

Efeito do método de dosagem e da espessura do cobrimento do concreto armado sobre a relação entre a resistividade e a velocidade de corrosão em condições de exposição marinha natural.

J. A. Briceño-Mena^{1,2} , M. Soria-Castro^{1,2} , E. J. Pérez-García³,
D. Nieves-Mendoza⁴ , P. Castro-Borges^{1*} 

*Autor de Contato: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1116>

Recebido: 01/07/2026 | Correções recebidas: 28/08/2026 | Aceito: 31/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEO

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do método de dimensionamento do concreto e da espessura do cobrimento sobre a correlação entre a resistividade e a taxa de corrosão. Para tanto, corpos de prova de concreto armado com dimensionamento volumétrico (M1) e dimensionamento por compactação de agregados (M2) foram expostos a um ambiente marinho tropical, e os parâmetros eletroquímicos foram medidos periodicamente. Os resultados mostraram equivalência entre os dois métodos quando o aço foi mantido em estado passivo durante o período de estudo. Contudo, observou-se uma discrepância no ajuste da correlação ρ -icorr: com o aumento da espessura do cobrimento, o ajuste se desviou das equações teóricas em M1 e se aproximou delas em M2. Ao aplicar as equações, deve-se atentar a todas as condições que envolvem o elemento, a fim de evitar a superestimação da corrosão nos estágios iniciais.

Palavras-chave: corrosão, resistividade elétrica, taxa de corrosão, correlação, exposição marinha natural.

Citar como: Briceño-Mena, J. A. Soria-Castro, M., Pérez-García, E. J., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P. (2026), “Efeito do método de dosagem e da espessura do cobrimento do concreto armado sobre a relação entre a resistividade e a velocidade de corrosão em condições de exposição marinha natural.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 521 – 535, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1116>

¹ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua carretera a Progreso, Mérida, 97310, México.

² Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México 03940, México.

³ Ministerio de la Construcción de Cuba, La Habana 10699, Cuba.

⁴ Facultad de Ingeniería Civil-Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz 91000, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Briceño-Mena contribuiu com a experimentação (50%), o desenvolvimento de um modelo (50%), a coleta de dados (100%), a redação do trabalho (50%) e a discussão dos resultados (30%); a autora Soria-Castro, com a experimentação (50%) e a discussão dos resultados (20%); o autor Pérez-García, com a construção dos corpos de prova (80%) e a discussão dos resultados (10%); o autor Nieves-Mendoza, com a construção dos corpos de prova (20%) e a discussão dos resultados (10%); e o autor Castro-Borges, com a ideia original (100%), o desenvolvimento de um modelo (50%) e a redação do trabalho (50%), além da discussão dos resultados (30%).

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/)).

Effect of the mix design method and concrete cover thickness of reinforced concrete on the relationship between resistivity and corrosion rate under natural marine exposure conditions.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of the design method and concrete cover on the correlation between resistivity and corrosion rate. Reinforced concrete specimens—prepared using a volumetric design (M1) and an aggregate packing method (M2)—were exposed to a tropical marine environment, with electrochemical parameters measured periodically. The results indicated that both methods were equivalent in maintaining the steel in a passive state throughout the study period. However, a disparity was observed in the ρ - i_{corr} correlation fits: as the cover thickness increased, the fit for M1 diverged from theoretical equations, whereas the fit for M2 converged with them. When applying equations, attention must be paid to all conditions affecting the structural element to avoid overestimating corrosion during the initial stages.

Keywords: corrosion, electrical resistivity, corrosion rate, correlation, natural marine exposure.

Efecto del método de dosificación y del espesor de recubrimiento del concreto reforzado sobre la relación entre la resistividad y la velocidad de corrosión en condiciones de exposición marina natural

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto del método de diseño y del recubrimiento de concreto sobre la correlación entre la resistividad y la velocidad de corrosión. Para ello, se expusieron probetas de concreto reforzado con un diseño volumétrico (M1) y un empaquetamiento de agregados (M2) en un ambiente marino tropical, y se midieron periódicamente los parámetros electroquímicos. Los resultados mostraron equivalencia entre ambos métodos al mantener el acero en estado pasivo durante el período estudiado. Sin embargo, en los ajustes de la correlación ρ - i_{corr} se encontró una disparidad: al aumentar el recubrimiento, en M1 el ajuste se alejaba de las ecuaciones teóricas y en M2 se acercaba. Al aplicar ecuaciones, se debe prestar atención a todas las condiciones que involucren al elemento para no sobreestimar la corrosión en etapas iniciales.

Palabras clave: corrosión, resistividad eléctrica, velocidad de corrosión, correlación, exposición marina natural

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.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço das armaduras no concreto, induzida por agentes agressivos como os cloretos, é o tipo de deterioração mais comum em infraestruturas localizadas em ambientes marinhos tropicais (Qu et al., 2021). As evidências da literatura sobre o ambiente agressivo da costa de Yucatán, localizada no Golfo do México, permitem considerar esse local como um laboratório natural de corrosividade atmosférica extrema (Maldonado & Veleza, 1999). Diante desse cenário, a durabilidade do concreto armado é fundamental e é determinada pela resistência ao fluxo de íons através da microestrutura cimentícia (Abraham & Mathew, 2021; Azarsa & Gupta, 2017). Por esse motivo, a necessidade de controlar variáveis como a relação água/cimento (a/c), a resistividade e a espessura do cobrimento é essencial para prolongar a vida útil e manter o desempenho adequado das estruturas (Balestra et al., 2019; Castañeda Valdés et al., 2024). Nessas circunstâncias, a utilização de parâmetros de durabilidade tem se tornado cada vez mais frequente em normas nacionais e internacionais, como a NMX-C-530 (2017), no caso do México. Nessa norma, destaca-se a resistividade elétrica como um critério fundamental de desempenho, capaz de refletir a interação entre as características intrínsecas do material e as variações do ambiente.

Historicamente, a resistividade tem servido como parâmetro de referência para a avaliação da cinética eletroquímica. Diversos autores formalizaram relações matemáticas baseadas na resistividade, como Andrade (1988), que propõe estimar a velocidade de corrosão por meio da relação $i_{\text{corr}} = 26 \rho^{-1}$ que, em sua forma matemática, segue a estrutura $y = A\rho^B$. Entretanto, as evidências indicam que essa correlação inversa, conhecida como relação R-C, não é universal (Torres-Acosta, 2024). A influência da umidade, da temperatura, da concentração de íons e das propriedades do material modifica de maneira não linear as propriedades elétricas resistivas e a atividade na interface aço-concreto (Zhang et al., 2021). Adicionalmente, fatores químicos, como a natureza do material cimentício e o pH da solução dos poros, podem afetar essa correlação. Por exemplo, uma redução do pH aumenta a resistividade do material durante os processos de carbonatação e, simultaneamente, acelera a corrosão ao reduzir a relação $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, modificando completamente as curvas teóricas (Tian & Ye, 2022). Além disso, sob condições de corrosão ativa, as velocidades de corrosão apresentam maior flutuação do que aquela observada na resistividade, aumentando a margem de incerteza das estimativas teóricas (Pedrosa & Andrade, 2021; Rodrigues et al., 2021).

O exposto anteriormente evidencia a necessidade de utilizar modelos calibrados em condições de exposição semelhantes, sejam elas condições reais, laboratoriais, de longa duração ou de curto prazo. Além disso, esses modelos podem apresentar baixa precisão caso seja desconsiderada a influência do projeto geométrico, das dosagens ou da posição espacial (Briceño-Mena et al., 2019; Koleva et al., 2008). Em primeira instância, a espessura do cobrimento atua como uma barreira física capaz de retardar o início da corrosão, enquanto a relação a/c pode determinar a rede de poros interconectados por meio da qual são transportados os agentes agressivos. A correlação entre a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão não depende exclusivamente de uma única propriedade, mas de um conjunto de fatores que, em determinadas situações, podem modificá-las simultaneamente ou em sentidos opostos. Os autores mencionados na Tabela 1 apresentam alguns fatores nos quais se observa influência sobre a resistividade e a corrosão do aço, uma vez que são precisamente esses fatores que originam a dispersão observada nos modelos teóricos. Alguns desses parâmetros alteram a resistividade e a corrosão no mesmo sentido, enquanto outros atuam em sentidos opostos. Por exemplo, o grau de saturação, mencionado por Kim (2026) e Zhang (2021), e a relação a/c, mencionada por Azarsa e Gupta (2017), exercem influência em sentidos opostos: à medida que aumentam, reduzem a resistividade e aumentam o risco de corrosão. A carbonatação, por outro lado, atua simultaneamente sobre ambos os fenômenos: aumenta a resistividade e eleva o risco de corrosão, conforme mencionado por Azarsa e Gupta (2017).

Tabela 1. Parametros ambientais e do material que influem na correlação entre corrosão e resistividade do concreto.

Autor	Parâmetro	Efeito sobre a resistividade	Efeito sobre a corrosão
(Kim et al., 2026) (Zhang et al., 2021)	Grau de saturação	Diminui exponencialmente com o aumento do grau de saturação (R^2 entre 0,896 e 0,997).	Aumenta o risco de corrosão. Favorece a migração de cloretos.
(Morris et al., 2004) (Liu et al., 2024)	Concentração de cloretos	Quando a resistividade elétrica do concreto aumenta entre 2 e 100 $k\Omega \cdot cm$, o valor limite passa de 0,44% para 2,32%.	Diminui a inclinação anódica de Tafel à medida que a concentração aumenta para qualquer valor (acima de 0%).
(Morris et al., 2004) (Le et al., 2021)	Temperatura	Afeta a saturação dos poros e, consequentemente, a resistividade. Com o aumento da temperatura, a resistividade diminui.	Influencia a cinética eletroquímica.
(Azarsa & Gupta, 2017)	Relação água/cimento	Quanto maior a relação a/c, menor a resistividade devido à maior porosidade.	Maior suscetibilidade à corrosão.
(Azarsa & Gupta, 2017)	Carbonatação	Forma um perfil de resistividade em múltiplas camadas	Altera os mecanismos de corrosão.

A Tabela 2 apresenta as correlações empíricas relatadas na literatura, elaboradas a partir das informações fornecidas por Torres-Acosta (2024). O critério de ordenação da tabela foi decrescente, com base nos coeficientes de correlação (R^2), utilizados como indicadores da confiabilidade do modelo. Diferentemente do expoente, que indica a tendência, e do coeficiente (multiplicador), que indica a magnitude, o R^2 é relevante para a decisão sobre qual equação utilizar. Observa-se na tabela que, em ambiente marinho, o R^2 diminui para 0,43. Isso pode ser atribuído, em parte, às condições internas de umidade e temperatura, combinadas com a movimentação dos cloretos decorrente de diferentes mecanismos de penetração, os quais influenciam o grau de saturação dos poros e até mesmo o desenvolvimento da porosidade, como resultado do processo contínuo de endurecimento do concreto. Por outro lado, em ambientes sujeitos à carbonatação, a estimativa alcança uma confiabilidade bastante elevada, próxima de 1 ($R^2 = 0,93$). Isso pode ser atribuído ao fato de que a carbonatação reduz consideravelmente a porosidade efetiva e aumenta a densificação do concreto, favorecendo uma tendência a valores de resistividade mais estáveis ao longo do tempo.

Além disso, como uma nova aproximação teórica generalizada, Torres-Acosta (2024) propõe utilizar a equação obtida a partir da integração dos diversos estudos discutidos na Tabela 2.

Tabela 2. Equações de correlação entre resistividade e velocidade de corrosão propostas por diversos autores.

Autor	Condição de exposição	Corpos de prova	Material cimentício	Relação a/c	Método de medição de i_{corr}	Método de medição de ρ	Equação ajustada	R ²
(Hornbostel et al., 2017)	Imersão em solução salina	Prismas de argamassa armada	Com substituições por cinza volante	0.4 y 0.55	Corrente galvânica	Medidor LCR (indutância, capacitância e resistência)	$i_{corr} = 208.27 \cdot \rho^{0.603}$	0.4263
(Rodriguez et al., 1993)	Ambiente marinho natural	Estruturas reais de concreto armado	-	-	Resistência à polarização linear	Equipamento de fabricação própria com anel de guarda e sensores	$i_{corr} = 2.8785 \cdot \rho^{0.766}$	0.5027
(Andrade, 2018)	Cloruros Cloretos	Concreto de alta qualidade	-	-	-	Método direto/método de Wenner	$i_{corr} = 207.68 \cdot \rho^{1.335}$	0.6188
(Presuel-Moreno et al., 2018).	Ciclos de umedecimento-secagem em solução salina/ambiente marinho natural	Prismas de concreto armado	Com substituições por cinza volante e sílica ativa	Varias	Resistência à polarização	Direto	$i_{corr} = 7.6144 \cdot \rho^{1.058}$	0.822
(Torres-Acosta et al., 2005).	Ciclos de umedecimento-secagem em solução salina	Prismas de concreto armado	Com substituições por nopal e aloe	-	Resistência à polarização linear	-	$i_{corr} = 24.965 \cdot \rho^{1.439}$	0.8484
Geiker et al.	Carbonatação acelerada	Prismas de concreto	-	-	Corrosímetro comercial	Corrosímetro comercial	$i_{corr} = 26.378 \cdot \rho^{0.959}$	0.9225
(Torres-Acosta & González-Calderón, 2021)	Carbonatação natural	Argamassas	-	-	Resistência de polarização	Resistência elétrica	$i_{corr} = 16.452 \cdot \rho^{0.919}$	0.9395
(Torres-Acosta, 2024)	Todas as condições anteriores						$i_{corr} = 7.1 \cdot \rho^{-0.81}$	0.7813

Efeito do método de dosagem e da espessura do cobrimento do concreto armado sobre a relação entre a resistividade e a velocidade de corrosão em condições de exposição marinha natural.

A dependência e a conveniência da utilização dos valores de resistividade para inferir velocidades de corrosão têm aumentado, razão pela qual, em muitos estudos, tem sido proposto o mesmo tipo de equação discutida anteriormente, porém com diferentes coeficientes de correlação associados às propriedades do concreto armado e às condições de exposição, os quais não podem ser facilmente discriminados ao se compararem diferentes tipos de estudos. Como consequência, ainda não é possível estabelecer uma lei que permita correlacionar a resistividade com a velocidade de corrosão com 100% de confiabilidade, pelo menos enquanto não houver uma quantidade maior de dados disponíveis.

Atualmente, a maioria dos estudos disponíveis foi desenvolvida em condições controladas e laboratoriais, o que tende a simplificar os mecanismos de degradação que ocorrem em ambientes naturais. Por esse motivo, evidencia-se a necessidade de gerar dados empíricos que contribuam para o aprimoramento dos modelos existentes. Consequentemente, o presente trabalho tem como objetivo apresentar e discutir os resultados de resistividade e velocidade de corrosão obtidos a partir da exposição de corpos de prova de concreto armado do projeto DUCONDOS (Comparação da durabilidade com dois métodos de dosagem) a um ambiente marinho tropical em Telchac Puerto, Yucatán, durante um período aproximado de 1.300 dias. A análise concentra-se exclusivamente na correlação entre a resistividade e a velocidade de corrosão, obtidas a partir da interação entre a relação água/cimento, as espessuras de cobrimento e a aplicação de dois métodos de dosagem das misturas.

2. METODOLOGIA

O delineamento metodológico foi orientado para verificar as correlações entre os parâmetros de dosagem, as espessuras de cobrimento e o comportamento eletroquímico do aço das armaduras, em função do método de dosagem empregado.

2.1 Fabricação dos corpos de prova

Na metodologia experimental, foi contemplada a fabricação de 12 corpos de prova de concreto armado, dosados por meio de dois métodos distintos, sendo seis para cada método (duas relações a/c):

- Método 1 (M1): baseado na resistência última dos elementos e no volume absoluto dos materiais, contempla o procedimento convencional utilizado em nossa região e em âmbito mundial (ACI Committee 211, 2022).
- Método 2 (M2): considera uma distribuição granulométrica e um adequado empacotamento dos agregados. Sua principal característica consiste em reduzir ao máximo os vazios na matriz de concreto (O'Reilly, 1990).

A Tabela 3 apresenta as dosagens por unidade de volume (m^3) dos traços M1 e M2. Entre as semelhanças, destaca-se que ambos os métodos consideram a absorção e a umidade dos agregados. Quanto às diferenças, observa-se que a quantidade de agregados no M2 foi maior, sobretudo a de agregado miúdo, com o objetivo de proporcionar um empacotamento eficiente entre as partículas gráúdas e reduzir os vazios. Como consequência direta do arranjo granular, o consumo de cimento necessário para a mistura foi ligeiramente menor no M2 do que no M1.

Tabela 3. Dosagem dos materiais de acordo com cada método de dosagem.

Material	Método 1		Método 2	
	Relação a/c 0.45	Relação a/c 0.65	Relação a/c 0.45	Relação a/c 0.65
Cimento	408	277	404	274
Pó	681	739	728	790

Brita	800	868	758	823
Água	187	180	185	177

¹ As quantidades apresentadas estão em kg/m³, e os agregados foram corrigidos de acordo com seu teor de umidade.

As misturas foram produzidas com cimento CPC-30R, comumente utilizado na região de exposição, e foram empregados agregados calcários britados, extraídos de jazidas de materiais da região. Conforme apresentado na Tabela 3, foram utilizadas duas relações a/c, 0,45 e 0,65, que representam, respectivamente, condições consideradas ideais e aquelas comumente empregadas em obras de pequeno porte. Portanto, foram confeccionados três corpos de prova para cada método de dosagem e para cada relação a/c. Os corpos de prova confeccionados apresentam seção transversal de 150 × 150 mm e comprimento de 300 mm. Foram utilizadas seis barras de aço-carbono, com diâmetro de 9,5 mm (3/8") e comprimento de 500 mm, com espessuras de cobrimento de 15 mm, 20 mm e 30 mm. Além disso, foram instaladas três câmaras de acesso na altura das barras de armadura, conforme apresentado na Figura 1. Neste trabalho, são analisados exclusivamente os resultados correspondentes à relação a/c de 0,45 para ambos os métodos de dosagem.



Figura 1. Corpo de prova e seu esquema de exposição, com o maior cobrimento na face inferior.

2.2 Exposição ambiental

O estudo foi realizado na estação marinha do Cinvestav Mérida, em Telchac Puerto, Yucatán, sob uma condição de exposição ambiental classificada como corrosividade atmosférica CX (ISO 9223:2012, 2012). O local de exposição está situado a 50 m da linha de costa e a 0,95 m acima do nível do terreno.

Os corpos de prova foram posicionados de modo que as faces a serem estudadas ficassem expostas aos ventos predominantes provenientes do nordeste, permanecendo a barra com maior cobrimento (30 mm) na parte inferior, seguindo o esquema de estações de exposição natural empregado em estudos anteriores de durabilidade em ambiente marinho tropical (Castañeda Valdés et al., 2024; Troconis De Rincón et al., 2015) (Figura 2).



Figura 2. Zona de exposição dos corpos de prova.

2.3 Parâmetros eletroquímicos, elétricos e ambientais

Durante aproximadamente 1.300 dias, foi realizado um monitoramento eletroquímico e elétrico para avaliar o comportamento dos corpos de prova. Entretanto, essas medições não seguiram uma sequência fixa entre si devido às condições de exposição natural. O monitoramento foi realizado com um corrosímetro comercial (Gcorr 6), equipado com um sensor com confinamento de sinal, posicionado no centro dos corpos de prova, e com um cabo de conexão ao eletrodo de trabalho. Esse arranjo permite medir o potencial de corrosão (E_{corr}), em mV, a velocidade de corrosão (i_{corr}), em $\mu A/cm^2$, e a resistência elétrica do concreto, possibilitando a determinação de sua resistividade (ρ), em $k\Omega \cdot cm$.

O registro interno das condições ambientais dos corpos de prova foi obtido por meio de uma sonda de temperatura e umidade, introduzida no interior do concreto.

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos exclusivamente para as velocidades de corrosão e as resistividades pontuais ao longo do tempo, nos quais são observadas periodicidades decorrentes das condições ambientais.

3.1 Velocidade de corrosão

A Figura 3 apresenta as velocidades de corrosão pontuais obtidas ao longo de aproximadamente 1.300 dias, para as três espessuras de cobertura dos corpos de prova M1 e M2, com relação a/c de 0,45. Observa-se claramente o efeito da relação a/c sobre a cinética eletroquímica, sendo registrados, de forma consistente, valores de i_{corr} inferiores ao limite de despassivação ($0,1 \mu A/cm^2$). As pequenas flutuações observadas estão diretamente relacionadas aos ciclos naturais de umedecimento e secagem característicos do clima costeiro, atribuíveis à matriz densa, independentemente da espessura do cobrimento (15, 20 ou 30 mm).

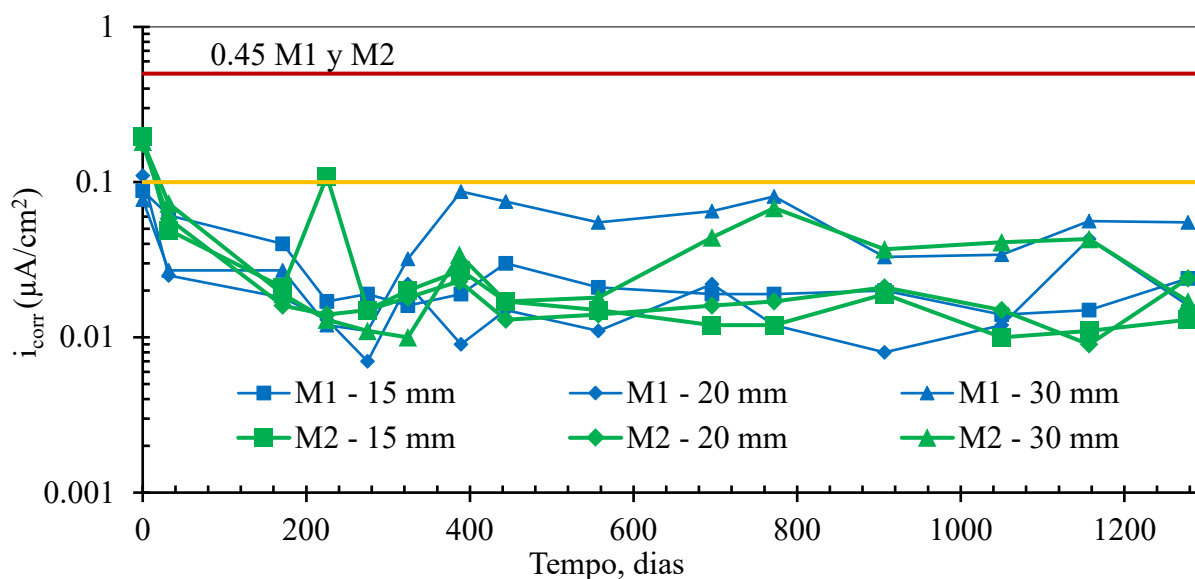


Figura 3. Velocidade de corrosão pontual dos corpos de prova nos métodos M1 e M2.

3.2 Resistividade

A Figura 4 apresenta os resultados pontuais da resistividade elétrica ao longo do tempo para as três espessuras de cobrimento dos corpos de prova M1 e M2. Nesses resultados, podem ser observadas duas etapas: a primeira corresponde às fases iniciais de hidratação do concreto, quando são registrados valores de resistividade em torno de 10 kΩ·cm; após aproximadamente um ano, os valores tendem a aumentar consideravelmente, de maneira consistente com a evolução do processo de hidratação e, conseqüentemente, com o refinamento da rede de poros.

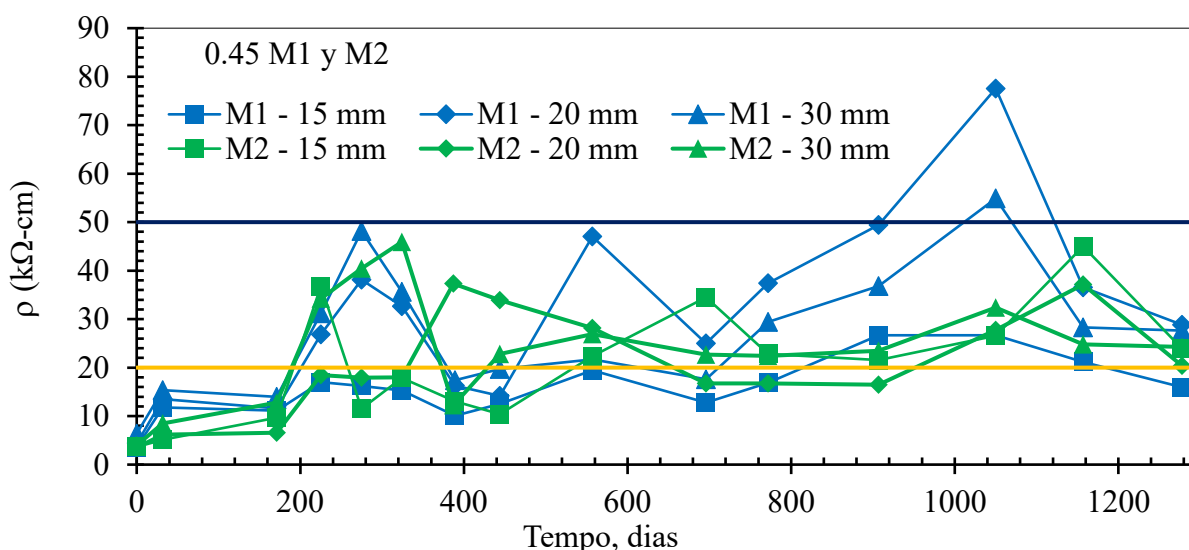


Figura 4. Resistividade elétrica pontual dos corpos de prova nos métodos M1 e M2.

4. DISCUSIÓN

Os resultados mostraram que, ao longo de 1.300 dias de exposição natural, uma relação a/c baixa, em ambos os métodos de dosagem, produz concretos com comportamentos eletroquímicos equivalentes. Isso demonstra que, apesar de um dos métodos se basear na redistribuição granulométrica, aumentando principalmente o teor de finos, é possível manter o estado passivo das

armaduras, mesmo sob condições de exposição tão agressivas. Portanto, o reajuste granulométrico não compromete a durabilidade de concretos de boa qualidade, nem aspectos como resistência, custo, pegada de carbono e microestrutura, conforme demonstrado por Murillo Mosquera et al. (2025).

Para realizar uma análise mais aprofundada dos resultados, as Figuras 5 e 6 apresentam as correlações entre a resistividade e a velocidade de corrosão dos métodos M1 e M2, respectivamente. A Figura 5 apresenta a análise do M1, na qual se observa uma redução da qualidade do ajuste à medida que aumenta a profundidade da armadura: para o cobrimento mais superficial, observa-se um R^2 de 0,75; com o aumento da profundidade do cobrimento, o R^2 diminui para 0,20. É particularmente relevante o desempenho comparativo do Método 2 (M2), apresentado na Figura 6. Apesar de utilizar um método de dosagem distinto do método volumétrico tradicional (M1), a otimização do empacotamento dos agregados implementada no M2 permitiu manter valores de resistividade e de velocidade de corrosão estatisticamente comparáveis ou superiores aos obtidos com o M1. Isso demonstra que a minimização dos vazios por meio de uma seleção granulométrica adequada não compromete o desempenho quanto à durabilidade frente à penetração de cloretos.

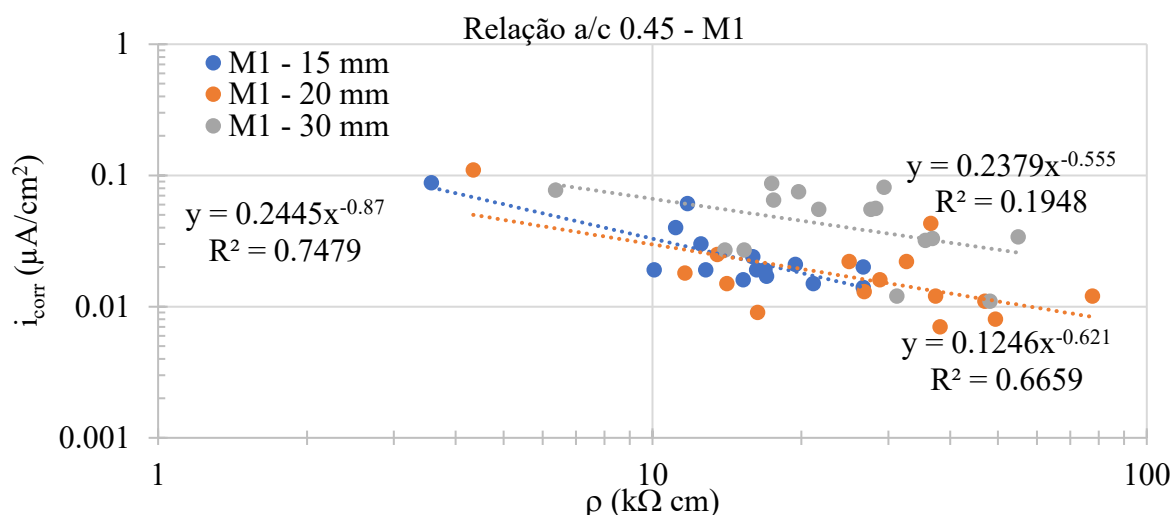


Figura 5. Correlação entre a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão do M1 em função da espessura do cobrimento.

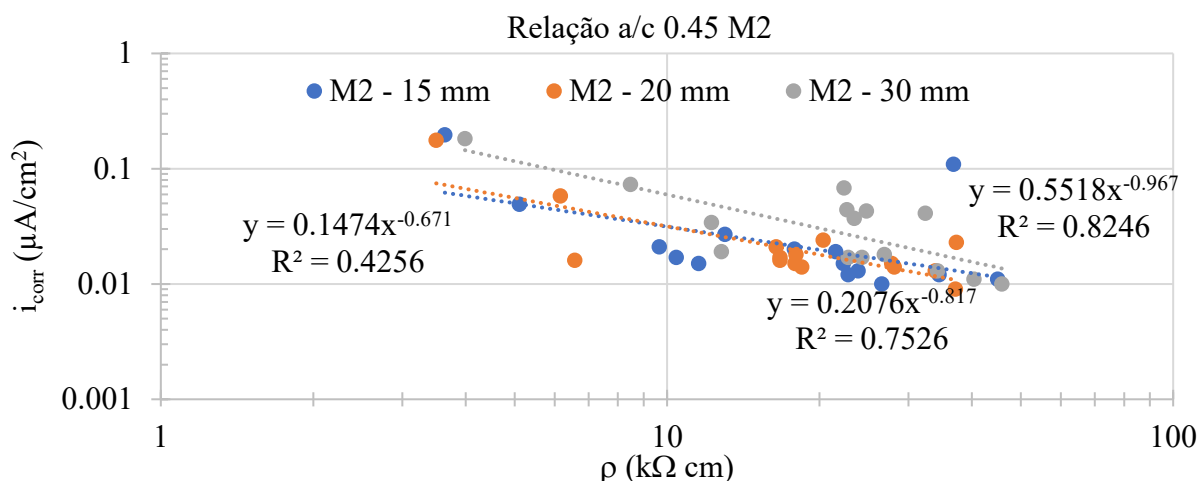


Figura 6. Correlação entre a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão do M2 em função da espessura do cobrimento.

Ao projetar a correlação geral entre a resistividade e a velocidade de corrosão, utilizando todos os dados experimentais obtidos em cada método de ensaio (M1 e M2), sem distinguir entre as espessuras de cobrimento (15 mm, 20 mm e 30 mm), a dispersão decorrente do monitoramento em condições naturais ganha destaque. A nuvem de dados, constantemente influenciada pelos gradientes de temperatura e umidade no interior dos corpos de prova, gera um modelo que se afasta da proporcionalidade estabelecida pelo expoente -1 do modelo teórico de Andrade. As condições variáveis da exposição real fazem com que a inclinação empírica seja mais moderada, o que significa que, em estruturas marinhas expostas às intempéries sob condições semelhantes às deste estudo, a resistividade perde parte de sua capacidade preditiva, independentemente da espessura do cobrimento, pelo menos durante a etapa de iniciação de Tuutti (1982). O exposto anteriormente assume importância devido à interação, mesmo quando o aço se encontra passivado, com outros fatores que influenciam o comportamento do concreto armado, como relação a/c , grau de saturação, temperatura, teor de cloretos e carbonatação, entre outros. Isso implica a necessidade de utilização criteriosa das equações e dos modelos preditivos da cinética de corrosão, bem como de técnicas complementares para sua confirmação. Essa precaução é especialmente relevante em grandes obras de infraestrutura, nas quais os engenheiros devem adotar margens de segurança mais amplas ao diagnosticar a cinética do processo de deterioração.

Uma análise generalizada dos pontos pode fornecer uma ideia do que ocorre quando não são considerados critérios como a geometria do elemento ou suas condições específicas. A Figura 7 apresenta as correlações gerais do M1. Ao representar todos os dados em um único gráfico, sem diferenciar as espessuras de cobrimento, observa-se a dispersão gerada pelo monitoramento natural durante as etapas iniciais. A nuvem de dados reúne os microclimas formados em cada profundidade, resultando em uma linha que representa a média de comportamentos heterogêneos e que se afasta do modelo teórico.

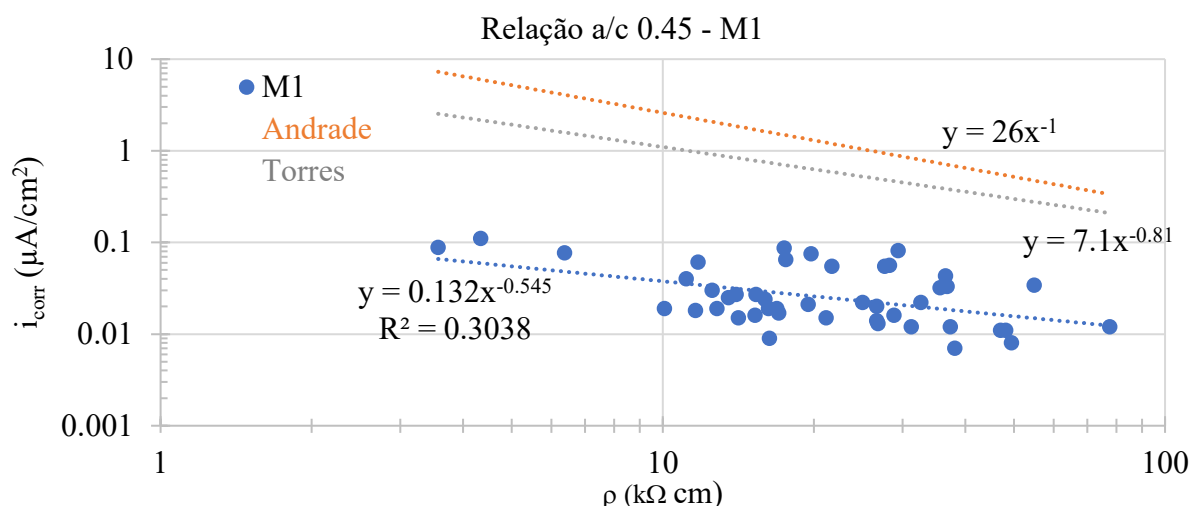


Figura 7. Correlação geral entre a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão do M1.

O desempenho comparativo do M2, apresentado na Figura 8, mostra-se interessante devido ao melhor ajuste da equação, ao maior valor de R^2 e a uma inclinação mais próxima de 1. Entretanto, a nuvem de dados também reflete a variabilidade decorrente da exposição às intempéries e demonstra que a minimização dos vazios por meio da seleção granulométrica constitui um método de dosagem adequado para concretos com baixas relações a/c .

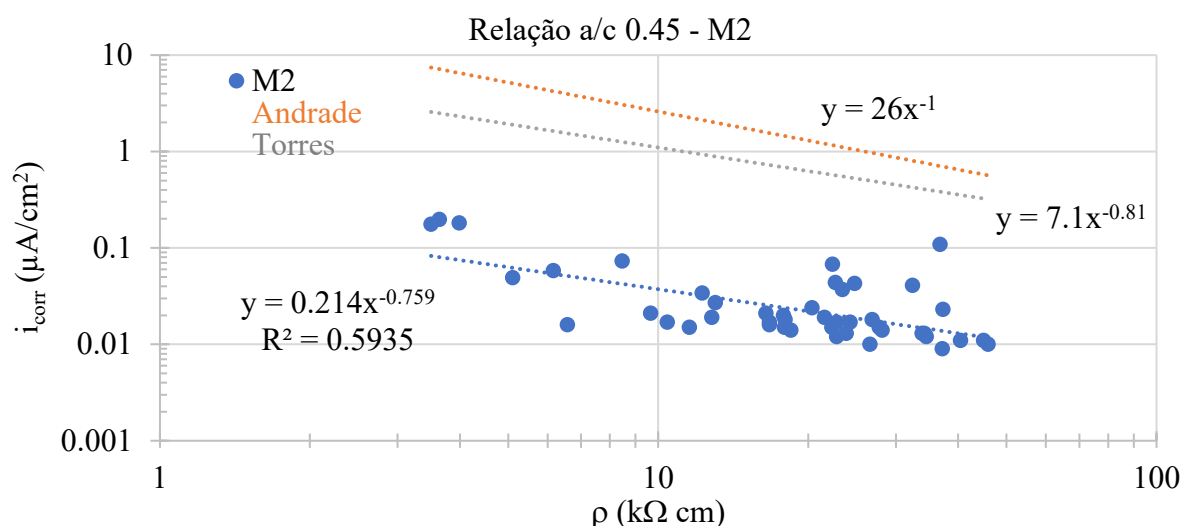


Figura 8. Correlação geral entre a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão do M1.

A apresentação das correlações por espessura de cobrimento foi estabelecida com o objetivo de observar o que ocorre quando não são agrupadas três profundidades com diferentes níveis de atividade eletroquímica, uma vez que esse agrupamento poderia gerar uma correlação entre os diferentes cobrimentos. A apresentação dos valores individuais por profundidade, juntamente com sua linha de tendência e respectiva equação, permite avaliar se o ajuste geral representa uma média de comportamentos homogêneos ou se incorpora comportamentos distintos. Conforme observado na Tabela 5, ocorre a segunda situação, uma vez que os expoentes por cobrimento variam entre $-0,555$ e $-0,87$, com valor geral de $-0,545$ para o M1, e entre $-0,671$ e $-0,967$, com valor geral de $-0,759$ para o M2. O ajuste geral não deve ser interpretado como uma propriedade do material, mas como a soma das contribuições dos microclimas internos existentes em cada profundidade de cobrimento.

Tabela 5. Resumo das correlações pontuais e generalizadas de M1 e M2.

Método	Cobrimento	Equação	R ²
M1	15	$y = 0.2445 \rho^{-0.87}$	0.75
M1	20	$y = 0.1246 \rho^{-0.621}$	0.67
M1	30	$y = 0.2379 \rho^{-0.555}$	0.20
	Geral	$y = 0.132 \rho^{-0.545}$	0.30
M2	15	$y = 0.1474 \rho^{-0.671}$	0.43
M2	20	$y = 0.2076 \rho^{-0.817}$	0.75
M2	30	$y = 0.5518 \rho^{-0.967}$	0.83
	Geral	$y = 0.214 \rho^{-0.759}$	0.59

Conforme observado na Tabela 5, os ajustes em função da espessura do cobrimento diferem entre os dois métodos, apresentando tendências opostas. Ou seja, no M1, o coeficiente R² e os expoentes se afastam da unidade à medida que aumenta o cobrimento, enquanto, no M2, aproximam-se da unidade com o aumento do cobrimento. Em outras palavras, a correlação entre a resistividade e a velocidade de corrosão no M2, baseada no empacotamento dos agregados, apresenta melhor ajuste às equações descritas na literatura à medida que aumenta a espessura do cobrimento, enquanto o M1, baseado em volumes absolutos, apresenta uma degradação desse ajuste. Esse comportamento pode ser explicado pelo microclima interno, que se mantém estável em razão do empacotamento

dos agregados. Entretanto, essa hipótese deve ser corroborada por meio de ensaios físicos, não devendo ser atribuída exclusivamente à espessura do cobrimento.

5. CONCLUSIONES

A partir da avaliação eletroquímica de corpos de prova de concreto dosados por dois métodos, com relação a/c, e expostos a um ambiente marinho tropical por aproximadamente 1.300 dias, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- O controle de uma baixa relação a/c permite manter o aço das armaduras em estado passivo diante das condições de exposição marinha, independentemente da espessura do cobrimento ou do método de dosagem.
- O M2 demonstrou ser uma alternativa de dosagem viável. O empacotamento dos agregados possibilitou uma evolução da resistividade compatível com a observada no M1.
- A correlação entre a resistividade e a velocidade de corrosão é influenciada pela geometria do corpo de prova e pela dosagem do concreto. As equações de estimativa não apresentaram alinhamento entre si e demonstraram comportamentos distintos, provavelmente em razão da influência das condições de exposição natural.
- O projeto da mistura afeta a estabilidade do microclima interno diante das variações ambientais.
- No método M1, o modelo próprio obtido apresentou degradação à medida que aumentou a espessura do cobrimento. No M2, a aproximação matemática apresentou melhor ajuste à medida que se avançou em profundidade no concreto.

6. AGRADECIMIENTOS

Os autores agradecem à Eng. Mercedes Balancán Zapata e à M.C. Alexia Zozayal pelo apoio na obtenção dos resultados e na análise dos dados. Um agradecimento póstumo especial ao Dr. Viterbo O'Reilly, criador do método M2.

7. REFERENCIAS

- Abraham, B., Mathew, J. (2021). *A Review on Durability Assessment of Concrete Structures Using Electrical Resistivity Method*. International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) ISSN, 9(7), 12–19. www.ijres.org
- ACI Committee 211. (2022). *Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide*. American Concrete Institute. www.concrete.org
- Alonso, C., Andrade, C., González, J. A. (1988). *Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types*. Cement and Concrete Research, 18(5), 687–698. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90091-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90091-9)
- Andrade, C. (2018). *Diseño y evaluación de la vida útil a través de resistividad eléctrica concreta*. Revista ALCONPAT, 8(3), 264–279. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>
- Azarsa, P., Gupta, R. (2017). *Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review*. Advances in Materials Science and Engineering, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>
- Balestra, C. E. T., Nakano, A. Y., Savaris, G., Medeiros-Junior, R. A. (2019). *Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures*. Ocean Engineering, 187. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106167>

- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P. (2019, November 30). *EFEECTO BORDE EN EL PROCESO DE CORROSIÓN A EDADES TEMPRANAS*. MEMORIAS CONPAT 2019. <https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V1CC388>
- Castañeda Valdés, A., Corvo Pérez, F., Pech Pech, I., Marrero Águila, R., Bastidas-Arteaga, E. (2024). *Durability Requirements for Reinforced Concrete Structures Placed in a Hostile Tropical Coastal Environment*. Buildings, 14(8). <https://doi.org/10.3390/buildings14082494>
- Geiker, M. Hornsbotel, K. Belda Revert, A. (2019), “Corrosion Rate; Experimental Observations in Carbonated or Chloride Containing Concrete.” in Proceedings of the Mathematical Models of Reinforcement Corrosion and its Consequences for Structural Performance, Paris, France, Oct. 28–29.
- Hornbotel, K., Elsener, B., Angst, U. M., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2017). *Limitations of the use of concrete bulk resistivity as an indicator for the rate of chloride-induced macro-cell corrosion*. Structural Concrete, 18(2), 326–333. <https://doi.org/10.1002/suco.201500141>
- Industria de La Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones, 1 (2017).
- ISO 9223:2012. (2012). *Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation*. EUROPEAN STANDARD.
- Kim, Y., Kee, S. H., Monjardin, C. E. F., Robles, K. P. V. (2026). *Multivariate Machine Learning Framework for Predicting Electrical Resistivity of Concrete Using Degree of Saturation and Pore-Structure Parameters*. Materials, 19(2). <https://doi.org/10.3390/ma19020349>
- Koleva, D. A., de Wit, J. H. W., van Breugel, K., Veleva, L. P., van Westing, E., Copuroglu, O., Fraaij, A. L. A. (2008). *Correlation of microstructure, electrical properties and electrochemical phenomena in reinforced mortar. Breakdown to multi-phase interface structures. Part II: Pore network, electrical properties and electrochemical response*. Materials Characterization, 59(6), 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.06.016>
- Le, H. V., Kim, M. K., Kim, D. J., Park, J. (2021). *Electrical properties of smart ultra-high performance concrete under various temperatures, humidities, and age of concrete*. Cement and Concrete Composites, 118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103979>
- Liu, Q., Pei, G., Chen, L., Duan, K., Zhang, F., Su, R. K.-L. (2024). *Effects of Chloride, Humidity, and Concrete Mix on the Electrochemical Parameters of Steel Reinforcement Corrosion*. Journal of Materials in Civil Engineering, 36(8). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-17914>
- Maldonado, L., Veleva, L. (1999). *Corrosivity category maps of a humid tropical atmosphere: the Yucatán Peninsula, México*. Materials and Corrosion, 50, 261–266.
- Morris, W., Vico, A., Vázquez, M. (2004). *Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements*. Electrochimica Acta, 49(25), 4447–4453. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.001>
- Murillo Mosquera, E., Cifuentes, S., Obando, J. C., Monteiro, S. N., Colorado, H. A. (2025). *Concrete Obtained with the Viterbo O'Reilly Method for Aggregate Gradation: A Potential Model for Sustainable Design and Reducing Development Costs*. Materials, 18(15). <https://doi.org/10.3390/ma18153558>
- O'Reilly, V. A. (1990). *Métodos para Dosificar Mezclas de Hormigón* (1a edición). Científico-Técnico.
- Pedrosa, F., Andrade, C. (2021). *Spatial variability of concrete electrical resistivity and corrosion rate in laboratory conditions*. Construction and Building Materials, 306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124777>
- Presuel-Moreno, F., Bencosme, R., Hoque, K., Nazim, Manzurul, Kazemi, A., Tang, F. (2018). *Corrosion Propagation of Carbon Steel Rebars in High Performance Concrete*.
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W. Y., Yu, T. (2021). *Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review*. Journal of Building Engineering,

35. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102074>

Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., Betelu, S. (2021). *Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring*. In Construction and Building Materials (Vol. 269). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>

Rodriguez, J., Ortega, L., García, A. (1993, December). *On Site Corrosion Rate Measurements in Concrete Structures*. Hormigón y Acero.

Tian, Z., Ye, H. (2022). *Mechanisms underlying the relationship between electrical resistivity and corrosion rate of steel in mortars*. Cement and Concrete Research, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106867>

Torres-Acosta, A. A. (2024). *Technical Note: Considerations to Avoid Corrosion Rate Estimate Error of the Reinforcing Steel if Based Only on Concrete's Electrical Resistivity*. Corrosion, 80(4), 332–337. <https://doi.org/10.5006/4482>

Torres-Acosta, A. A., González-Calderón, P. Y. (2021). *Opuntia ficus-indica (OFI) mucilage as corrosion inhibitor of steel in CO₂-contaminated mortar*. Materials, 14(5). <https://doi.org/10.3390/ma14051316>

Torres-Acosta, A. A., Martínez-Madrid, M., Loveday, D., Horner, M. (2005, March 3). *Nopal and Aloe Vera Additions in Concrete Electrochemical Behavior of the Reinforcing Steel*. CORROSION 2005.

Troconis De Rincón, O., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., Mejía De Gutierrez, R., Del Vasto, S., Saborio, E., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Martínez-Molina, W., Alonso-Guzmán, E., Castro-Borges, P., Moreno, E. I., Almeraya-Calderón, F., Gaona-Tiburcio, C., Pérez-López, T., Salta, M., De Melo, A. P., ... De Partidas, E. (2015). *Concrete carbonation in Ibero-American countries DURACON project: Six-year evaluation*. Corrosion, 71(4), 546–555. <https://doi.org/10.5006/1385>

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 473.

Zhang, G., Zhu, Y., Lin, X., Tian, Y., Ye, H., Jin, X., Jin, N., Yan, D., Xiao, F., Yao, K., Chen, J. (2021). *Numerical simulation of electrochemical mechanism of steel rebar corrosion in concrete under natural climate with time-varying temperature and humidity*. Construction and Building Materials, 306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124873>