Abdel-Gaber, Khamis, and Hefnawy 2011). Del mismo modo, el recubrimiento del concreto ofrece protección física al refuerzo frente al entorno circundante.

En entornos marinos, la corrosión inducida por cloruros es una de las principales causas de deterioro de las RS. En general, estos iones pueden penetrar en el hormigón desde el entorno y difundirse a través de la red de poros (Abd El Fattah et al., 2018), o bien pueden estar presentes en los materiales de la mezcla, como los áridos finos y gruesos (Saricimen et al., 2002). Una vez en el interior del hormigón, estos iones pueden llegar a la superficie metálica y provocar corrosión por picaduras (Abd El Fattah et al., 2018). En este sentido, numerosas investigaciones se han centrado en el estudio de la corrosión del concreto causada por los iones cloruro (Andrade, Alonso y Sarría, 2002).

Con el fin de prolongar la vida útil de las estructuras, diversos autores se han centrado en el estudio de la durabilidad del concreto reforzado (Gartner, Kosec y Legat, 2016; Pan et al., 2020). En la bibliografía se describen varios métodos para prevenir y contrarrestar la corrosión del RC, tales como: la protección catódica (Gartner et al., 2016), los recubrimientos (Lee et al., 2018), los inhibidores de corrosión añadidos a la mezcla (Ben Harb et al. 2020; Palanisamy et al. 2018; De Schutter and Luo 2004), los inhibidores de corrosión aplicados en superficie (Gartner et al., 2016;

Monticelli 2018), los materiales cementosos suplementarios (Pan et al., 2020) y los agregados poliméricos en las mezclas (Díaz-Blanco et al., 2019), entre otros.

De entre los métodos anteriormente descritos, el uso de inhibidores de la corrosión (CI) ha demostrado ser el más aceptado y utilizado debido a su bajo costo y fácil aplicación (Umoren et al., 2019). Algunos de estos inhibidores, como los compuestos a base de nitritos (Garcés et al., 2008; Okeniyi, Loto y Popoola, 2015) y los cromatos y dicromatos (Okeniyi, Loto y Popoola, 2015; Qian y Cusson, 2004), se clasifican como inhibidores inorgánicos y tienen un alto efecto inhibitor (Umoren et al., 2019). Sin embargo, presentan una desventaja significativa relacionada con su elevada toxicidad, lo que los convierte en productos perjudiciales para la salud humana (Raja, Ghoreishiamiri e Ismael, 2015).

Más reciente es el uso de inhibidores naturales añadidos al concreto para mitigar la corrosión provocada por los iones cloruro (Loto et al., 2013). Estos inhibidores están cobrando cada vez más importancia debido principalmente a su disponibilidad en la naturaleza, su bajo costo y porque son más amigables con el medioambiente (Ormellese et al., 2006).

En este sentido, el NM se presenta como una excelente alternativa para resolver el problema del deterioro de las estructuras de hormigón armado en entornos marinos y las patologías de corrosión en el RC, en la búsqueda de alternativas y nuevos materiales para la construcción.

Algunos autores han estudiado el efecto de los inhibidores sobre el comportamiento electroquímico del RS. (Palanisamy et. al., 2018) investigaron el extracto en polvo del fruto de *Ricinus communis* como CI en muestras de hormigón expuestas a una solución de NaCl al 3.5 %. Tras 120 días de exposición, los resultados mostraron un notable efecto inhibitor debido a la formación de una película pasiva sobre la superficie del acero. A partir de los parámetros electroquímicos del diagrama de Nyquist y de las curvas de polarización, obtuvieron una eficiencia del inhibidor del 87 % y del 79 %. Las muestras de concreto mostraron un aumento de la resistencia a la compresión a medida que se incrementaba la concentración del inhibidor. Pradipta et al. (Pradipta, Kong y Tan, 2019) compararon el efecto de un inhibidor natural procedente de un extracto de hoja de té verde con el de un inhibidor comercial de nitrito de calcio en función de la concentración y el volumen. Los resultados indicaron que, a la misma concentración de inhibidor, la CR era muy similar. No obstante, a igual volumen, se observó un aumento significativo de la CR en las muestras con inhibidor de nitrito de calcio, con valores superiores a 150 μm / año tras 12 ciclos de humectación-secado. Por el contrario, la CR de las muestras con el inhibidor del té verde se mantuvo en torno a los 40 μm / año. La resistencia a la polarización (R_p) fue superior para el inhibidor de té verde que para el inhibidor de nitrito de calcio a lo largo de todo el periodo de exposición.

Loto et al. (Loto et al., 2013) estudiaron el extracto de hoja de *vernonia amygdalina* como CI del acero dulce en RC. Se prepararon cuatro concentraciones del inhibidor (25 %, 50 %, 75 % y 100 %) en agua destilada. Los resultados mostraron una eficiencia del 90.08 % para la muestra de concreto con un 25 % de extracto de *vernonia amygdalina*. Los valores de potencial fueron más nobles (menos negativos) para la misma concentración del 25 % en comparación con el resto de las muestras. Los autores concluyen que el extracto de *vernonia amygdalina* es un buen CI del acero dulce en el concreto expuesto a una solución de cloruro de sodio al 3.5 %.

Se han utilizado otros extractos naturales de plantas como CI en el acero de refuerzo del concreto (CRS), tales como: la *morinda lucida* (Okeniyi, Loto e Idowu Popoola, 2015), el jengibre (Liu et al., 2019), el *rhizophora mangle L* (Okeniyi, Loto y Popoola, 2015), las hojas de olivo (Ben Harb et al., 2020), la *prosopis juliflora* (Palanisamy et al. 2016), la harina de gluten de maíz (Zhang, Ba y Wu 2019), gel de algas (Xu et al., 2015), NM (Díaz Blanco et al. 2019; Martínez-Molina et al., 2016), entre otros.

Con el fin de mejorar la durabilidad del concreto y otras propiedades, a las mezclas se le han añadido numerosos materiales de diferentes tamaños, porcentajes y geometrías. Este es el caso de algunos residuos sintéticos, especialmente el PET procedente de botellas de bebidas posconsumo (Foti, 2019).

Debido a sus diversas propiedades, se ha estudiado el uso potencial del PET en una matriz de concreto, principalmente para modificar sus propiedades mecánicas, entre otras. Por otra parte, el estudio de la patología de la corrosión del RC con PET, especialmente en entornos marinos, es más reciente y podría convertirse en una excelente alternativa para resolver este problema.

En los últimos años, el problema de la contaminación ambiental ha sido objeto de gran interés en estudios, por lo que el reciclaje de algunos polímeros para su uso posterior en el concreto ha cobrado cada vez más relevancia. El PET presenta varias propiedades que lo hacen muy atractivo como agregado en el concreto: resistencia al agua y a los productos químicos, resistencia al impacto, ligereza, estabilidad frente a las condiciones atmosféricas y capacidad de actuar como barrera para gases y líquidos, tal y como lo afirman otros autores (Díaz-Blanco et al., 2019; Siddique, Khatib y Kaur, 2008).

Numerosos autores han estudiado el efecto de diferentes geometrías de PET en las propiedades del concreto con dos aplicaciones principales: i) para mejorar las propiedades mecánicas y ii) para mejorar la durabilidad (Ongpeng et al., 2020). En este sentido, se han investigado las siguientes propiedades del concreto, tales como: la trabajabilidad de la mezcla (Alfahdawi et al., 2019; Rahmani et al., 2013; Sadrumontazi et al., 2015; Saikia y De Brito 2014), la resistencia a la compresión y a la flexión (Adnan y Dawood 2020; Alfahdawi et al., 2019; Borg, Baldacchino y Ferrara 2016; Rahmani et al., 2013), la porosidad (Alfahdawi et al., 2019; Sadrumontazi et al., 2015), la absorción de agua y resistencia eléctrica (Sadrumontazi et al. 2015), la resistencia al agrietamiento (Adnan y Dawood 2020; Sadrumontazi et al., 2015), la penetración de cloruros (Won et al., 2010) y la resistencia a la corrosión (Díaz-Blanco et al., 2019). Muchos de estos estudios se centran en el uso de fibras de PET de unos pocos centímetros de longitud (Adnan y Dawood 2020; Alfahdawi et al., 2019; Borg et al., 2016; Thomas y Moosvi 2020; Won et al., 2010), de gránulos (Saikia y De Brito 2014) y partículas de unos pocos milímetros de ancho y largo (Adnan y Dawood 2020; Noroozi et al., 2019; Rahmani et al., 2013; Sadrumontazi et al., 2015; Saikia y De Brito 2014).

Saikia y Brito (Saikia y De Brito, 2014) investigaron el efecto de las partículas de PET reciclado sobre las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. En este estudio, los áridos gruesos y finos se sustituyeron en un 5 %, un 10 % y un 15 % por tres tipos de partículas de PET en una relación volumen/volumen. Los resultados indican una reducción del asentamiento de la mezcla con los agregados de PET de mayor y menor tamaño. Sin embargo, se observó una mejora de esta propiedad en la mezcla con agregados de PET modificados. La densidad y la resistencia a la compresión y a la flexión de todas las muestras con agregados de PET disminuyeron al aumentar su porcentaje. Sin embargo, los autores observaron una mejora en la resistencia a la abrasión al utilizar diferentes tipos de PET.

Won et al. (Won et al., 2010) analizaron el comportamiento de un compuesto de cemento reforzado con fibra de PET reciclado en términos de durabilidad frente a diferentes medios agresivos. Los resultados de permeabilidad al cloruro fueron muy similares entre las muestras del compuesto de cemento reforzado con fibra de PET reciclado y la muestra de control. Los valores más altos de resistencia a la compresión se mantuvieron en torno a los 28 MPa a los 30, 60, 90 y 120 días para las muestras expuestas a soluciones salinas y de cloruro de calcio. Por otro lado, la superficie de las fibras sufrió un mayor deterioro cuando el compuesto de cemento reforzado con fibra de PET reciclado se expuso al medio alcalino. El deterioro de las fibras fue intermedio en el ácido sulfúrico y bajo en las otras soluciones agresivas. Díaz-Blanco et al. (Díaz-Blanco et al., 2019) determinaron algunos parámetros electroquímicos del CRS con la incorporación de PET en forma de fibras y partículas rectangulares, con un porcentaje de sustitución del 3, 5 y 8 % respecto al volumen de la arena. En el caso del concreto con agregados de PET, se obtuvieron valores de potencial de corrosión (E_{corr}) más nobles (> -250 mV), en comparación con la muestra de control, que mantuvo valores más negativos (< -250 mV). Los valores de resistencia de ruido electroquímico (R_n) y R_p para las muestras con partículas rectangulares y la mezcla de fibras y partículas rectangulares de

PET fueron superiores a $2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mientras que las muestras con solo fibras mostraron un comportamiento ligeramente superior al de la muestra de control, con valores entre 4×10^4 y $1.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, respectivamente. Los autores concluyen que existe una relación entre la geometría, el tamaño y el porcentaje de PET y las propiedades electroquímicas de los CRS.

Silva et al. (Silva, de Brito y Saikia, 2013) estudiaron la influencia de las condiciones de curado del concreto con agregados de PET en sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Los autores utilizaron tres tipos de PET con dos porcentajes de sustitución (7.5 % y 15 %), de los áridos finos y gruesos. Las muestras expuestas a la cámara húmeda presentaron los valores más altos de resistencia a la compresión, aunque esta disminuyó al aumentar el porcentaje de PET. En general, el concreto con agregados plásticos mostró un mejor comportamiento frente a la contracción por secado, especialmente en entornos más húmedos. Por otro lado, el coeficiente de difusión de cloruro aumentó ligeramente al aumentar el porcentaje de PET, con valores entre $11.3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ y $16 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, frente a la muestra de control de $10.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de las muestras curadas en el entorno de laboratorio fueron superiores a los de las muestras curadas en el exterior y en la cámara húmeda.

Según la bibliografía, es posible mejorar la durabilidad del RC cuando se incorporan agregados de PET a la mezcla. Asimismo, se ha descrito que diversos inhibidores naturales pueden prevenir la corrosión del RS. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo de investigación es estudiar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Este proyecto se centra en el uso de NM como sustituto del agua de amasado y los agregados de PET como sustituto del árido fino. Para el estudio, se utilizaron dos elementos: mucílago, obtenido a partir de una proporción de nopal y agua de 1:3, y PET (con tres geometrías diferentes) con un porcentaje de sustitución del 3 % en relación con el volumen de la arena. El análisis se llevó a cabo mediante las técnicas, tales como: f^c, HCP, EN y LPR.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL.

2.1 Materiales.

En este trabajo se utilizó cemento Portland compuesto CPC-30R (tipo II según la norma ASTM C-150). El árido grueso, procedente de piedra triturada de origen local, tenía un tamaño máximo de 20 mm; como árido fino se utilizó arena de río y las barras de acero de grado 42 incrustadas en el concreto tenían un diámetro de 10 mm.

2.2 Diseño geométrico de PET reciclado.

El diseño de las diferentes geometrías de PET se basó en nuestros estudios previos (Díaz-Blanco et al., 2019). Se recogieron botellas de PET usadas y se limpiaron con agua para eliminar cualquier residuo de líquido, polvo o grasa. Una vez secos, se cortó el cuello y el fondo de las botellas. La parte central se cortó en tiras hasta obtener las partes SF, LF y P del PET reciclado. Para las SF, las dimensiones fueron de 2-3 mm de ancho por 15 mm de largo, las dimensiones de las LF fueron de 0.5-1 mm de ancho por 25 mm y en el caso de las P fueron de 3-4 mm de ancho y de largo. Todo el procedimiento se llevó a cabo de forma manual y sencilla.

2.3 Procedimiento de extracción del NM.

Para determinar la concentración de NM, tomamos como referencia estudios previos (Díaz Blanco et al., 2019). Se recolectaron hojas frescas de nopal y se les retiraron las espinas. A continuación, se lavaron para eliminar todo tipo de residuos o impurezas y se cortaron en trozos de 1 cm x 1 cm para finalmente colocarlas en un vaso de precipitado con agua en una proporción de 1:3. La extracción del NM se realizó mediante un proceso de maceración a temperatura ambiente en el laboratorio. Tras 48 horas, se filtró la solución para eliminar los residuos de nopal y utilizar el mucílago como sustituto del agua de amasado de las muestras de concreto.

Diseño de un material cementicio con mucílago de nopal y agregados de PET para mejorar las propiedades electroquímicas del concreto reforzado.

2.4 Diseño de las mezclas de concreto.

El diseño de la mezcla se ajustó a una resistencia de diseño de 250 kg/cm². Por lo tanto, el cemento, los áridos gruesos y finos y el agua se dosificaron para alcanzar esta resistencia. El agregado de PET se incorporó a las diferentes mezclas como sustituto parcial del árido fino, en una relación volumétrica arena-PET del 97 % - 3 %. El inhibidor se añadió como sustituto total del agua de amasado en todas las muestras que contenían las diferentes geometrías de PET. Para las muestras de control se utilizó una relación agua/cemento de 0.45. En el caso de las muestras con PET se utilizó una relación mucílago/cemento con el mismo valor.

2.5 Diseño de las muestras.

2.5.1 Probetas para ensayos de resistencia a la compresión.

Se diseñaron probetas cilíndricas a partir de tubos de PVC con las siguientes dimensiones: 4.3 cm de ancho y 8.6 cm de alto, con una relación altura/diámetro igual a 2, tal y como se muestra en la Figura 1. Se tuvieron en cuenta los requisitos de la norma ASTM C-39 (C-39 2014) y de la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE para cada geometría de PET y para la muestra de referencia.



Figura 1. Representación de las probetas cilíndricas.

2.5.2 Probetas para las pruebas electroquímicas.

Para las pruebas electroquímicas, el diseño de los bloques se realizó dejando un recubrimiento de concreto de 3 cm (distancia entre la cara de las barras de acero y el borde de las probetas). Las dimensiones de las probetas fueron las siguientes: 7 cm de ancho, 10 cm de alto y 10 cm de largo. En el concreto se incrustaron tres barras de acero de refuerzo con un área expuesta (área en contacto con la matriz de concreto) de 18 cm². Este es el método estándar para la técnica EN: el uso de tres electrodos nominalmente idénticos (Cottis 2001, 2008). La superficie de cada electrodo de trabajo en la interfaz concreto-atmósfera se cubrió con una cinta aislante. Tras 28 días de curado, se sumergieron parcialmente en una solución de cloruro de sodio al 3 % que simulaba un entorno marino, como el agua de mar. Se dejó una diferencia de 2 cm entre el nivel de la solución de cloruro de sodio y la parte superior de los bloques. La Figura 2 muestra una de las probetas preparadas para el estudio electroquímico.



Figura 2. Bloque de concreto con tres barras de acero de refuerzo.

El procedimiento para la preparación de todas las muestras cilíndricas y en forma de bloques fue muy similar, tal y como se describe en la Figura 3.

1. Se mezclaron todos los elementos sólidos, incluida la adición de PET.
2. Una vez que se incorporó el agua en las muestras de control y el inhibidor NM en las muestras con agregados de PET, se mezclaron todos los elementos con el fin de obtener una mezcla lo más homogénea posible. Todo el proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente.
3. Se utilizó aceite quemado para recubrir los moldes de las muestras y garantizar que durante el desmoldeo no se formaran fisuras ni grietas y que los bloques y cilindros de hormigón no se fragmentaran.
4. El vertido del material se realizó por capas, compactando cada una de ellas, hasta completar un total de dos capas por cada probeta.
5. En el caso de los bloques de concreto, el proceso de colocación de las barras, el vertido y la compactación del concreto se realizaron simultáneamente.
6. En el caso de las probetas cilíndricas, se garantizó su nivelación vertical y horizontal. La superficie superior de las probetas se aplanó, quedando lisa y libre de imperfecciones.
7. Transcurridas 24 horas, todas las muestras se colocaron en un recipiente con agua durante 28 días.

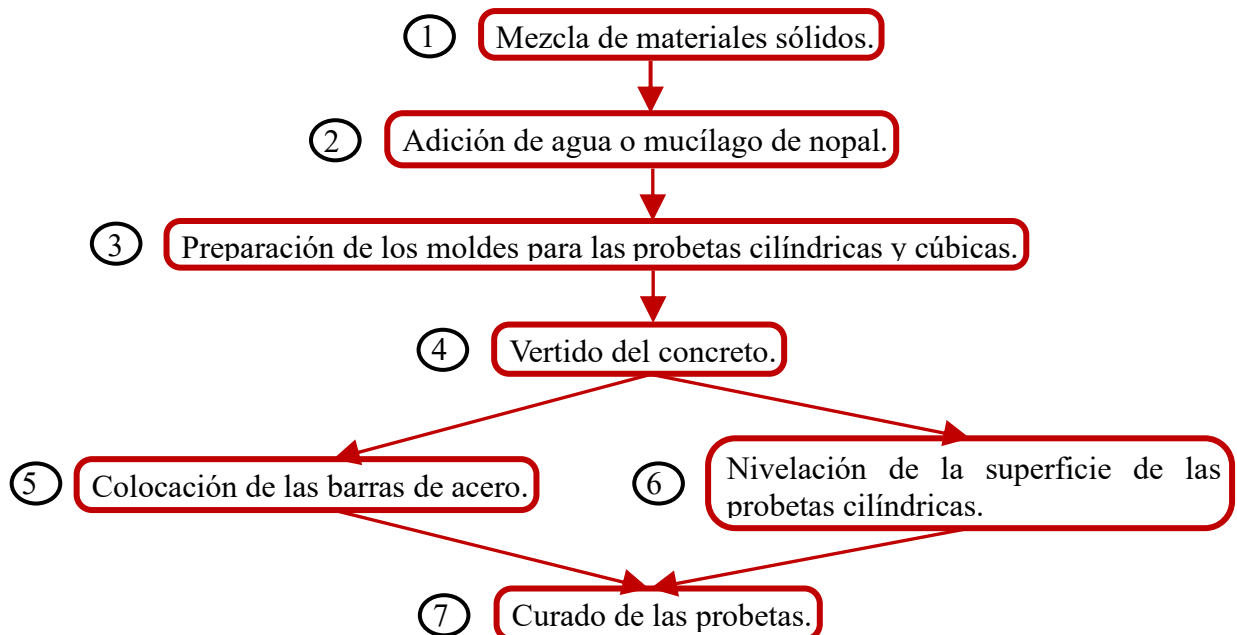


Figura 3. Procedimiento esquemático a seguir para la elaboración de las probetas de concreto.

La Tabla 1 describe las características y la nomenclatura de todas las muestras.

Table 1. Características de las muestras.

Muestras	Tipo de agregado (PET y NM)	Tipo de prueba	Nomenclatura
1	Sin agregados	Resistencia a la compresión	C-0
2	3% de P de PET y NM a una concentración de 1-3	Resistencia a la compresión	C-1
3	1.5 % de LF y 1.5% de P de PET, y NM a una concentración de 1-3	Resistencia a la compresión	C-2
4	3% de SF de PET y NM a una concentración de 1-3	Resistencia a la compresión	C-3
5	Sin agregados	Pruebas electroquímicas	E-0
6	3% de P de PET y NM a una concentración de 1-3	Pruebas electroquímicas	E-1
7	1.5 % de LF y 1.5% de P de PET, y NM a una concentración de 1-3	Pruebas electroquímicas	E-2
8	3% de SF de PET y NM a una concentración de 1-3	Pruebas electroquímicas	E-3

2.6 Técnica de resistencia a la compresión.

Las probetas cilíndricas se evaluaron a los 28 días de curado en una máquina de ensayo de compresión hasta alcanzar su carga máxima de rotura, según la norma ASTM C-39 (C-39, 2014). Las probetas se colocaron alineando sus ejes con los ejes de carga del equipo. Se registró la carga de rotura y, a partir de esta, se determinó la resistencia del hormigón dividiendo la carga por el área de la sección transversal de la probeta, según la ecuación 1:

$$f'_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

donde: f'_c es la resistencia a la compresión del concreto en kg/cm^2 ; F es la carga máxima de rotura registrada por el equipo en kg ; y A es el área de la sección transversal de la muestra en cm^2 .

2.7 Aplicación de las técnicas electroquímicas.

La técnica HCP es una herramienta muy sencilla y ampliamente utilizada para estudiar la corrosión del CRS (Kim et al., 2014; Leelalerkiet et al., 2004; Yodsudjai y Pattarakittam 2017). Sin embargo, presenta la limitación de que no es capaz de proporcionar información sobre la velocidad y el mecanismo de corrosión (Ghorbani et al., 2019). Se tomaron lecturas de E_{corr} de las tres barras de cada muestra y se registró su promedio. Las mediciones se realizaron con un electrodo saturado de calomel (SCE) como electrodo de referencia y un multímetro para registrar los valores. A partir de los valores de HCP y según lo establecido en la norma ASTM C876 (C876-09 2009) sobre el criterio de probabilidad de corrosión, se establecieron tres intervalos que relacionan ambos parámetros. La zona 1 presenta una probabilidad de corrosión del 10 % en el rango de valores más

positivos que -125 mV; la zona 2 abarca un rango de valores entre -125 mV y -276 mV (zona de incertidumbre); y la zona 3, con una probabilidad de corrosión del 90 %, corresponde al rango de valores más negativo que -276 mV (Taji et al., 2018).

Tal y como describe Cottis (Cottis 2001, 2008), el método estándar y más utilizado para aplicar la técnica EN consiste en el uso de tres electrodos nominalmente "idénticos". Se registraron simultáneamente las fluctuaciones del ruido en potencial y la corriente durante un tiempo de 1024 s con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Los resultados se obtuvieron de las tres muestras que contribuyen al ruido (triplicadas). Para analizar los datos obtenidos, se eliminó la tendencia de las series temporales de corriente y potencial mediante el método de regresión lineal (Mansfeld, Sun y Hsu, 2001).

Numerosos estudios sobre el concreto reforzado reportan el uso de la técnica LPR para analizar la corrosión del acero de refuerzo (Clément et al. 2012; Samson et al., 2018). Los resultados de esta técnica se obtuvieron por triplicado y se calculó su valor promedio, el cual, se representó en los gráficos. En esta investigación, se aplicó un barrido de potencial de 30 mV a una velocidad de 10 mV/min. La polarización de bajo campo es no intrusiva, y se han reportado valores en el rango de 10 a 30 mV (Alghamdi y Ahmad 2014; Nguyen et al. 2018; Papavinasam 2008). A partir de la pendiente formada por los valores de potencial aplicados en torno al E_{corr} y la respuesta de corriente obtenida, es posible determinar la R_p (Zhou et al. 2018), tal y como se indica en la siguiente ecuación (Mitzithra et al. 2015; Papavinasam 2008):

$$R_p \left(\frac{\Delta V}{\Delta I} \right)_{E_{corr}} \quad (2)$$

En la figura 4 se muestra el diseño de la celda electroquímica utilizada para el estudio del RC.

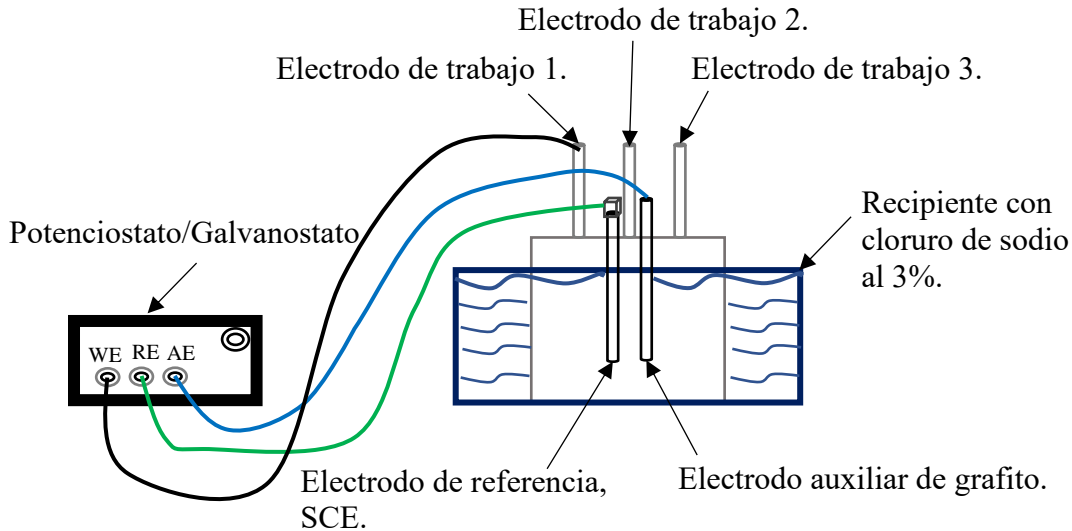


Figura 4. Representación de la celda electroquímica del RC para la medición de la LPR.

2.8 Procedimiento para calcular la velocidad de corrosión.

La I_{corr} del CRS se determinó según la ecuación 3 (Nguyen et al., 2018; Zhou et al., 2018). En numerosos estudios se ha utilizado un valor B de 26 mV (Papavinasam, 2008) y, en este trabajo de investigación, se tendrá en cuenta el mismo valor para el cálculo del I_{corr} .

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

donde: I_{corr} , es la velocidad de corrosión expresada en términos de densidad de corriente de corrosión en $\mu A/cm^2$; B es la constante de proporcionalidad relacionada con las pendientes de Tafel (anódica y catódica), y R_p es la resistencia de polarización.

Teniendo en cuenta otros estudios previos en los que se demuestra la equivalencia entre los valores R_n y R_p (Díaz Blanco et al., 2019), los valores de I_{corr} se determinaron a partir de R_n según la ecuación 3.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

3.1. Resistencia a la compresión.

La Tabla 2 muestra los valores medios de tres muestras para cada geometría de PET con NM, en comparación con las muestras de control.

Table 2. Valores promedio de $f'c$ a los 28 días de curado.

Muestras	$f'c$ (kg/cm ²)
C-0	248.9
C-1	231.1
C-2	238.5
C-3	233.0

Como se puede observar, el valor más alto de $f'c$ para las muestras con agregados se obtuvo en la muestra C-2, con un valor de 238.5 kg/cm², debido principalmente al efecto de las fibras largas en la matriz del concreto, que actúan como elemento supresor en la formación y propagación de fisuras y grietas (Foti, 2013; Foti y Paparella, 2014). Las muestras C-3 y C-1 le siguen en orden descendente de valor en comparación con la muestra de control, que presenta un valor promedio de 248,9 kg/cm² respecto a la resistencia de diseño de 250 kg/cm². Estos valores de resistencia son consecuencia de la acción del NM, que retrasa el fraguado del cemento (Martínez-Barrios et al., 2025). El NM puede retener agua dentro del concreto, ya que la parte hidrófila de los polímeros atrapa pequeñas partículas de agua y ralentiza el proceso de hidratación del cemento (Martínez-Barrios et al., 2025).

Además, el buen rendimiento de las fibras se aprecia al compararlas con las partículas conformadas, donde la muestra C-2, con un 1.5 % de LF y un 1.5 % de P, alcanzó los valores de resistencia más altos en comparación con las muestras C-1 y C-3, que contienen un 3 % de P y un 3 % de SF, respectivamente. Varios estudios confirman el efecto que aportan las fibras de PET en comparación con otros tipos de partículas en cuanto a las propiedades de resistencia a la compresión (Bahij et al., 2020).

3.2. Potencial de media celda.

Estudios previos demostraron que, a medida que disminuía la concentración de PET en sus diferentes configuraciones geométricas, el efecto protector en el acero se volvía más significativo con el paso del tiempo (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). El gráfico siguiente ilustra el efecto de la disminución de los porcentajes de PET y el efecto de la NM sobre las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo, ver en la Figura 5.

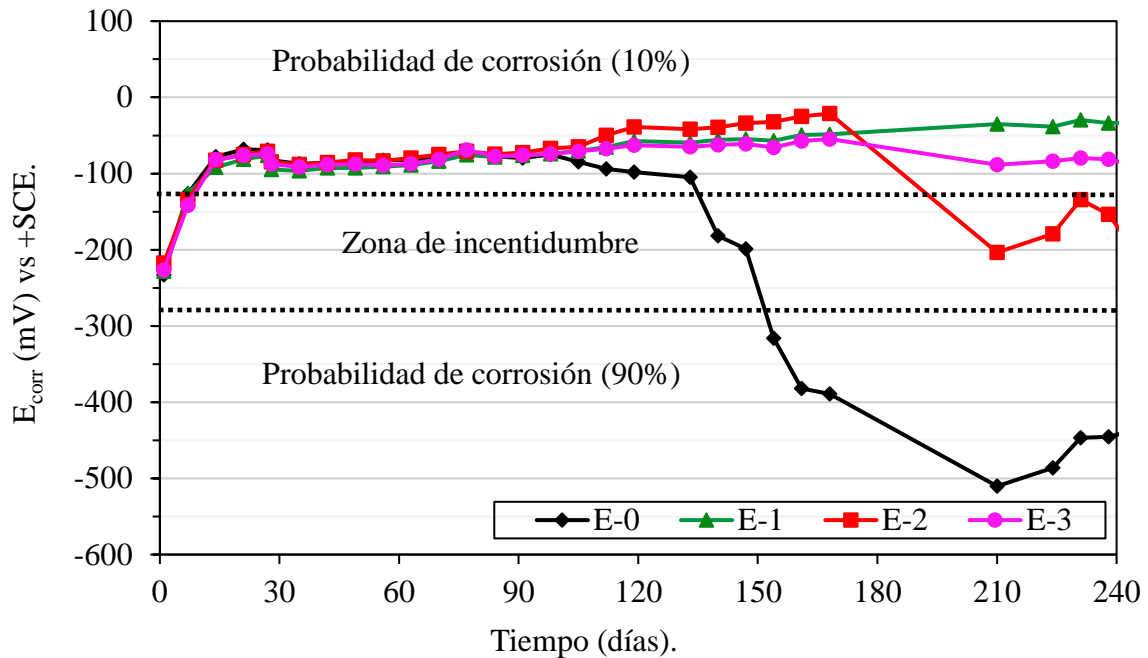


Figura 5. Valores de E_{corr} para las muestras de concreto expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3 %.

Durante los primeros 28 días de curado del concreto, se observa un cambio brusco en los valores de potencial hacia valores más positivos, relacionado con el proceso de curado del concreto y la pasivación del acero de refuerzo (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). Con estos valores de potencial, el acero de refuerzo se encuentra completamente pasivado, situándose en una zona con una probabilidad de corrosión del 10%.

Durante los tres primeros meses de pruebas, todos los valores fueron similares. Sin embargo, conforme las muestras estuvieron más tiempo expuestas a la solución agresiva de cloruro de sodio al 3 %, la muestra de control (E-0) comenzó a perder sus propiedades protectoras y sus valores de E_{corr} se hicieron más negativos (Martínez-Barrios et al., 2025), llegando a alcanzar valores de hasta -500 mV tras 210 días de exposición (zona de probabilidad de corrosión del 90 %).

Además, las muestras E-1 y E-3 permanecen en la zona de probabilidad de corrosión del 10 % hasta los 240 días, lo que demuestra el efecto positivo de las partículas de PET y las fibras cortas en combinación con el NM como barrera física sobre las propiedades electroquímicas del concreto. La adición de NM bloquea parcialmente los poros de la matriz del concreto, lo que reduce la difusión de agentes agresivos (Pattusamy et al., 2023). Del mismo modo, el mucílago del nopal retiene la humedad durante más tiempo. Diversos estudios muestran que los polisacáridos presentes en el NM son higroscópicos, lo que disminuye la pérdida de humedad del material (Chandra, Eklund y Villarreal, 1998; Martínez-Barrios et al., 2025). Además, el efecto del NM actúa, reduciendo la porosidad del material y obstruyendo los poros, lo que impide el transporte de agua y agentes agresivos (como los iones cloruro) hacia el interior del concreto. (Torres-Acosta y Alejandra Díaz-Cruz, 2020).

Por último, la muestra E-2, que contiene un 1.5 % de LF y un 1.5 % de P, mantuvo un comportamiento aceptable cercano a la zona de incertidumbre, aunque también registró valores más positivos que la muestra E-0.

3.3. Ruido electroquímico.

Mediante el análisis de EN, se determinaron los valores de la desviación estándar de la corriente y los valores de R_n . La Figura 6 muestra los resultados obtenidos al dividir la desviación estándar del

ruido en voltaje σ_v por la desviación estándar del ruido en corriente σ_i , lo que da como resultado el valor de la R_n .

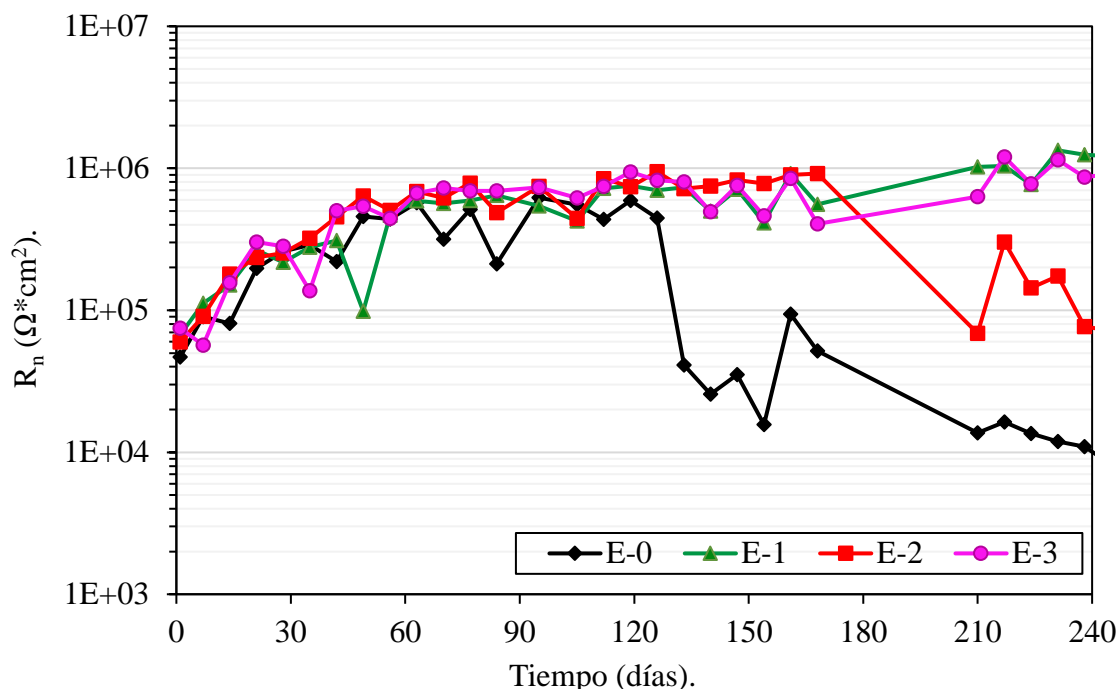


Figure 6. Valores de R_n para las muestras de concreto expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3%.

Durante los primeros meses, las probetas mostraron un aumento de la R_n , relacionado con el proceso de curado del concreto y la formación de una película de óxido protectora en la superficie del acero, superando los $500,000 \Omega^*cm^2$. Entre los días 130 y 160 se observó una caída brusca de los valores de R_n , sobre todo en la muestra E-0, con fluctuaciones a lo largo de este período, lo que demuestra que el inicio de la corrosión activa del acero no se debe a un único cambio, sino a una secuencia de eventos graves. Durante este tiempo, las muestras restantes mantuvieron valores de R_n muy elevados, cercanos a los $750,000 \Omega^*cm^2$, en consonancia con otros estudios previos (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). Varios estudios han señalado que el NM actúa tapando los poros en el concreto, ralentizando la penetración de cloruros a través de la matriz del concreto al formarse un enlace químico entre las pectinas y las moléculas de cloruro/agua (Torres-Acosta, 2007).

A medida que aumenta el tiempo de exposición de las muestras al medio agresivo, se observa una disminución de los valores de R_n en la muestra E-2, que alcanzan aproximadamente $100,000 \Omega^*cm^2$, manteniéndose significativamente por encima de los de la muestra E-0. Por otro lado, las muestras E-1 y E-3, que contienen un 3 % de P de PET y el NM, y un 3 % de SF y el NM, respectivamente, mantienen valores de R_n que alcanzan hasta $1,000,000 \Omega^*cm^2$. Díaz Blanco et al. (Díaz Blanco et al., 2019) informaron del efecto de las partículas de PET como barrera física dentro de la matriz del concreto, que impide la penetración de agentes agresivos a través de la red de poros del concreto. Este efecto es menos pronunciado en la muestra E-2, que contiene un 1.5 % de LF, un 1.5 % de P y NM, lo que confirma que la geometría del PET tiene un efecto significativo sobre las propiedades electroquímicas del concreto y sobre la protección del acero. El NM, por su parte, aumentó significativamente los valores de R_n de todas las muestras que lo contenían. Este comportamiento respalda la teoría de que el NM inhibe la corrosión de las barras de refuerzo expuestas a un medio agresivo con cloruros (Torres-Acosta, 2007).

3.4. Resistencia a la polarización lineal.

Los resultados obtenidos mediante la técnica de LPR se muestran en la Figura 7. Durante los tres primeros meses de prueba, se observó un aumento considerable de la R_p ; estos valores son similares a los de la R_n , asociados a la formación de una capa pasiva sobre el acero dentro de la matriz de concreto. A medida que aumentaba el tiempo de exposición al medio agresivo de cloruro de sodio, se produjo una caída brusca de los valores de R_p , sobre todo en la muestra E-0, que no contenía inhibidor ni agregados de PET. Las muestras restantes mantuvieron valores de R_p superiores a $100,000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, en comparación con los valores de la muestra E-0, que al final del período de prueba apenas superaban los $30,000 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Cabe destacar el efecto inhibitor del NM y el efecto protector de las P y las SF (E-1 y E-3), ya que en varios puntos sus valores de R_p alcanzaron $1,000,000 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

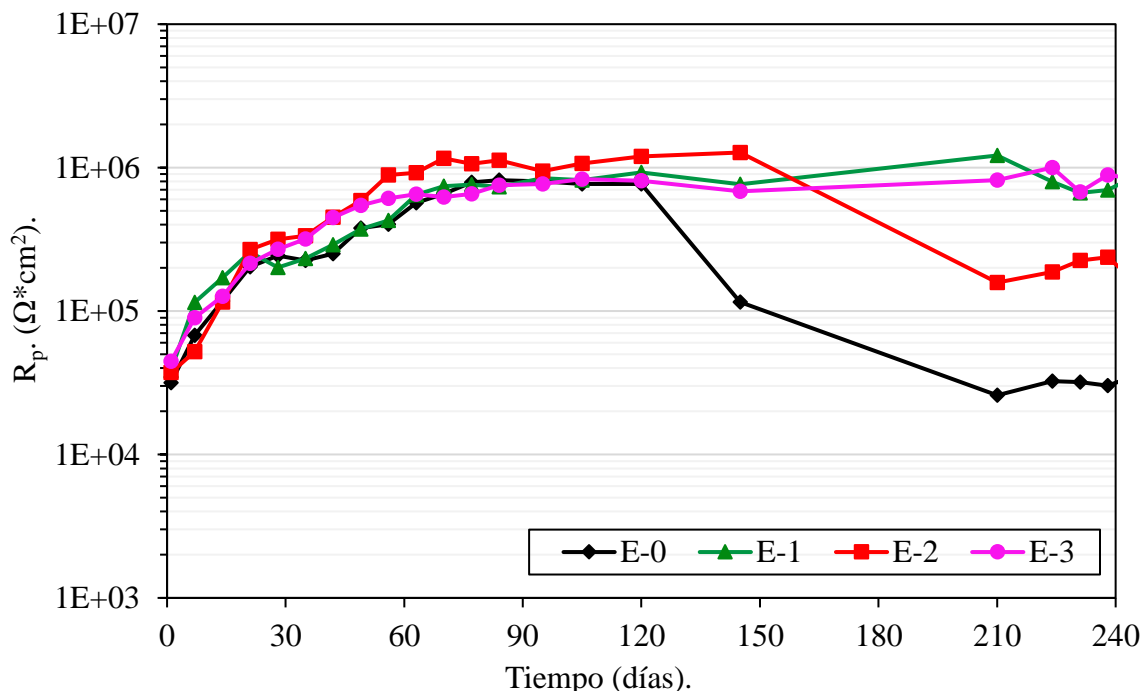


Figure 7. Valores de R_p para las muestras de concreto expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3%.

Según el Comité 201 de la ACI (ACI, 2008), la formación de grietas y fisuras en el concreto puede provocar un aumento de la velocidad de penetración de los iones cloruro, mientras que la velocidad de penetración de los mismos por difusión es más lenta. En este sentido, la introducción de fibras de PET en el concreto puede actuar como refuerzo de la matriz, limitando la formación de grietas y fisuras. Esto puede reducir el acceso de iones agresivos en el concreto, así como el inicio y la propagación de la corrosión. Además, algunas propiedades del NM tuvieron un efecto significativo en estos valores de R_p , como la viscosidad, que mejora la trabajabilidad y la homogeneidad de la mezcla en el concreto (León-Martínez et al., 2014), la reducción de la porosidad del concreto (Martínez-Barrios et al., 2025) y su función como bloqueador de poros (Pattusamy et al., 2023).

3.5. Velocidad de corrosión.

Las Figuras 8 y 9 muestran los valores de I_{corr} para todas las muestras de concreto, tanto con inhibidor y agregados de PET como sin estos agregados.

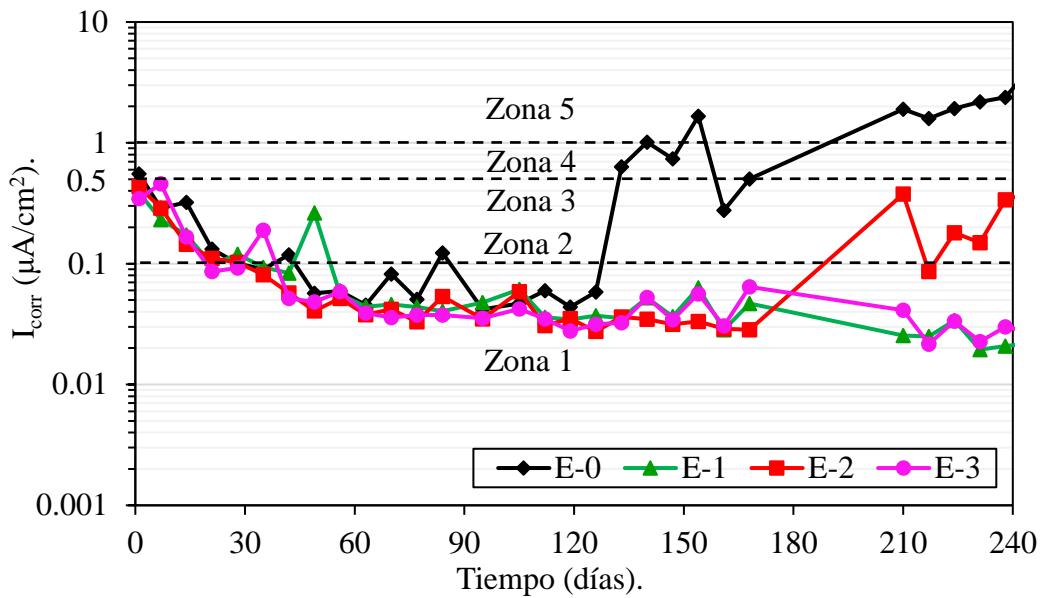


Figure 8. Valores de I_{corr} a partir de la R_n para las muestras de concreto expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3%.

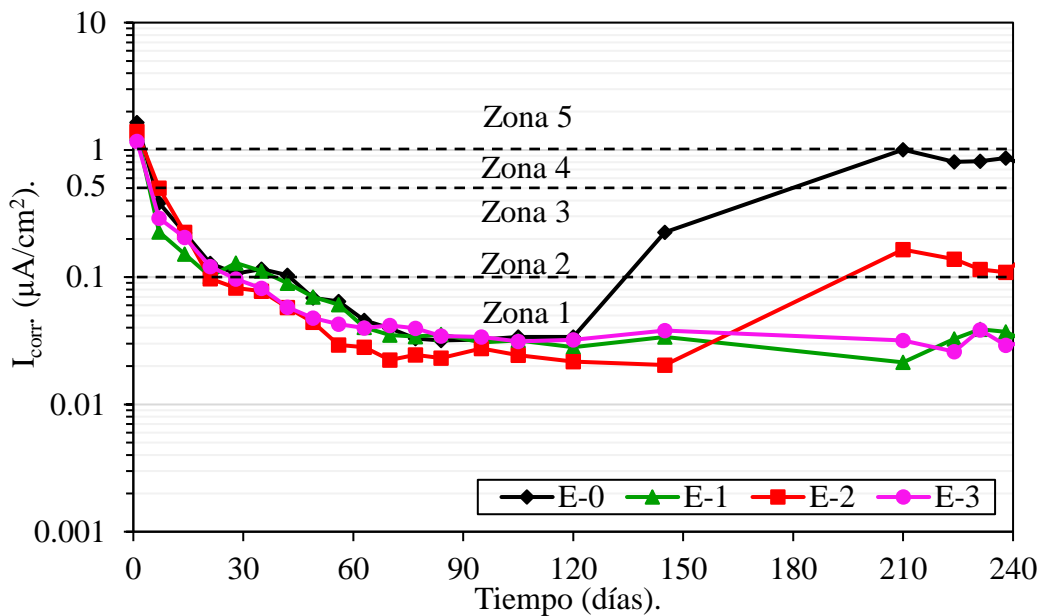


Figure 9. Valores de I_{corr} a partir de la R_p para todas las muestras de concreto expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3%.

Al inicio de la fase de curado del concreto, las muestras presentaban velocidades de corrosión que oscilaban entre muy altas (zona 5) y altas (zona 4). Durante esta fase inicial, todos los componentes del concreto reaccionaron con el agua y el NM añadido para formar los diversos compuestos que le confieren alcalinidad, resistencia y durabilidad. Al finalizar el proceso de curado de 28 días, los valores de I_{corr} disminuyeron en un orden de magnitud, acercándose a las zonas 1 y 2, que se caracterizan por velocidades de corrosión insignificantes y bajas. En este rango, es posible que el acero ya hubiera desarrollado un estado de pasividad debido a la presencia de humedad, oxígeno y un medio altamente alcalino (Hansson, 1984).

Al final del período de prueba, se observó que las muestras E-1 y E-3 mantuvieron valores de I_{corr}

muy bajos en la zona 1, relacionado con la pasividad del acero durante un período de tiempo más prolongado. Tanto el NM como las (SF y P del PET) proporcionaron al concreto una doble protección, impidiendo que los iones cloruro llegaran al acero y manteniendo en el concreto, factores como la humedad, el oxígeno y la alcalinidad por un mayor tiempo.

En ambos gráficos se aprecia una similitud en cuanto a los resultados obtenidos, ya que mantienen la misma tendencia a lo largo del tiempo.

3.6. Observación visual de las barras de acero.

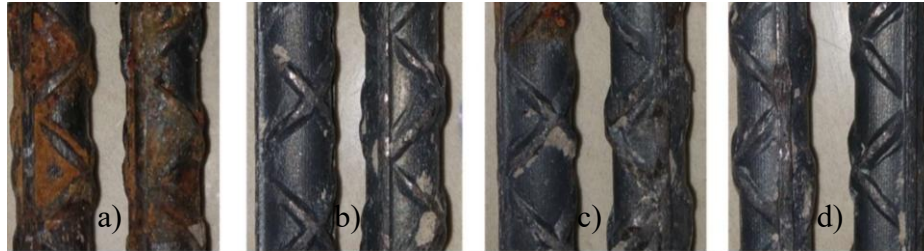


Figura 10. Barras de acero extraídas del concreto tras 240 días de exposición a una solución de cloruro de sodio al 3 %: a) muestra E-0, b) muestra E-1, c) muestra E-2 y d) muestra E-3.

Como se muestra en la Figura 10, se observan productos de corrosión de color rojizo en más del 80 % de la superficie metálica de la muestra E-0. Por el contrario, el ataque de iones cloruro, que provoca la despasivación del acero y por consiguiente la pérdida de sus propiedades protectoras, fue menos pronunciado en el resto de las muestras, sobre todo en las muestras E-1 y E-3, que presentan un tono gris metálico en toda la superficie del acero. En el caso de la muestra E-2, que contiene (1.5 % de LF-PET y 1.5 % de P-PET) y el NM, solo se observan algunas pequeñas áreas de óxido que aparecen como zonas de corrosión más pequeñas.

4. CONCLUSIONES.

A partir del análisis de los resultados del comportamiento electroquímico y mecánico del concreto con la incorporación de PET y NM, se llegó a las siguientes conclusiones:

Todas las muestras (C-1, C-2 y C-3) alcanzaron valores f'_c adecuados, teniendo en cuenta los porcentajes de PET, las geometrías utilizadas y la concentración de NM. En particular, la muestra C-2, con la adición de LF y P, alcanzó el valor más cercano al de la muestra de control C-0.

En general, todas las muestras con inhibidor de NM y agregados de PET presentaron valores de E_{corr} menos negativos que la muestra de control (E-0), por lo que el acero permaneció en un estado pasivo durante más tiempo. El efecto barrera del PET y algunas propiedades del NM, como la viscosidad y composición, proporcionaron al concreto una mayor durabilidad frente a agentes agresivos, como los iones de cloruro.

Los valores de R_n y R_p mostraron una tendencia similar entre ambos resultados. Estos resultados respaldan el uso de ambas técnicas para evaluar el comportamiento del acero de refuerzo en el concreto. Las muestras E-1 y E-3 presentaron los valores más altos de R_n y de R_p , lo que respalda el buen rendimiento del material compuesto diseñado.

La I_{corr} mantuvo valores insignificantes de velocidad de corrosión en todas las muestras con agregados y las barras de acero extraídas de las muestras, reflejaron visualmente el efecto protector de ambos compuestos (PET y NM).

5. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha contado con el apoyo de una beca posdoctoral de la Secretaría de Educación, Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) de México.

6. REFERENCIAS.

- El Fattah, A. A., Al-Duais, I., Riding, K., and Thomas, M. (2018), “*Field Evaluation of Corrosion Mitigation on Reinforced Concrete in Marine Exposure Conditions*”. *Construction and Building Materials*. 165:663–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077>.
- Abdel-Gaber, A. M., Khamis, E., and Hefnawy, A. (2011), “*Utilizing Arghel Extract as Corrosion Inhibitor for Reinforced Steel in Concrete*”. *Materials and Corrosion*. 62(12):1159–1162. <https://doi.org/10.1002/maco.201005653>.
- ACI. (2008). “*Guide to Durable Concrete Reported*”. ACI Committee 201 1–41.
- Adnan, H. M., and Dawood, A. O., (2020), “*Strength Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Re-Cycle of PET Wastes as Synthetic Fibers*.” *Case Studies in Construction Materials*. 13:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00367>.
- Alfahdawi, I. H., Osman, S. A., Hamid, R., and AL-Hadithi, A. I. (2019), “*Influence of PET Wastes on the Environment and High Strength Concrete Properties Exposed to High Temperatures*.” *Construction and Building Materials*. 225:358–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.214>.
- Alghamdi, S. A., and Ahmad, S. (2014), “*Service Life Prediction of RC Structures Based on Correlation between Electrochemical and Gravimetric Reinforcement Corrosion Rates*.” *Cement and Concrete Composites*. 47:64–68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.003>.
- Andrade, C., Alonso, C., and Sarra, J. (2002), “*Corrosion Rate Evolution in Concrete Structures Exposed to the Atmosphere*.” *Cement and Concrete Composites*. 24(1):55–64. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00026-9).
- Sifatullah, B. Omary, S. Feugeas, F. and Faqiri, A. (2020), “*Fresh and Hardened Properties of Concrete Containing Different Forms of Plastic Waste – A Review*.” *Waste Management*. 113:157–75. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.048>.
- Borg, R. P., Baldacchino, O. and Ferrara, L. (2016), “*Early Age Performance and Mechanical Characteristics of Recycled PET Fibre Reinforced Concrete*.” *Construction and Building Materials*. 108:29–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>.
- ASTM International (20214). *ASTM C-39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://doi/10.1520/C0039_C0039M-14
- ASTM International (2009). *ASTM C876-09, “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.”* ASTM International. 1–7. <https://doi.org/10.1520/C0876-09>.
- Chandra, S., L. Eklund, L., and Villarreal, R. R. (1998), “*Use of Cactus in Mortars and Concrete*.” *Cement and Concrete Research*. 28(1):41-51. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00254-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00254-8)
- Clément, A., Laurens, S., Arliguie, G., and Deby, F. (2012), “*Numerical Study of the Linear Polarisation Resistance Technique Applied to Reinforced Concrete for Corrosion Assessment*.” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 16(3–4):491–504. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.668012>.
- Cottis, R. A. (2001), “*Interpretation of Electrochemical Noise Data*.” *Corrosion*. 57(3):265–285. <https://doi.org/10.5006/1.3290350>
- Cottis, R. A. (2008), “*Electrochemical Noise for Corrosion Monitoring*.” Pp. 86–110 in *Techniques*

- for Corrosion Monitoring, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103003-5.00005-9>
- Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, E. C., Rocabrúno-Valdés, C. I., and Uruchurtu-Chavarín, J. (2019), “*Effect of Recycled PET (Polyethylene Terephthalate) on the Electrochemical Properties of Rebar in Concrete.*” International Journal of Civil Engineering. 18:487–500. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00478-3>.
- Díaz-Blanco, Y., Menchaca Campos E. C., Rocabrúno-Valdés, C. I., and Uruchurtu-Chavarín, J. 2019. “*Natural Additive (Nopal Mucilage) on the Electrochemical Properties of Concrete Reinforcing Steel.*” Revista ALCONPAT. 9(3):260–276. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>.
- Foti, D. (2013), “*Use of Recycled Waste Pet Bottles Fibers for the Reinforcement of Concrete.*” Composite Structures. 96:396–404. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019>.
- Foti, D. (2019), “*Recycled Waste PET for Sustainable Fiber-Reinforced Concrete.*” Pp. 387–410 in Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00018-9>
- Foti, D., and Paparella, F. (2014), “*Impact Behavior of Structural Elements in Concrete Reinforced with PET Grids.*” Mechanics Research Communications. 57:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.02.007>.
- Garcés, P., Saura, P. Méndez, A. Zornoza, E. and Andrade, C. (2008), “*Effect of Nitrite in Corrosion of Reinforcing Steel in Neutral and Acid Solutions Simulating the Electrolytic Environments of Micropores of Concrete in the Propagation Period.*” Corrosion Science. 50(2):498–509. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.08.016>.
- Nina, G. Kosec, T., and Legat, A. (2016), “*The Efficiency of a Corrosion Inhibitor on Steel in a Simulated Concrete Environment.*” Materials Chemistry and Physics. 184:31–40. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.08.047>.
- Ghorbani, S., Taji, I., Brito, J. D. Negahban, M., Ghorbani, S., Tavakkolizadeh, M., and Davoodi, A. (2019), “*Mechanical and Durability Behaviour of Concrete with Granite Waste Dust as Partial Cement Replacement under Adverse Exposure Conditions.*” Construction and Building Materials. 194:143–52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.023>.
- Hansson, C. M. (1984), “*Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete.*” Cement and Concrete Research. 14(4):574–84. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90135-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90135-2).
- Ben Harb, M., Abubshait, S., Etteyeb, N., Kamoun, M., and Dhouib, A. (2020), “*Olive Leaf Extract as a Green Corrosion Inhibitor of Reinforced Concrete Contaminated with Seawater.*” Arabian Journal of Chemistry. 13:4846–56. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.016>.
- Kim, Y.Y., Kim, J. M., Bang, J. W., and Kwon, S. J. (2014), “*Effect of Cover Depth, w/c Ratio, and Crack Width on Half Cell Potential in Cracked Concrete Exposed to Salt Sprayed Condition.*” Construction and Building Materials. 54:636–45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.009>.
- Han-Seung L., Hyun-Min Y., Singh, J. K., Prasad, S. K., and Yoo, B. (2018), “*Corrosion Mitigation of Steel Rebars in Chloride Contaminated Concrete Pore Solution Using Inhibitor: An Electrochemical Investigation.*” Construction and Building Materials. 173:443–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.069>.
- Leelalerkiet, V., Je-Woon K., Ohtsu, M. and Yokota, M. (2004), “*Analysis of Half-Cell Potential Measurement for Corrosion of Reinforced Concrete.*” Construction and Building Materials. 18:155–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.10.004>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068>.
- Liu, Y., Song, Z., Wang, W., Jiang, L., Zhang, Y., Guo, M., Song, F., and Xu, N. (2019), “*Effect of Ginger Extract as Green Inhibitor on Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Simulated*

- Concrete Pore Solutions.*” Journal of Cleaner Production. 214:298–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.299>.
- Loto, C. A., Joseph, O. O., Loto, R. T., and Popoola, A. P. I. (2013), “*Inhibition Effect of Vernonia Amygdalina Extract on the Corrosion of Mild Steel Reinforcement in Concrete in 3.5M NaCl Environment.*” International Journal of Electrochemical Science. 8(9):11087–11100. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)13171-3](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13171-3)
- Mansfeld, F., Sun, Z. and Hsu, C. H. (2001), “*Electrochemical Noise Analysis (ENA) for Active and Passive Systems in Chloride Media.*” Electrochimica Acta. 46(24-25):3651–3664. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(01\)00643-0](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00643-0).
- Martínez-Barrios, E., Páramo-García, U. Suárez-Domínguez, E. J., and Pérez-Sánchez, J. F. (2025), “*The Effect of Nopal Mucilage Addition on the Corrosion Rate of Reinforcement Steel in Concrete.*” Surfaces 8(26):1-12. <https://doi.org/10.3390/surfaces8020026>.
- Martinez-Molina, W., Torres-Acosta, A., Hernández-Leos, R., Alonso-Guzman, E., Mendoza-Pérez, I., and Martinez-Peña, I. (2016), “*The Inhibitive Properties of Nopal Slime on the Corrosion of Steel in Chloride-Contaminated Mortar.*” Anti-Corrosion Methods and Materials. 63(1):65–71. <https://doi.org/10.1108/ACMM-05-2014-1381>.
- Mitzithra, M. E., Deby, F. Balayssac, J. P., and Salin, J. (2015), “*Proposal for an Alternative Operative Method for Determination of Polarisation Resistance for the Quantitative Evaluation of Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Cooling Towers.*” Nuclear Engineering and Design 288:42–55. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.03.018>.
- Monticelli, C. (2018), “*Corrosion Inhibitors.*” Pp. 164–71 in Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13443-2>
- Nguyen, W., Duncan, J. F., Devine, T. M., and Ostertag, C. P. (2018), “*Electrochemical Polarization and Impedance of Reinforced Concrete and Hybrid Fiber-Reinforced Concrete under Cracked Matrix Conditions.*” Electrochimica Acta. 271:319–336 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.03.134>.
- Noroozi, R., Shafabakhsh, G. Kheyroddin, A. and Moghaddam, A. M. (2019), “*Investigating the Effects of Recycled PET Particles, Shredded Recycled Steel Fibers and Metakaolin Powder on the Properties of RCCP.*” Construction and Building Materials. 224:173–87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.012>.
- Okeniyi, J. O., Akintoye Loto, C. and Idowu Popoola, A. P. (2015), “*Investigating the Corrosion Mechanism of Morinda Lucida Leaf Extract Admixtures on Concrete Steel Rebar in Saline/Marine Simulating Environment.*” International Journal of Electrochemical Science. 10:9893–9906. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11228-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11228-4)
- Okeniyi, J. O., Akintoye Loto, C., and Idowu Popoola, A. P. (2015), “*Corrosion Inhibition of Concrete Steel-Reinforcement in Saline/Marine Simulating-Environment by Rhizophora Mangle L.*” Solid State Phenomena. 227:185–189. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.185>.
- Ongpeng, J. C. C., Barra, J., Carampatana, C., Sebastian, C., Yu, J. J. Aviso, K. B., and Tan, R. R. (2020). “*Strengthening Rectangular Columns Using Recycled PET Bottle Strips.*” Engineering Science and Technology, an International Journal. 24(2):405-413. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.07.006>.
- Ormellese, M., Berra, M. Bolzoni, F. and Pastore, T. (2006), “*Corrosion Inhibitors for Chlorides Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures.*” Cement and Concrete Research 36(3):536–47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.007>.
- Palanisamy, S. P., Maheswaran, G. Kamal, C. and Venkatesh, G. (2016), “*Prosopis Juliflora—A Green Corrosion Inhibitor for Reinforced Steel in Concrete.*” Research on Chemical Intermediates 42(12):7823–40. <https://doi.org/10.1007/s11164-016-2564-1>.
- Palanisamy, S. P., Maheswaran, G. Selvarani, A G., Kamal, C. and Venkatesh, G. (2018), “*Ricinus*

Communis – A Green Extract for the Improvement of Anti-Corrosion and Mechanical Properties of Reinforcing Steel in Concrete in Chloride Media.” Journal of Building Engineering. 19:376–383. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.020>.

Pan, C., Chen, N., He, J., Liu, S., Chen, K., Wang, P., and Xu, P. (2020), “*Effects of Corrosion Inhibitor and Functional Components on the Electrochemical and Mechanical Properties of Concrete Subject to Chloride Environment.*” Construction and Building Materials 260:119724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119724>.

Papavinasam, S. (2008), “*Electrochemical Polarization Techniques for Corrosion Monitoring.*” Pp. 45–77 in Techniques for Corrosion Monitoring, WP.. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103003-5.00003-5>

Pattusamy, L., Rajendran, M. Shanmugamoorthy, S. and Ravikumar, K. (2023), “*Confinement Effectiveness of 2900psi Concrete Using the Extract Euphorbia Tortilis Cactus as a Natural Additive.*” Revista Materia. 28(1). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0233>.

Pradipta, I., Kong, D. and Lee Tan, J. B. (2019), “*Natural Organic Antioxidants from Green Tea Inhibit Corrosion of Steel Reinforcing Bars Embedded in Mortar.*” Construction and Building Materials. 227(10):117058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117058>.

Qian, S., and Cusson, D. (2004), “*Electrochemical Evaluation of the Performance of Corrosion-Inhibiting Systems in Concrete Bridges.*” Cement and Concrete Composites. 26(3):217–33. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00041-6).

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>.

Raja, P. B., Seyedmojtaba G., and Mohammad I. (2015), “*Natural Corrsion Inhibitors for Steel Reinforcement in Concrete — A Review.*” Surface Review and Letters. 22(3). <https://doi.org/10.1142/S0218625X15500407>.

Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., and Sadeghi-Nik, A. (2015), “*The Combined Effects of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Particles and Pozzolan Materials on the Properties of Self-Compacting Concrete.*” Journal of Cleaner Production. 112(4):2363–2373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.

Saikia, N., and de Brito, J. (2014), “*Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as a Partial Substitution of Natural Aggregate.*” Construction and Building Materials. 52:236–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>.

Samson, G., Deby, F. Garcia, J. L., and Perrin, J. L. (2018), “*Alternative Methodology for Linear Polarization Resistance Assessment of Reinforced Concrete Structure.*” MATEC Web of Conferences 199. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819906009>.

Saricimen, H., Mohammad, M., Quddus, A., Shameem, M., and Barry, M. S. (2002), “*Effectiveness of Concrete Inhibitors in Retarding Rebar Corrosion.*” Cement and Concrete Composites. 24:89–100. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00030-0).

De Schutter, G., and Luo, L. (2004), “*Effect of Corrosion Inhibiting Admixtures on Concrete Properties.*” Construction and Building Materials. 18:483–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.001>.

Siddique, R., Khatib, J. and Kaur, I. (2008), “*Use of Recycled Plastic in Concrete: A Review.*” Waste Management. 28(10):1835–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>.

Silva, R. V., de Brito, J. and Saikia, N. (2013), “*Influence of Curing Conditions on the Durability-Related Performance of Concrete Made with Selected Plastic Waste Aggregates.*” Cement and Concrete Composites. 35:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>.

Taji, I., Ghorbani, S. de Brito, J. Tam, V. W. Y., Sharifi, S. Davoodi, A. and Tavakkolizadeh, M. (2018), “*Application of Statistical Analysis to Evaluate the Corrosion Resistance of Steel Rebars Embedded in Concrete with Marble and Granite Waste Dust.*” Journal of Cleaner Production.

210:837-846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.091>.

Thomas, L. M., and Moosvi, S. A. (2020), “*Hardened Properties of Binary Cement Concrete with Recycled PET Bottle Fiber: An Experimental Study.*” *Materials Today: Proceedings*. 32(4):632-637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.025>.

Torres-Acosta, A. A. (2007), “*Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) Mucilage as a Steel Corrosion Inhibitor in Alkaline Media.*” *Journal of Applied Electrochemistry*. 37(7):835–41. <https://doi.org/10.1007/s10800-007-9319-z>.

Torres-Acosta, A. A., and Díaz-Cruz, L. A. (2020), “*Concrete Durability Enhancement from Nopal (Opuntia Ficus-Indica) Additions.*” *Construction and Building Materials*. 243:118170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118170>.

Umoren, S. A., Solomon, M. M., Obot, I. B., and Suleiman, R. K. (2019), “*A Critical Review on the Recent Studies on Plant Biomaterials as Corrosion Inhibitors for Industrial Metals.*” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 76:91–115. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.057>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.001>.

Jong-Pil, W., Chang-II J., Sang-Woo L., Su-Jin L., and Heung-Youl K. (2010), “*Long-Term Performance of Recycled PET Fibre-Reinforced Cement Composites.*” *Construction and Building Materials*. 24:660–665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.003>.

Xu, J. X., Gao, G. F., Jiang, L. H., and Pang, D P. (2015), “*Corrosion Protection of Reinforcing Steel with Kelp Extract as Corrosion Inhibitor.*” *Materials Research Innovations*. 19(sup1): S1-20-S1-25. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001361>.

Yodsudjai, W., and Pattarakittam, T. (2017), “*Factors Influencing Half-Cell Potential Measurement and Its Relationship with Corrosion Level.*” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 104:159–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.027>.

Zhang, Z., Ba, H. and Wu, Z. (2019), “*Sustainable Corrosion Inhibitor for Steel in Simulated Concrete Pore Solution by Maize Gluten Meal Extract: Electrochemical and Adsorption Behavior Studies.*” *Construction and Building Materials*. 227:117080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117080>.

Zhou, B., Gu, X., Guo, H., Zhang, W., and Huang, Q. (2018), “*Polarization Behavior of Activated Reinforcing Steel Bars in Concrete under Chloride Environments.*” *Construction and Building Materials*. 164:877–887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.187>.