

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

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

* Autor de Contato: yohadiaz12@gmail.com

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

Recebido: 11/01/2026 | Correções recebidas: 05/04/2026 | Aceito: 07/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

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.

Citar como: Menchaca-Campos, E. C., Díaz-Blanco, Y., Rocabrundo-Valdes, C. I., Tamayo-Aguilar, Y., Flores-Nicolas, A., Uruchurtu-Chavarín, J. (2026), “Desenvolvimento de um material cimentício com mucilagem de nopal e agregados de PET para melhorar as propriedades eletroquímicas do concreto armado.”, 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a ideia original da pesquisa foi de Y. Díaz-Blanco Yohandry (30%), C. Menchaca-Campos (40%) e J. Uruchurtu-Chavarín (40%). A administração do projeto foi supervisionada por C. Menchaca-Campos (60%) e J. Uruchurtu-Chavarín (40%). A metodologia e a experimentação foram supervisionadas por Y. Díaz-Blanco (50%), C. I. Rocabrundo-Valdés (30%), C. Menchaca-Campos (10%) e J. Uruchurtu-Chavarín (10%). O processamento dos dados foi realizado por Y. Díaz-Blanco (40%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), Y. Tamayo-Aguilar (20%) e A. Flores-Nicolas (20%). A redação, revisão e edição foram supervisionadas por Y. Díaz-Blanco (20%), C. Menchaca-Campos (20%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), Y. Tamayo-Aguilar (15%), A. Flores-Nicolás (15%) e J. Uruchurtu-Chavarín (10%). A análise e a discussão dos resultados foram realizadas por Y. Díaz-Blanco (30%), C. Menchaca-Campos (20%), C. I. Rocabrundo-Valdés (20%), A. Flores-Nicolás (10%) e J. Uruchurtu-Chavarín (20%).

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([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.

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

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

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano de 2027.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

NOMENCLATURA

Termo	Abreviatura
Concreto armado	RC.
Mucilagem de nopal	NM.
Tereftalato de polietileno	PET.
Partículas	P.
Fibras longas e partículas	LF-P.
Fibras curtas	SF.
Potencial de meia-célula	HCP.
Ruído eletroquímico	EN.
Resistência à polarização linear	LPR.
Resistência à compressão	f'_c .
Velocidade de corrosão	I_{corr} .
Aço da armadura	RS.
Inibidores de corrosão	CI.
Resistência à polarização	R_p .
Aço da armadura do concreto com inibidores	CRS.
Potencial de corrosão	E_{corr} .
Resistência de ruído eletroquímico	R_n .

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a durabilidade do concreto é uma das propriedades mais importantes a serem consideradas no projeto de estruturas de concreto armado. A durabilidade do concreto depende de diversos fatores internos e externos, tais como: i) a qualidade dos materiais utilizados na mistura, o tipo de armadura e a relação água/cimento; bem como ii) as condições de exposição às quais as estruturas estarão submetidas durante sua vida útil (Valipour, Shekarchi e Ghods, 2014).

No interior da matriz de concreto, o aço da armadura (RS) é capaz de desenvolver uma camada passiva de óxido férrico, que atua como barreira eletroquímica (Ben Harb et al., 2020), mantendo-o protegido enquanto forem preservadas as condições de elevada alcalinidade da pasta de cimento e não houver agentes externos capazes de corroer a superfície do aço (Abdel-Gaber, Khamis e Hefnawy, 2011). Da mesma forma, o revestimento de concreto oferece proteção física à armadura frente ao ambiente circundante.

Em ambientes marinhos, a corrosão induzida por cloretos é uma das principais causas de deterioração do aço da armadura (RS). Em geral, esses íons podem penetrar no concreto a partir do ambiente e se difundir pela rede de poros (Abd El Fattah et al., 2018), ou podem estar presentes nos materiais da mistura, como os agregados miúdos e graúdos (Saricimen et al., 2002). Uma vez no interior do concreto, esses íons podem alcançar a superfície metálica e provocar corrosão por pites (Abd El Fattah et al., 2018). Nesse sentido, numerosas pesquisas têm se concentrado no estudo da corrosão do concreto causada por íons cloreto (Andrade, Alonso e Sarría, 2002).

Com o objetivo de prolongar a vida útil das estruturas, diversos autores têm se dedicado ao estudo da durabilidade do concreto armado (Gartner, Kosec e Legat, 2016; Pan et al., 2020). A literatura descreve vários métodos para prevenir e contrapor a corrosão do RC, tais como: proteção catódica (Gartner et al., 2016), revestimentos (Lee et al., 2018), inibidores de corrosão adicionados à mistura (Ben Harb et al., 2020; Palanisamy et al., 2018; De Schutter e Luo, 2004), inibidores de corrosão aplicados à superfície (Gartner et al., 2016; Monticelli, 2018), materiais cimentícios suplementares

(Pan et al., 2020) e agregados poliméricos nas misturas (Díaz-Blanco et al., 2019), entre outros. Entre os métodos anteriormente descritos, o uso de inibidores de corrosão (CI) tem se mostrado o mais aceito e utilizado devido ao seu baixo custo e à facilidade de aplicação (Umoren et al., 2019). Alguns desses inibidores, como compostos à base de nitritos (Garcés et al., 2008; Okeniyi, Loto e Popoola, 2015), cromatos e dicromatos (Okeniyi, Loto e Popoola, 2015; Qian e Cusson, 2004), são classificados como inibidores inorgânicos e apresentam elevado efeito inibidor (Umoren et al., 2019). Entretanto, apresentam uma desvantagem significativa relacionada à sua elevada toxicidade, o que os torna prejudiciais à saúde humana (Raja, Ghoreishiamiri e Ismael, 2015).

Mais recentemente, inibidores naturais adicionados ao concreto têm sido utilizados para mitigar a corrosão provocada por íons cloreto (Loto et al., 2013). Esses inibidores vêm ganhando importância principalmente por sua disponibilidade na natureza, baixo custo e menor impacto ambiental (Ormellese et al., 2006).

Nesse sentido, a NM apresenta-se como uma excelente alternativa para enfrentar o problema da deterioração das estruturas de concreto armado em ambientes marinhos e das patologias de corrosão no RC, no contexto da busca por alternativas e novos materiais para a construção.

Alguns autores estudaram o efeito dos inibidores sobre o comportamento eletroquímico do aço da armadura (RS). Palanisamy et al. (2018) investigaram o extrato em pó do fruto de *Ricinus communis* como CI em amostras de concreto expostas a uma solução de NaCl a 3,5 %. Após 120 dias de exposição, os resultados mostraram um efeito inibidor significativo devido à formação de um filme passivo sobre a superfície do aço. A partir dos parâmetros eletroquímicos do diagrama de Nyquist e das curvas de polarização, obtiveram eficiências de inibição de 87 % e 79 %, respectivamente. As amostras de concreto apresentaram aumento da resistência à compressão à medida que se elevou a concentração do inibidor. Pradipta et al. (2019) compararam o efeito de um inibidor natural proveniente de extrato de folha de chá verde com o de um inibidor comercial de nitrito de cálcio, em função da concentração e do volume. Os resultados indicaram que, para a mesma concentração de inibidor, a velocidade de corrosão foi muito semelhante. No entanto, para o mesmo volume, observou-se aumento significativo da velocidade de corrosão nas amostras com inibidor de nitrito de cálcio, com valores superiores a 150 $\mu\text{m}/\text{ano}$ após 12 ciclos de umedecimento-secagem. Por outro lado, a velocidade de corrosão das amostras com inibidor de chá verde manteve-se em torno de 40 $\mu\text{m}/\text{ano}$. A resistência à polarização (R_p) foi superior para o inibidor de chá verde em relação ao inibidor de nitrito de cálcio durante todo o período de exposição.

Loto et al. (2013) estudaram o extrato de folhas de *Vernonia amygdalina* como CI para o aço carbono em RC. Foram preparadas quatro concentrações do inibidor (25 %, 50 %, 75 % e 100 %) em água destilada. Os resultados mostraram eficiência de 90,08 % para a amostra de concreto com 25 % de extrato de *Vernonia amygdalina*. Os valores de potencial foram mais nobres (menos negativos) para essa mesma concentração de 25 % quando comparados aos demais corpos de prova. Os autores concluíram que o extrato de *Vernonia amygdalina* é um bom CI para o aço carbono em concreto exposto a uma solução de cloreto de sódio a 3,5 %.

Outros extratos naturais de plantas têm sido utilizados como CI no aço da armadura do concreto (CRS), tais como: *Morinda lucida* (Okeniyi, Loto e Idowu Popoola, 2015), gengibre (Liu et al., 2019), *Rhizophora mangle* L. (Okeniyi, Loto e Popoola, 2015), folhas de oliveira (Ben Harb et al., 2020), *Prosopis juliflora* (Palanisamy et al., 2016), farinha de glúten de milho (Zhang, Ba e Wu, 2019), gel de algas (Xu et al., 2015), NM (Díaz Blanco et al., 2019; Martínez-Molina et al., 2016), entre outros.

Com o objetivo de melhorar a durabilidade do concreto e outras propriedades, numerosos materiais de diferentes tamanhos, percentuais e geometrias têm sido adicionados às misturas. Esse é o caso de alguns resíduos sintéticos, especialmente o PET proveniente de garrafas de bebidas pós-consumo (Foti, 2019).

Devido às suas diversas propriedades, tem-se estudado o uso potencial do PET em matriz de

concreto, principalmente para modificar suas propriedades mecânicas, entre outras. Por outro lado, o estudo da patologia da corrosão do RC com PET, especialmente em ambientes marinhos, é mais recente e pode se tornar uma excelente alternativa para enfrentar esse problema.

Nos últimos anos, o problema da contaminação ambiental tem despertado grande interesse em pesquisas, de modo que a reciclagem de alguns polímeros para uso posterior no concreto tem se tornado cada vez mais relevante. O PET apresenta várias propriedades que o tornam muito atrativo como agregado no concreto: resistência à água e a produtos químicos, resistência ao impacto, leveza, estabilidade frente às condições atmosféricas e capacidade de atuar como barreira para gases e líquidos, conforme afirmado por outros autores (Díaz-Blanco et al., 2019; Siddique, Khatib e Kaur, 2008).

Numerosos autores estudaram o efeito de diferentes geometrias de PET nas propriedades do concreto com duas aplicações principais: i) melhorar as propriedades mecânicas; e ii) melhorar a durabilidade (Ongpeng et al., 2020). Nesse sentido, têm sido investigadas propriedades do concreto como: trabalhabilidade da mistura (Alfahdawi et al., 2019; Rahmani et al., 2013; Sadrumontazi et al., 2015; Saikia e De Brito, 2014), resistência à compressão e à flexão (Adnan e Dawood, 2020; Alfahdawi et al., 2019; Borg, Baldacchino e Ferrara, 2016; Rahmani et al., 2013), porosidade (Alfahdawi et al., 2019; Sadrumontazi et al., 2015), absorção de água e resistência elétrica (Sadrumontazi et al., 2015), resistência à fissuração (Adnan e Dawood, 2020; Sadrumontazi et al., 2015), penetração de cloretos (Won et al., 2010) e resistência à corrosão (Díaz-Blanco et al., 2019). Muitos desses estudos concentram-se no uso de fibras de PET com alguns centímetros de comprimento (Adnan e Dawood, 2020; Alfahdawi et al., 2019; Borg et al., 2016; Thomas e Moosvi, 2020; Won et al., 2010), grânulos (Saikia e De Brito, 2014) e partículas com poucos milímetros de largura e comprimento (Adnan e Dawood, 2020; Noroozi et al., 2019; Rahmani et al., 2013; Sadrumontazi et al., 2015; Saikia e De Brito, 2014).

Saikia e De Brito (2014) investigaram o efeito das partículas de PET reciclado sobre as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Neste estudo, os agregados graúdos e miúdos foram substituídos em 5 %, 10 % e 15 % por três tipos de partículas de PET, em relação volume/volume. Os resultados indicaram redução do abatimento da mistura com os agregados de PET de maior e menor tamanho. Entretanto, observou-se melhora dessa propriedade na mistura com agregados de PET modificados. A densidade e as resistências à compressão e à flexão de todas as amostras com agregados de PET diminuíram com o aumento de seu percentual. No entanto, os autores observaram melhora na resistência à abrasão com o uso de diferentes tipos de PET.

Won et al. (2010) analisaram o comportamento de um compósito cimentício reforçado com fibra de PET reciclado em termos de durabilidade frente a diferentes meios agressivos. Os resultados de permeabilidade ao cloreto foram muito semelhantes entre as amostras do compósito cimentício reforçado com fibra de PET reciclado e a amostra de controle. Os maiores valores de resistência à compressão mantiveram-se em torno de 28 MPa aos 30, 60, 90 e 120 dias para as amostras expostas a soluções salinas e de cloreto de cálcio. Por outro lado, a superfície das fibras apresentou maior deterioração quando o compósito cimentício reforçado com fibra de PET reciclado foi exposto ao meio alcalino. A deterioração das fibras foi intermediária em ácido sulfúrico e baixa nas demais soluções agressivas. Díaz-Blanco et al. (2019) determinaram alguns parâmetros eletroquímicos do CRS com a incorporação de PET na forma de fibras e partículas retangulares, com percentuais de substituição de 3 %, 5 % e 8 % em relação ao volume da areia. No concreto com agregados de PET, foram obtidos valores de potencial de corrosão (E_{corr}) mais nobres (> -250 mV), em comparação com a amostra de controle, que manteve valores mais negativos (< -250 mV). Os valores de resistência de ruído eletroquímico (R_n) e R_p para as amostras com partículas retangulares e com a mistura de fibras e partículas retangulares de PET foram superiores a $2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, enquanto as amostras contendo apenas fibras apresentaram comportamento ligeiramente superior ao da amostra de controle, com valores entre 4×10^4 e $1,5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, respectivamente. Os

autores concluíram que existe relação entre a geometria, o tamanho e o percentual de PET e as propriedades eletroquímicas do CRS.

Silva et al. (Silva, de Brito e Saikia, 2013) estudaram a influência das condições de cura do concreto com agregados de PET em suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Os autores utilizaram três tipos de PET com dois percentuais de substituição (7,5 % e 15 %) dos agregados miúdos e graúdos. As amostras expostas à câmara úmida apresentaram os maiores valores de resistência à compressão, embora essa resistência tenha diminuído com o aumento do percentual de PET. Em geral, o concreto com agregados plásticos apresentou melhor comportamento frente à retração por secagem, especialmente em ambientes mais úmidos. Por outro lado, o coeficiente de difusão de cloretos aumentou ligeiramente com o aumento do percentual de PET, com valores entre $11,3 \times 10^{-2}$ m²/s e 16×10^{-2} m²/s, frente à amostra de controle de $10,1 \times 10^{-2}$ m²/s. Os valores das amostras curadas em ambiente de laboratório foram superiores aos das amostras curadas ao ar livre e em câmara úmida.

Segundo a literatura, é possível melhorar a durabilidade do RC quando agregados de PET são incorporados à mistura. Além disso, diversos inibidores naturais têm sido descritos como capazes de prevenir a corrosão do RS. Portanto, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa é estudar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Este projeto concentra-se no uso de NM como substituto da água de amassamento e de agregados de PET como substitutos do agregado miúdo. Para o estudo, foram utilizados dois elementos: mucilagem, obtida a partir de uma proporção nopal/água de 1:3, e PET (com três geometrias diferentes), com percentual de substituição de 3 % em relação ao volume da areia. A análise foi realizada por meio das técnicas f^c, HCP, EN e LPR.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

2.1 Materiais.

Neste trabalho, foi utilizado cimento Portland composto CPC-30R (tipo II segundo a norma ASTM C-150). O agregado graúdo, proveniente de pedra britada de origem local, possuía tamanho máximo de 20 mm; como agregado miúdo, utilizou-se areia de rio, e as barras de aço grau 42 embutidas no concreto possuíam diâmetro de 10 mm.

2.2 Projeto geométrico do PET reciclado.

O projeto das diferentes geometrias de PET baseou-se em estudos prévios dos autores (Díaz-Blanco et al., 2019). Foram coletadas garrafas de PET usadas, que foram lavadas com água para eliminar qualquer resíduo de líquido, poeira ou gordura. Após a secagem, o gargalo e o fundo das garrafas foram cortados. A parte central foi cortada em tiras até se obterem as frações SF, LF e P do PET reciclado. Para as SF, as dimensões foram de 2-3 mm de largura por 15 mm de comprimento; para as LF, de 0,5-1 mm de largura por 25 mm de comprimento; e, para as P, de 3-4 mm de largura e comprimento. Todo o procedimento foi realizado de forma manual e simples.

2.3 Procedimento de extração da NM.

Para determinar a concentração de NM, foram tomados como referência estudos prévios (Díaz Blanco et al., 2019). Folhas frescas de nopal foram coletadas e tiveram os espinhos removidos. Em seguida, foram lavadas para eliminar resíduos ou impurezas e cortadas em pedaços de 1 cm × 1 cm, sendo finalmente colocadas em um béquer com água na proporção de 1:3. A extração da NM foi realizada por maceração à temperatura ambiente no laboratório. Após 48 horas, a solução foi filtrada para remover os resíduos de nopal e utilizar a mucilagem como substituta da água de amassamento das amostras de concreto.

2.4 Dosagem das misturas de concreto.

A dosagem da mistura foi ajustada para uma resistência de projeto de 250 kg/cm². Portanto, o cimento, os agregados graúdos e miúdos e a água foram dosados para atingir essa resistência. O agregado de PET foi incorporado às diferentes misturas como substituto parcial do agregado miúdo, em uma proporção volumétrica areia-PET de 97 % - 3 %. O inibidor foi adicionado como substituto total da água de amassamento em todas as amostras contendo as diferentes geometrias de PET. Para as amostras de controle, utilizou-se relação água/cimento de 0,45. No caso das amostras com PET, utilizou-se relação mucilagem/cimento com o mesmo valor.

2.5 Concepção das amostras.

2.5.1 *Corpos de prova para ensaios de resistência à compressão.*

Foram concebidos corpos de prova cilíndricos a partir de tubos de PVC com as seguintes dimensões: 4,3 cm de diâmetro e 8,6 cm de altura, com relação altura/diâmetro igual a 2, conforme apresentado na Figura 1. Foram considerados os requisitos da norma ASTM C-39 (C-39, 2014) e da norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE para cada geometria de PET e para a amostra de referência.



Figura 1. Representação dos corpos de prova cilíndricos.

2.5.2 *Corpos de prova para os ensaios eletroquímicos.*

Para os ensaios eletroquímicos, os blocos foram concebidos mantendo-se um cobrimento de concreto de 3 cm (distância entre a face das barras de aço e a borda dos corpos de prova). As dimensões dos corpos de prova foram: 7 cm de largura, 10 cm de altura e 10 cm de comprimento. Três barras de aço da armadura foram embutidas no concreto, com área exposta (área em contato com a matriz de concreto) de 18 cm². Esse é o método padrão para a técnica EN: utilização de três eletrodos nominalmente idênticos (Cottis, 2001, 2008). A superfície de cada eletrodo de trabalho na interface concreto-atmosfera foi coberta com fita isolante. Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram parcialmente imersos em solução de cloreto de sódio a 3 %, simulando ambiente marinho, como a água do mar. Foi deixada uma diferença de 2 cm entre o nível da solução de cloreto de sódio e a parte superior dos blocos. A Figura 2 apresenta um dos corpos de prova preparados para o estudo eletroquímico.



Figura 2. Bloco de concreto com três barras de aço da armadura.

O procedimento de preparação de todos os corpos de prova cilíndricos e em forma de bloco foi muito semelhante, conforme descrito na Figura 3.

1. Todos os materiais sólidos foram misturados, incluindo a adição de PET.
2. Após a incorporação da água nas amostras de controle e do inibidor NM nas amostras com agregados de PET, todos os componentes foram misturados com o objetivo de obter uma mistura o mais homogênea possível. Todo o processo foi realizado à temperatura ambiente.
3. Foi utilizado óleo queimado para recobrir os moldes das amostras e garantir que, durante a desforma, não se formassem fissuras ou trincas e que os blocos e cilindros de concreto não se fragmentassem.
4. O lançamento do material foi realizado em camadas, com adensamento de cada uma delas, até completar duas camadas por corpo de prova.
5. No caso dos blocos de concreto, o processo de posicionamento das barras, lançamento e adensamento do concreto foi realizado simultaneamente.
6. No caso dos corpos de prova cilíndricos, garantiu-se seu nivelamento vertical e horizontal. A superfície superior dos corpos de prova foi regularizada, permanecendo lisa e livre de imperfeições.
7. Após 24 horas, todas as amostras foram colocadas em um recipiente com água durante 28 dias.

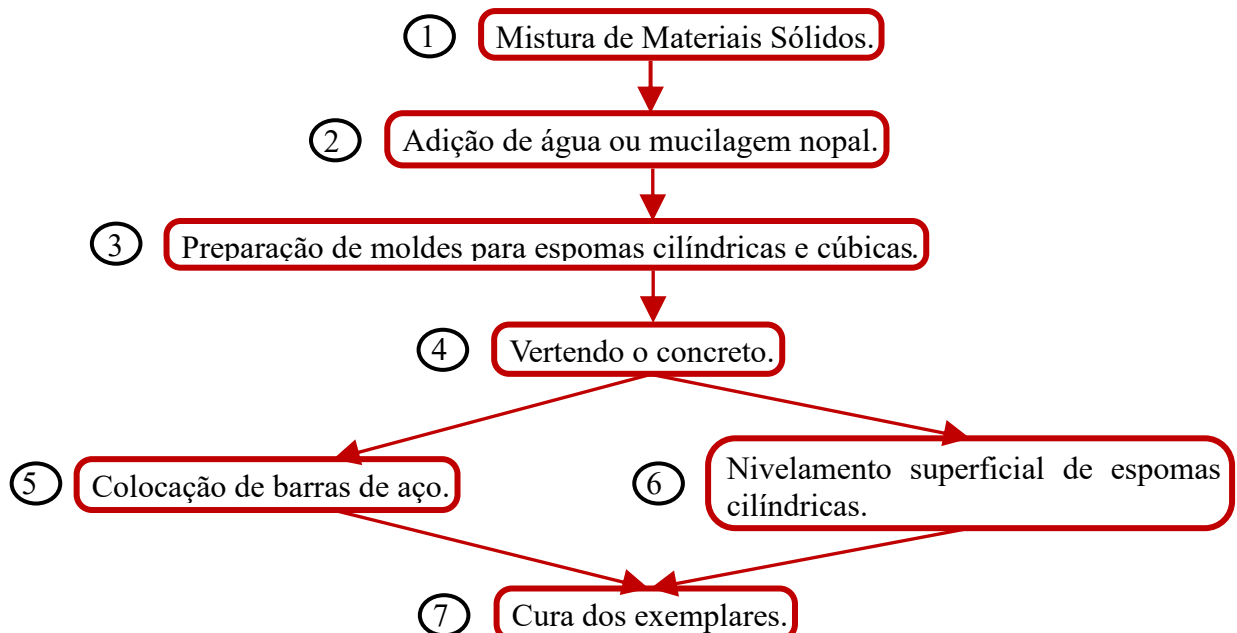


Figura 3. Procedimento esquemático adotado para a elaboração dos corpos de prova de concreto.

A Tabela 1 descreve as características e a nomenclatura de todas as amostras.

Tabela 1. Características das amostras.

Amostras	Tipo de agregado (PET e NM)	Tipo de ensaio	Nomenclatura
1	Sem agregados	Resistência à compressão	C-0
2	3 % de P de PET e NM em concentração de 1:3	Resistência à compressão	C-1
3	1,5 % de LF e 1,5 % de P de PET, e NM em concentração de 1:3	Resistência à compressão	C-2
4	3 % de SF de PET e NM em concentração de 1:3	Resistência à compressão	C-3
5	Sem agregados	Ensaio eletroquímico	E-0
6	3 % de P de PET e NM em concentração de 1:3	Ensaio eletroquímico	E-1
7	1,5 % de LF e 1,5 % de P de PET, e NM em concentração de 1:3	Ensaio eletroquímico	E-2
8	3 % de SF de PET e NM em concentração de 1:3	Ensaio eletroquímico	E-3

2.6 Técnica de resistência à compressão.

Os corpos de prova cilíndricos foram avaliados aos 28 dias de cura em uma máquina de ensaio de compressão até atingir sua carga máxima de ruptura, segundo a norma ASTM C-39 (C-39, 2014). Os corpos de prova foram posicionados com seus eixos alinhados aos eixos de carregamento do equipamento. A carga de ruptura foi registrada e, a partir dela, determinou-se a resistência do concreto dividindo-se a carga pela área da seção transversal do corpo de prova, conforme a equação 1:

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

em que: $f'c$ é a resistência à compressão do concreto em kg/cm^2 ; F é a carga máxima de ruptura registrada pelo equipamento, em kg; e A é a área da seção transversal da amostra, em cm^2 .

2.7 Aplicação das técnicas eletroquímicas.

A técnica HCP é uma ferramenta simples e amplamente utilizada para estudar a corrosão do CRS (Kim et al., 2014; Leelalerkiet et al., 2004; Yodsudjai e Pattarakittam, 2017). Entretanto, apresenta a limitação de não fornecer informações sobre a velocidade e o mecanismo de corrosão (Ghorbani et al., 2019). Foram realizadas leituras de Ecorr das três barras de cada amostra, registrando-se seu valor médio. As medições foram realizadas com eletrodo saturado de calomelano (SCE) como eletrodo de referência e multímetro para registro dos valores. A partir dos valores de HCP e conforme estabelecido na ASTM C876 (C876-09, 2009), segundo o critério de probabilidade de corrosão, foram definidos três intervalos que relacionam ambos os parâmetros. A zona 1 apresenta probabilidade de corrosão de 10 % para valores mais positivos que -125 mV; a zona 2 abrange valores entre -125 mV e -276 mV (zona de incerteza); e a zona 3, com probabilidade de corrosão de 90 %, corresponde a valores mais negativos que -276 mV (Taji et al., 2018).

Conforme descrito por Cottis (2001, 2008), o procedimento padrão e mais utilizado para aplicar a

técnica EN consiste no uso de três eletrodos nominalmente idênticos. Foram registradas simultaneamente as flutuações do ruído em potencial e da corrente durante 1024 s, com frequência de amostragem de 1 Hz. Os resultados foram obtidos a partir das três amostras que contribuíram para o ruído (em triplicata). Para analisar os dados obtidos, a tendência das séries temporais de corrente e potencial foi removida pelo método de regressão linear (Mansfeld, Sun e Hsu, 2001). Numerosos estudos sobre concreto armado relatam o uso da técnica LPR para analisar a corrosão do aço da armadura (Clément et al., 2012; Samson et al., 2018). Os resultados dessa técnica foram obtidos em triplicata; em seguida, calculou-se o valor médio, que foi representado nos gráficos. Nesta pesquisa, aplicou-se uma varredura de potencial de 30 mV a uma velocidade de 10 mV/min. A polarização de baixo campo é não intrusiva, e valores na faixa de 10 a 30 mV têm sido reportados (Alghamdi e Ahmad, 2014; Nguyen et al., 2018; Papavinasam, 2008). A partir da inclinação formada pelos valores de potencial aplicados em torno de E_{corr} e da resposta de corrente obtida, é possível determinar R_p (Zhou et al., 2018), conforme indicado na equação a seguir (Mitzithra et al., 2015; Papavinasam, 2008):

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

Na Figura 4, apresenta-se o arranjo da célula eletroquímica utilizada para o estudo do RC.

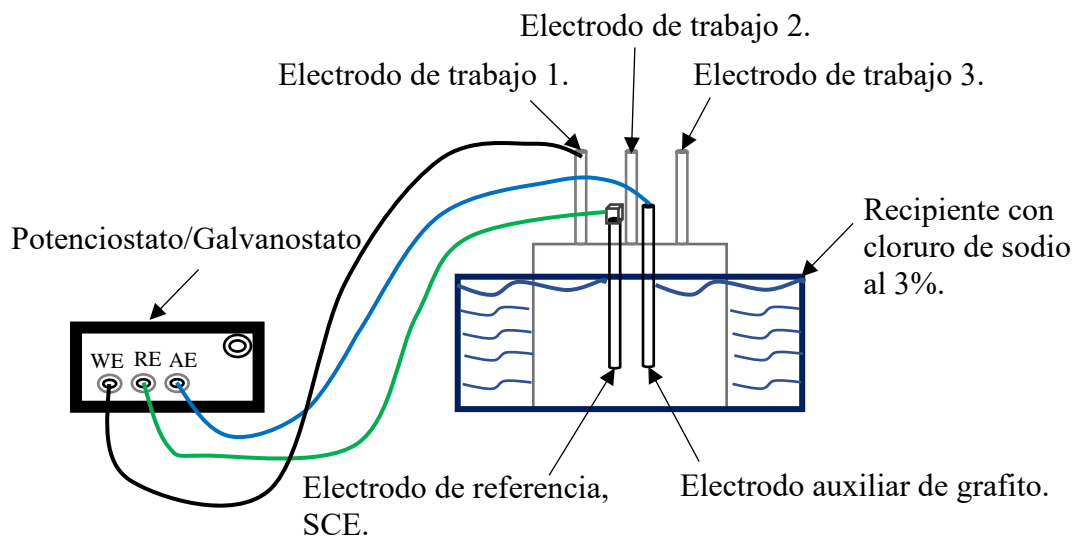


Figura 4. Representação da célula eletroquímica do RC para a medição de LPR.

2.8 Procedimento para calcular a velocidade de corrosão.

A I_{corr} do CRS foi determinada segundo a equação 3 (Nguyen et al., 2018; Zhou et al., 2018). Em diversos estudos, tem sido adotado valor de B igual a 26 mV (Papavinasam, 2008) e, neste trabalho de pesquisa, adotou-se o mesmo valor para o cálculo de I_{corr} .

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

em que: I_{corr} é a velocidade de corrosão expressa em termos de densidade de corrente de corrosão, em $\mu A/cm^2$; B é a constante de proporcionalidade relacionada às inclinações de Tafel (anódica e catódica); e R_p é a resistência de polarização.

Considerando estudos prévios que demonstram a equivalência entre os valores de R_n e R_p (Díaz Blanco et al., 2019), os valores de I_{corr} foram determinados a partir de R_n , conforme a equação 3.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

3.1. Resistência à compressão.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de três amostras para cada geometria de PET com NM, em comparação com as amostras de controle.

Tabela 2. Valores médios de $f'c$ aos 28 dias de cura.

Amostras	$f'c$ (kg/cm ²)
C-0	248,9
C-1	231,1
C-2	238,5
C-3	233,0

Como se pode observar, o maior valor de $f'c$ para as amostras com agregados foi obtido na amostra C-2, com 238,5 kg/cm², principalmente devido ao efeito das fibras longas na matriz de concreto, que atuam como elemento de controle na formação e propagação de fissuras e trincas (Foti, 2013; Foti e Paparella, 2014). As amostras C-3 e C-1 seguem em ordem decrescente quando comparadas à amostra de controle, que apresenta valor médio de 248,9 kg/cm² em relação à resistência de projeto de 250 kg/cm². Esses valores de resistência são consequência da ação da NM, que retarda a pega do cimento (Martínez-Barrios et al., 2025). A NM pode reter água no interior do concreto, pois a parte hidrofílica dos polímeros captura pequenas partículas de água e desacelera o processo de hidratação do cimento (Martínez-Barrios et al., 2025).

Além disso, o bom desempenho das fibras pode ser observado ao compará-las com as partículas conformadas: a amostra C-2, contendo 1,5 % de LF e 1,5 % de P, alcançou os maiores valores de resistência em comparação com as amostras C-1 e C-3, que contêm 3 % de P e 3 % de SF, respectivamente. Diversos estudos confirmam o efeito positivo das fibras de PET, em comparação com outros tipos de partículas, sobre as propriedades de resistência à compressão (Bahij et al., 2020).

3.2. Potencial de meia-célula.

Estudos prévios demonstraram que, à medida que diminuía a concentração de PET em suas diferentes configurações geométricas, o efeito protetor sobre o aço tornava-se mais significativo ao longo do tempo (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). O gráfico a seguir ilustra o efeito da redução dos percentuais de PET e o efeito da NM sobre as propriedades eletroquímicas do aço da armadura, conforme apresentado na Figura 5.

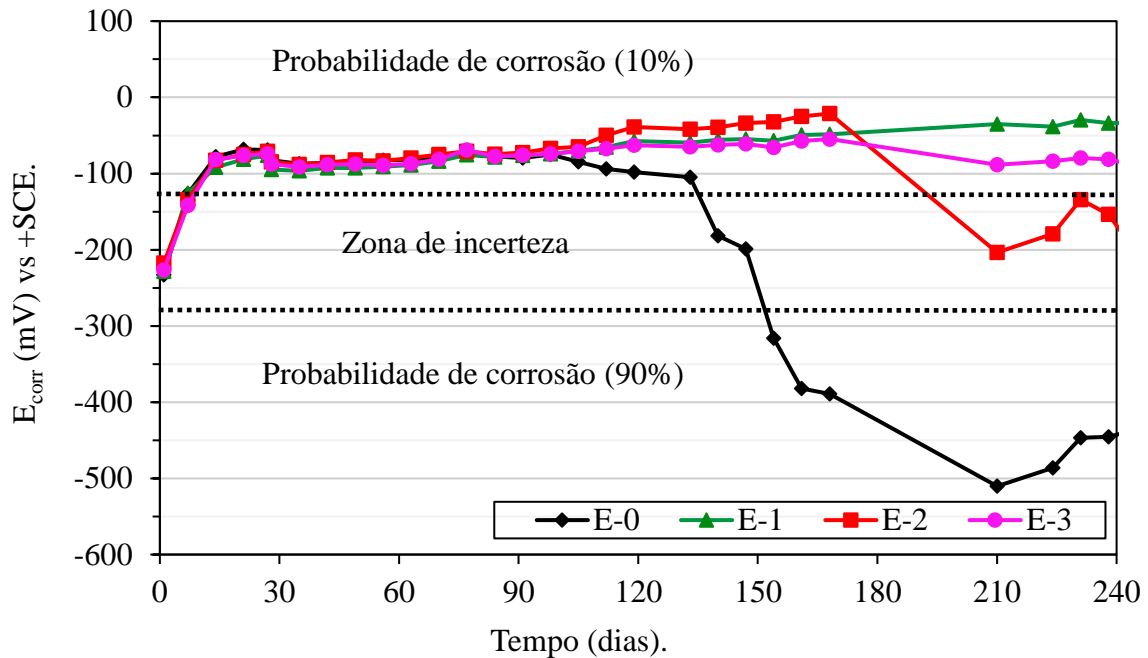


Figura 5. Valores de E_{corr} para as amostras de concreto expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3 %.

Durante os primeiros 28 dias de cura do concreto, observa-se uma mudança brusca dos valores de potencial em direção a valores mais positivos, relacionada ao processo de cura do concreto e à passivação do aço da armadura (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). Com esses valores de potencial, o aço da armadura encontra-se completamente passivado, situando-se em uma zona com probabilidade de corrosão de 10 %.

Durante os três primeiros meses de ensaio, todos os valores foram semelhantes. Entretanto, conforme as amostras permaneceram por mais tempo expostas à solução agressiva de cloreto de sódio a 3 %, a amostra de controle (E-0) começou a perder suas propriedades protetoras e seus valores de E_{corr} tornaram-se mais negativos (Martínez-Barrios et al., 2025), chegando a valores de até -500 mV após 210 dias de exposição (zona de probabilidade de corrosão de 90 %).

Além disso, as amostras E-1 e E-3 permaneceram na zona de probabilidade de corrosão de 10 % até 240 dias, o que demonstra o efeito positivo das partículas de PET e das fibras curtas combinadas com a NM como barreira física sobre as propriedades eletroquímicas do concreto. A adição de NM bloqueia parcialmente os poros da matriz de concreto, reduzindo a difusão de agentes agressivos (Pattusamy et al., 2023). Da mesma forma, a mucilagem de nopal retém a umidade por mais tempo. Diversos estudos mostram que os polissacarídeos presentes na NM são higroscópicos, diminuindo a perda de umidade do material (Chandra, Eklund e Villarreal, 1998; Martínez-Barrios et al., 2025). Além disso, a NM atua reduzindo a porosidade do material e obstruindo os poros, o que impede o transporte de água e agentes agressivos, como íons cloreto, para o interior do concreto (Torres-Acosta e Alejandra Díaz-Cruz, 2020).

Por fim, a amostra E-2, contendo 1,5 % de LF e 1,5 % de P, manteve comportamento aceitável próximo à zona de incerteza, embora também tenha registrado valores mais positivos que a amostra E-0.

3.3. Ruído eletroquímico.

Por meio da análise de EN, foram determinados os valores do desvio padrão da corrente e os valores de R_n . A Figura 6 apresenta os resultados obtidos ao dividir o desvio padrão do ruído de tensão σ_v pelo desvio padrão do ruído de corrente σ_i , resultando no valor de R_n .

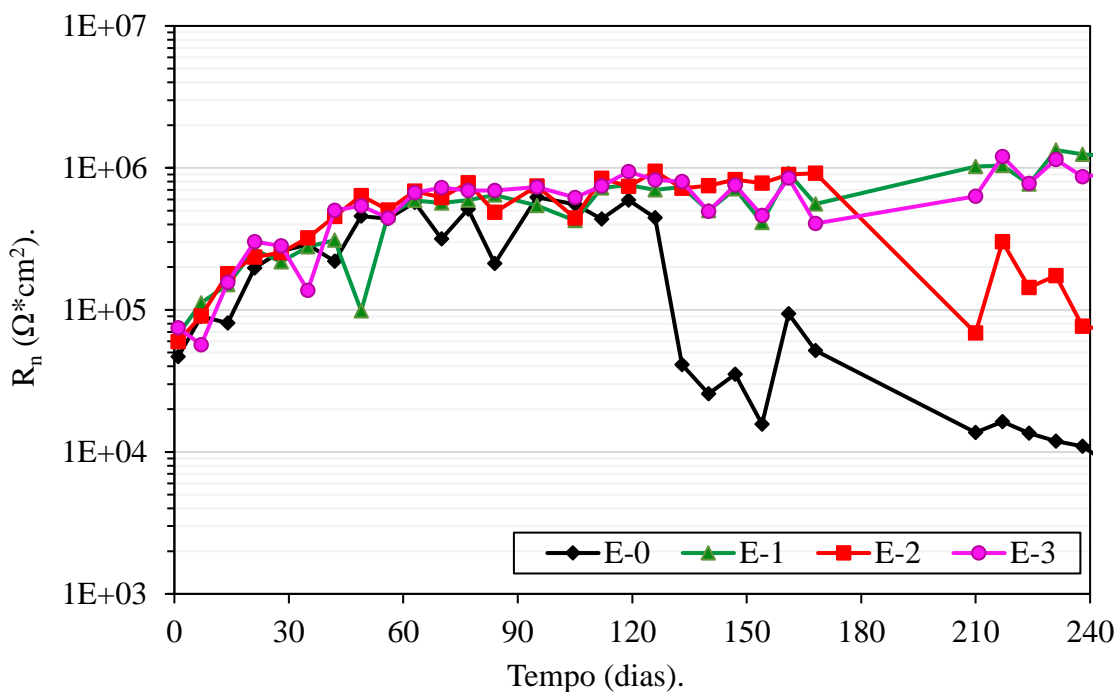


Figura 6. Valores de R_n para as amostras de concreto expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3 %.

Durante os primeiros meses, os corpos de prova apresentaram aumento de R_n , relacionado ao processo de cura do concreto e à formação de um filme de óxido protetor na superfície do aço, superando $500.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Entre os dias 130 e 160, observou-se queda brusca dos valores de R_n , sobretudo na amostra E-0, com flutuações ao longo desse período, demonstrando que o início da corrosão ativa do aço não se deve a uma única alteração, mas a uma sequência de eventos severos. Durante esse período, as demais amostras mantiveram valores de R_n muito elevados, próximos de $750.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, em consonância com estudos prévios (Díaz-Blanco et al., 2019; Díaz Blanco et al., 2019). Vários estudos indicaram que a NM atua tamponando os poros do concreto, retardando a penetração de cloretos pela matriz de concreto pela formação de uma ligação química entre as pectinas e as moléculas de cloreto/água (Torres-Acosta, 2007).

Com o aumento do tempo de exposição das amostras ao meio agressivo, observa-se redução dos valores de R_n na amostra E-2, que alcançam aproximadamente $100.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mantendo-se significativamente acima dos valores da amostra E-0. Por outro lado, as amostras E-1 e E-3, contendo 3 % de P de PET e NM, e 3 % de SF e NM, respectivamente, mantêm valores de R_n que chegam a $1.000.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Díaz Blanco et al. (2019) relataram o efeito das partículas de PET como barreira física no interior da matriz de concreto, impedindo a penetração de agentes agressivos pela rede de poros do concreto. Esse efeito é menos pronunciado na amostra E-2, que contém 1,5 % de LF, 1,5 % de P e NM, confirmando que a geometria do PET exerce efeito significativo sobre as propriedades eletroquímicas do concreto e sobre a proteção do aço. A NM, por sua vez, aumentou significativamente os valores de R_n de todas as amostras que a continham. Esse comportamento respalda a teoria de que a NM inibe a corrosão das barras de armadura expostas a um meio agressivo com cloretos (Torres-Acosta, 2007).

3.4. Resistência à polarização linear.

Os resultados obtidos pela técnica de LPR são apresentados na Figura 7. Durante os três primeiros meses de ensaio, observou-se aumento considerável de R_p ; esses valores são semelhantes aos de R_n , associados à formação de uma camada passiva sobre o aço no interior da matriz de concreto. Com o aumento do tempo de exposição ao meio agressivo de cloreto de sódio, ocorreu queda brusca dos valores de R_p , sobretudo na amostra E-0, que não continha inibidor nem agregados de PET. As demais amostras mantiveram valores de R_p superiores a $100.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, em comparação com os valores da amostra E-0, que ao final do período de ensaio mal superavam $30.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Destacase o efeito inibidor da NM e o efeito protetor das P e das SF (E-1 e E-3), uma vez que, em vários pontos, seus valores de R_p alcançaram $1.000.000 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

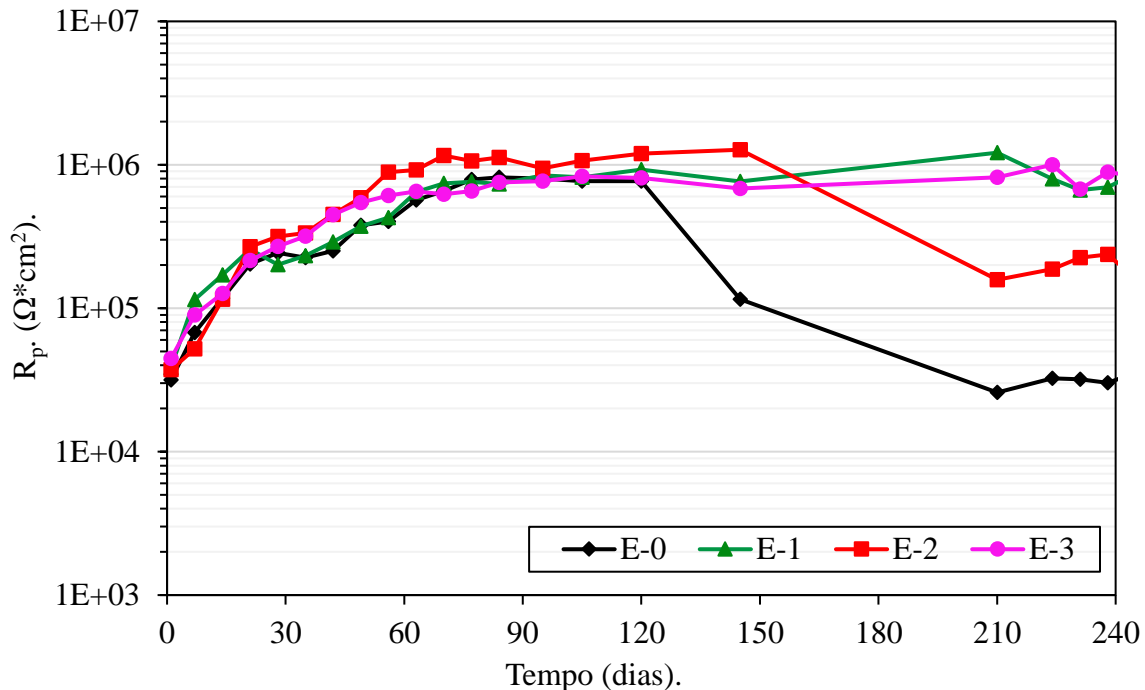


Figura 7. Valores de R_p para as amostras de concreto expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3 %.

Segundo o Comitê 201 da ACI (ACI, 2008), a formação de trincas e fissuras no concreto pode provocar aumento da velocidade de penetração dos íons cloreto, enquanto sua penetração por difusão é mais lenta. Nesse sentido, a introdução de fibras de PET no concreto pode atuar como reforço da matriz, limitando a formação de trincas e fissuras. Isso pode reduzir o acesso de íons agressivos ao concreto, bem como o início e a propagação da corrosão. Além disso, algumas propriedades da NM tiveram efeito significativo nesses valores de R_p , como a viscosidade, que melhora a trabalhabilidade e a homogeneidade da mistura no concreto (León-Martínez et al., 2014), a redução da porosidade do concreto (Martínez-Barrios et al., 2025) e sua função como bloqueador de poros (Pattusamy et al., 2023).

3.5. Velocidade de corrosão.

As Figuras 8 e 9 apresentam os valores de I_{corr} para todas as amostras de concreto, com e sem inibidor e agregados de PET.

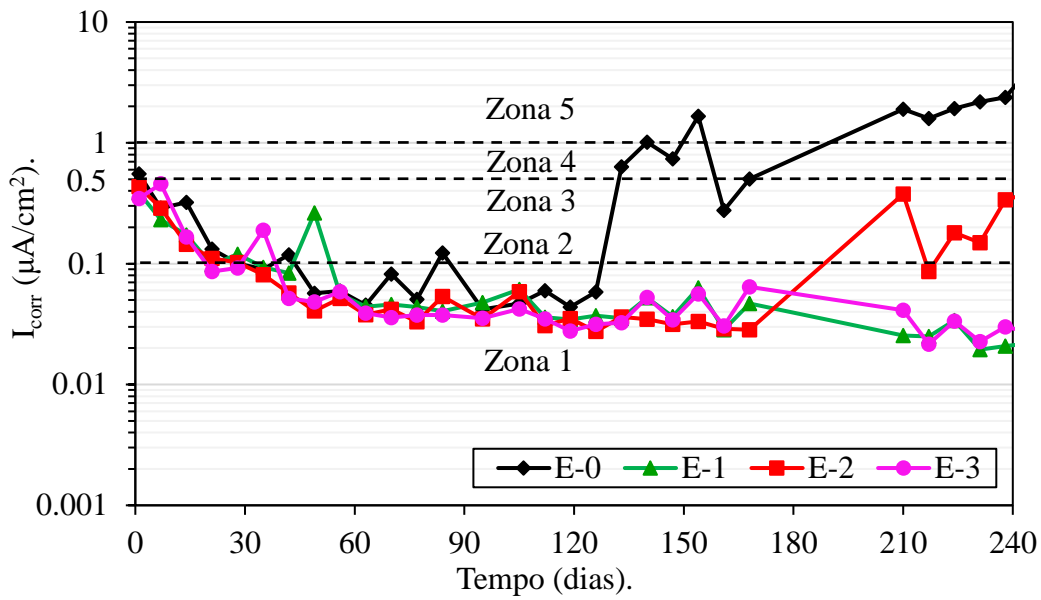


Figura 8. Valores de I_{corr} obtidos a partir de R_n para as amostras de concreto expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3 %.

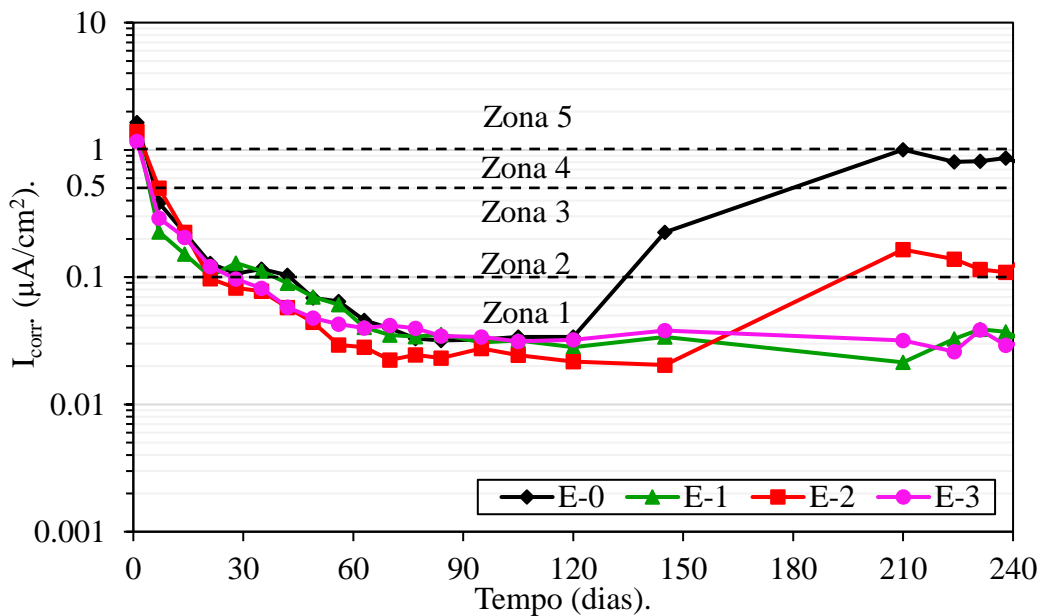


Figura 9. Valores de I_{corr} obtidos a partir de R_p para todas as amostras de concreto expostas a uma solução de cloreto de sódio a 3 %.

No início da fase de cura do concreto, as amostras apresentavam velocidades de corrosão variando entre muito altas (zona 5) e altas (zona 4). Durante essa fase inicial, todos os componentes do concreto reagiram com a água e com a NM adicionada para formar os diversos compostos que conferem alcalinidade, resistência e durabilidade ao material. Ao final do processo de cura de 28 dias, os valores de I_{corr} diminuíram em uma ordem de grandeza, aproximando-se das zonas 1 e 2, caracterizadas por velocidades de corrosão insignificantes e baixas. Nessa faixa, é possível que o aço já tivesse desenvolvido estado de passividade devido à presença de umidade, oxigênio e meio altamente alcalino (Hansson, 1984).

Ao final do período de ensaio, observou-se que as amostras E-1 e E-3 mantiveram valores muito baixos de I_{corr} na zona 1, relacionados à passividade do aço durante período mais prolongado. Tanto a NM quanto as SF e P de PET proporcionaram ao concreto dupla proteção, impedindo que os íons cloreto alcançassem o aço e mantendo no concreto fatores como umidade, oxigênio e alcalinidade por mais tempo.

Em ambos os gráficos, observa-se semelhança nos resultados obtidos, pois mantêm a mesma tendência ao longo do tempo.

3.6. Observação visual das barras de aço.

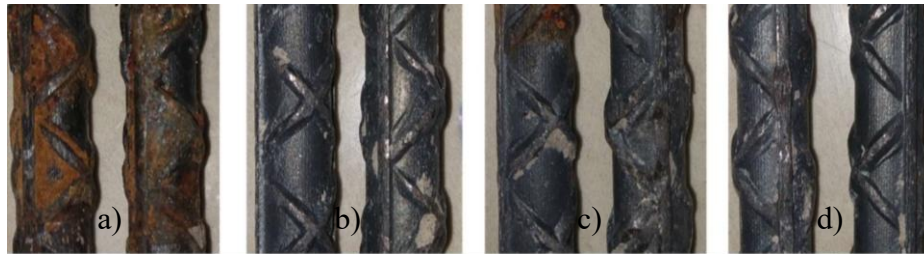


Figura 10. Barras de aço extraídas do concreto após 240 dias de exposição a uma solução de cloreto de sódio a 3 %: a) amostra E-0, b) amostra E-1, c) amostra E-2 e d) amostra E-3.

Como mostrado na Figura 10, observaram-se produtos de corrosão de coloração avermelhada em mais de 80 % da superfície metálica da amostra E-0. Por outro lado, o ataque por íons cloreto, que provoca a despassivação do aço e, conseqüentemente, a perda de suas propriedades protetoras, foi menos pronunciado nas demais amostras, sobretudo nas amostras E-1 e E-3, que apresentaram tonalidade cinza metálica em toda a superfície do aço. No caso da amostra E-2, contendo 1,5 % de LF-PET, 1,5 % de P-PET e NM, observaram-se apenas pequenas áreas de óxido, caracterizadas como zonas de corrosão menores.

4. CONCLUSÕES.

A partir da análise dos resultados do comportamento eletroquímico e mecânico do concreto com incorporação de PET e NM, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

Todas as amostras (C-1, C-2 e C-3) alcançaram valores adequados de f'_c , considerando os percentuais de PET, as geometrias utilizadas e a concentração de NM. Em particular, a amostra C-2, com adição de LF e P, alcançou o valor mais próximo ao da amostra de controle C-0.

Em geral, todas as amostras com inibidor de NM e agregados de PET apresentaram valores de E_{corr} menos negativos que a amostra de controle (E-0), de modo que o aço permaneceu em estado passivo por mais tempo. O efeito barreira do PET e algumas propriedades da NM, como viscosidade e composição, proporcionaram ao concreto maior durabilidade frente a agentes agressivos, como íons cloreto.

Os valores de R_n e R_p apresentaram tendência semelhante. Esses resultados respaldam o uso de ambas as técnicas para avaliar o comportamento do aço da armadura no concreto. As amostras E-1 e E-3 apresentaram os maiores valores de R_n e R_p , o que confirma o bom desempenho do material compósito projetado.

A I_{corr} manteve valores insignificantes de velocidade de corrosão em todas as amostras com agregados. Além disso, as barras de aço extraídas das amostras evidenciaram visualmente o efeito protetor de ambos os compostos (PET e NM).

5. AGRADECIMENTOS.

Este trabalho contou com o apoio de uma bolsa de pós-doutorado da Secretaria de Educação, Ciência, Humanidades, Tecnologia e Inovação (SECIHTI) e do Conselho Nacional de Humanidades, Ciência e Tecnologia (CONAHCYT) do México.

6. REFERÊNCIAS.

- 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 Sarfa, 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., Rocabrano-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., Rocabrano-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 Corrosion Inhibitors for Steel Reinforcement in Concrete — A Review.*” *Surface Review and Letters*. 22(3). <https://doi.org/10.1142/S0218625X15500407>.
- Sadromomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., and Sadeghi-Nik, A. (2015), “*The Combined Effects of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Particles and Pozzolanic 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>.