

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.

J. A. Briceño-Mena^{1,2} , M. Soria-Castro³ , E. J. Pérez-García³,
D. Nieves-Mendoza⁴, P. Castro-Borges^{1*} 

*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

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

Recibido: 01/07/2026 | Correcciones recibidas: 28/08/2026 | Aceptado: 31/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

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 $\rho-i_{\text{corr}}$ 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

Citar como: Briceño-Mena, J. A. Soria-Castro, M., Pérez-García, E. J., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P. (2026), “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.”, 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.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Briceño-Mena contribuyó con la experimentación (50%), el desarrollo de un modelo (50%), la recolección de datos (100%), la escritura del trabajo (50%) y la discusión de resultados (30%); la autora Soria-Castro con la experimentación (50%), la discusión de resultados (20%); el autor Pérez-García con la construcción de las probetas de ensayo (80%) y la discusión de resultados (10%); el autor Nieves-Mendoza con la construcción de las probetas de ensayo (20%) y la discusión de resultados (10%); y el autor Castro-Borges con la idea original (100%), el desarrollo de un modelo (50%) y la escritura del trabajo (50%), además de la discusión de resultados (30%).

Licencia Creative Commons

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

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.

Efeito do método de dosagem e da espessura da camada de concreto armado na relação entre a resistividade e a taxa de corrosão sob condições naturais de exposição marinha.

RESUMO

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 - i_{corr} : 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.

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

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

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto, inducida por agentes agresivos como los cloruros, es el tipo de deterioro más común en las infraestructuras ubicadas en ambientes marinos tropicales (Qu et al., 2021). La evidencia de la literatura sobre el ambiente agresivo en la costa yucateca, ubicada en el Golfo de México, permite considerar este lugar como un laboratorio natural de corrosividad atmosférica extrema (Maldonado & Veleza, 1999). Ante este escenario, la durabilidad del concreto reforzado es clave y está determinada por la resistencia al flujo de iones a través de la microestructura cementante (Abraham & Mathew, 2021; Azarsa & Gupta, 2017). Debido a esto, la exigencia de controlar variables como la relación agua/cemento (a/c), la resistividad y el espesor de recubrimiento resulta clave para prolongar la vida útil y mantener el desempeño óptimo de las estructuras (Balestra et al., 2019; Castañeda Valdés et al., 2024). Ante estas circunstancias, el uso de parámetros de durabilidad es cada vez más frecuente en las normativas nacionales e internacionales, como la NMX-C-530 (2017) en el caso de México. En esta norma se destaca la resistividad eléctrica como un criterio de desempeño fundamental, capaz de reflejar la interacción entre las características intrínsecas del material y las variaciones del entorno.

Históricamente, la resistividad ha servido de puente para evaluar la cinética electroquímica. Diversos autores han formalizado relaciones matemáticas basadas en la resistividad, como es el caso de Andrade (1988), quien propone estimar la velocidad de corrosión a través de la relación $i_{\text{corr}} = 26 \rho^{-1}$, que, en su forma matemática, sigue la estructura $y = A \rho^B$. Sin embargo, la evidencia indica que esa correlación inversa (conocida como la relación R-C) no es universal (Torres-Acosta, 2024). La influencia de la humedad, la temperatura, la concentración de iones y las propiedades del material modifica de manera no lineal las propiedades eléctricas resistivas y la actividad en la interfaz acero-concreto (Zhang et al., 2021). Adicionalmente, factores químicos, como la naturaleza del material cementante y el pH de la solución de poro, pueden afectar la correlación. Por ejemplo, una disminución del pH incrementa la resistividad del material en procesos de carbonatación y, a la vez, acelera la corrosión al disminuir la relación $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, lo que modifica por completo las curvas teóricas (Tian & Ye, 2022). Además, bajo condiciones de corrosión activa, las velocidades de corrosión presentan una fluctuación mayor que la observada en la resistividad, lo que incrementa el margen de incertidumbre en las estimaciones teóricas (Pedrosa & Andrade, 2021; Rodrigues et al., 2021).

Lo descrito anteriormente evidencia la necesidad de utilizar modelos calibrados bajo condiciones de exposición similares, ya sea en exposiciones reales, de laboratorio, prolongadas o de corto alcance. Además, podrían carecer de precisión si se ignora la influencia del diseño geométrico, de las dosificaciones o de la posición espacial (Briceño-Mena et al., 2019) (Koleva et al., 2008). En primera instancia, el espesor de recubrimiento actúa como una barrera física que puede retardar el inicio de la corrosión, y la relación a/c puede determinar la red de poros interconectados a través de la cual se transportan los agentes agresivos. La correlación entre la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión no depende únicamente de una sola propiedad, sino de un conjunto de factores que, a veces, las modifican simultáneamente o en sentido inverso. Los autores mencionados en la Tabla 1 presentan algunos factores en los que se observa el efecto sobre la resistividad y la corrosión del acero, ya que precisamente estos son los que originan la dispersión observada en los modelos teóricos. Algunos de estos parámetros desplazan la resistividad y la corrosión en el mismo sentido, mientras que otros lo hacen en sentido contrario. Por ejemplo, el grado de saturación mencionado por Kim (2026) y Zhang (2021) y la relación a/c mencionada por Azarsa y Gupta (2017) influyen en sentido contrario: al aumentar, reducen la resistividad y aumentan el riesgo de corrosión. La carbonatación, en cambio, actúa de manera simultánea: eleva la resistividad y aumenta el riesgo de corrosión, como mencionan Azarsa y Gupta (2017).

Tabla 1. Parámetros del material y ambientales que influyen en la correlación entre la corrosión y la resistividad en el concreto.

Autor	Parámetro	Efecto en la resistividad	Efecto en la corrosión
(Kim et al., 2026) (Zhang et al., 2021)	Grado de saturación	Decrece exponencialmente con el aumento del grado de saturación (R^2 entre 0.896 y 0.997).	Incrementa el riesgo de corrosión. Favorece la migración de cloruros
(Morris et al., 2004) (Liu et al., 2024)	Concentración de cloruros	Cuando la resistividad eléctrica del hormigón aumenta entre 2 y 100 $k\Omega \cdot cm$, el valor del umbral pasa de 0.44% a 2.32%	Disminuye la pendiente anódica de Tafel al incrementar la concentración en cualquier valor (sobre 0 %)
(Morris et al., 2004) (Le et al., 2021)	Temperatura	Afecta la saturación de poros y, por lo tanto, la resistividad. Al aumentar la temperatura, la resistividad decrece	Influye en la cinética electroquímica
(Azarsa & Gupta, 2017)	Relación agua/cemento	A mayor relación a/c, menor resistividad debido a una mayor porosidad	Mayor susceptibilidad a la corrosión
(Azarsa & Gupta, 2017)	Carbonatación	Forma un perfil de resistividad de varias capas	Cambia los mecanismos de corrosión

La Tabla 2 presenta las correlaciones empíricas reportadas en la literatura, elaboradas a partir de la información proporcionada por Torres-Acosta (2024). El criterio de orden de la tabla fue descendente, basado en los coeficientes de correlación (R^2), indicadores de la confiabilidad del modelo. A diferencia del exponente, indicador de tendencia, y del coeficiente (multiplicador), que indica la magnitud, R^2 resulta relevante para decidir qué ecuación usar. Se observa en la tabla que en un ambiente marino R^2 cae a 0.43. Esto podría atribuirse en parte a las condiciones internas de humedad y temperatura, en combinación con el movimiento de los cloruros, producto de diferentes mecanismos de penetración, los cuales influyen en el grado de saturación de los poros e incluso en el desarrollo de la porosidad, producto del endurecimiento continuo del concreto. En cambio, en ambientes de carbonatación, la estimación alcanza una confiabilidad bastante alta, cercana a 1 ($R^2 = 0.93$). Esto podría atribuirse a que la carbonatación disminuye considerablemente la porosidad efectiva y la densidad del concreto, lo que favorece una tendencia a resistividades más estables con el paso del tiempo. Por otra parte, como una nueva aproximación teórica generalizada, Torres-Acosta (2024) propone utilizar la ecuación obtenida al integrar los diversos estudios discutidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones de correlación entre resistividad y velocidad de corrosión de diversos autores.

Autor	Condición de exposición	Especímenes	Cementante	Relación a/c	Método de medición i_{corr}	Método de medición ρ	Ecuación ajustada	R ²
(Hornbostel et al., 2017)	Inmersión en solución salina	Prismas de mortero reforzado	Con sustituciones de ceniza volante	0.4 y 0.55	Corriente galvánica	Medidor LCR (inductancia, capacitancia y resistencia)	$i_{corr} = 208.27 \cdot \rho^{0.603}$	0.4263
(Rodríguez et al., 1993)	Marino natural	Estructuras reales de concreto reforzado	-	-	Resistencia a la polarización lineal	Equipo de fabricación propia con anillo de guarda y sensores	$i_{corr} = 2.8785 \cdot \rho^{0.766}$	0.5027
(Andrade, 2018)	Cloruros	Concreto de alta calidad	-	-	-	Método directo/método de Wenner	$i_{corr} = 207.68 \cdot \rho^{1.335}$	0.6188
(Presuel-Moreno et al., 2018).	Ciclos de humedad-secado en solución salina/Marino natural	Prismas de concreto reforzado	Con sustituciones de ceniza volante, humo de sílice	Varias	Resistencia a la polarización	Directa	$i_{corr} = 7.6144 \cdot \rho^{1.058}$	0.822
(Torres-Acosta et al., 2005).	Ciclos de humedad-secado en solución salina	Prismas de concreto reforzado	Con sustituciones de nopal y aloe	-	Resistencia a la polarización lineal	-	$i_{corr} = 24.965 \cdot \rho^{1.439}$	0.8484
Geiker et al.	Carbonatación acelerada	Prismas de concreto	-	-	Corrosímetro comercial	Corrosímetro comercial	$i_{corr} = 26.378 \cdot \rho^{0.959}$	0.9225
(Torres-Acosta & González-Calderón, 2021)	Carbonatación natural	Morteros	-	-	Resistencia a la polarización	Resistencia eléctrica	$i_{corr} = 16.452 \cdot \rho^{0.919}$	0.9395
(Torres-Acosta, 2024)	Todas las condiciones anteriores						$i_{corr} = 7.1 \cdot \rho^{0.81}$	0.7813

La dependencia y la conveniencia de utilizar los valores de resistividad para inferir velocidades de corrosión han crecido, por lo que en muchos tipos de investigación se ha propuesto el mismo tipo de ecuación, discutida arriba, pero con diferentes coeficientes de correlación asociados a propiedades del concreto reforzado y a condiciones de exposición que no se pueden discriminar fácilmente al comparar diferentes tipos de estudio. Como consecuencia, aún no se puede hablar de una ley que permita correlacionar la resistividad con la velocidad de corrosión al 100%, al menos mientras no haya más datos disponibles.

Actualmente, la mayoría de los estudios disponibles se han desarrollado en condiciones controladas y de laboratorio, lo que suele simplificar los mecanismos de degradación que ocurren en entornos naturales. Por ello, la necesidad de generar datos empíricos para enriquecer los modelos existentes. Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo presentar y discutir los resultados de resistividad y de velocidad de corrosión derivados de la exposición de probetas de concreto reforzado del proyecto DUCONDOS (Comparación de durabilidad con dos métodos de dosificación) en un ambiente marino tropical en Telchac Puerto, Yucatán, durante un período aproximado de 1300 días. El análisis se enfoca exclusivamente en la correlación entre la resistividad y la velocidad de corrosión obtenidas a partir de la interacción entre la relación agua/cemento, los espesores de recubrimiento y la aplicación de dos métodos de diseño de mezclas.

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico se orientó a verificar correlaciones entre los parámetros de dosificación, los espesores de recubrimiento y el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo en función del método de diseño empleado.

2.1 Fabricación de especímenes.

En la metodología experimental se contempló la fabricación de 12 especímenes de concreto reforzado, diseñados con dos métodos distintos, seis por cada método (dos relaciones a/c):

- Método 1 (M1), basado en la resistencia última de los elementos y en el volumen absoluto de los materiales, contempla el procedimiento convencional utilizado en nuestra región y a nivel mundial (ACI Committee 211, 2022).
- Método 2 (M2), que considera una distribución granulométrica y un adecuado acomodo de los agregados. Su característica principal es reducir al máximo los vacíos en la matriz de concreto (O'Reilly, 1990).

La Tabla 3 presenta las dosificaciones por unidad de volumen (m^3) de los diseños M1 y M2. Entre las similitudes, cabe destacar que ambos diseños consideran la absorción y la humedad de los agregados. Entre las diferencias, la cantidad de agregados del M2 resulta evidente que fue mayor, sobre todo la del agregado fino, para lograr un empaquetamiento eficiente entre las partículas gruesas y tratar de llenar los vacíos. Como consecuencia directa del acomodo granular, el consumo de cemento requerido para la mezcla fue ligeramente menor en el M2 que en el M1.

Tabla 3. Dosificación de material de acuerdo con cada diseño.

Material	Método 1		Método 2	
	Relación a/c 0.45	Relación a/c 0.65	Relación a/c 0.45	Relación a/c 0.65
Cemento	408	277	404	274
Polvo	681	739	728	790
Grava	800	868	758	823
Agua	187	180	185	177

¹ Las cantidades dadas están en kg/m^3 y los agregados se corrigieron por su contenido de humedad.

Las mezclas fueron elaboradas con cemento CPC-30R, común en la zona de exposición, y se utilizaron agregados calizos triturados, extraídos de bancos de materiales de la región. Como se observó en la Tabla 3, se utilizaron dos relaciones a/c, 0.45 y 0.65, que se asemejan a las condiciones ideales y a las que comúnmente se emplean en obras pequeñas. Por lo tanto, se construyeron 3 probetas para cada método de dosificación y cada relación a/c. Las probetas fabricadas presentan una sección transversal de 150 x 150 mm y una longitud de 300 mm. Se utilizaron seis barras de acero al carbono de 9.5 mm (3/8") de diámetro y 500 mm de longitud, con recubrimientos de 15 mm, 20 mm y 30 mm de espesor, y se colocaron 3 cámaras de acceso a la altura de las barras de refuerzo, como se muestra en la Figura 1. En este trabajo se analizan únicamente los resultados de la relación a/c de 0.45 en ambos métodos de diseño.



Figura 1. Probeta y su esquema de exposición, el recubrimiento mayor en el lecho inferior.

2.2 Exposición ambiental.

El estudio se realizó en la estación marina del Cinvestav Mérida, en Telchac Puerto, Yucatán, bajo una exposición ambiental clasificada como corrosión atmosférica CX (ISO 9223:2012, 2012). El sitio de exposición se encuentra a 50 m de la línea de costa y a 0.95 m sobre el nivel del terreno. Las probetas fueron orientadas de modo que las caras a estudiar estuvieran expuestas a los vientos predominantes del noreste, quedando la barra con mayor recubrimiento (30 mm) en la parte inferior, siguiendo el esquema de estaciones de exposición natural empleado en estudios previos de durabilidad en ambiente marino tropical (Castañeda Valdés et al., 2024; Troconis De Rincón et al., 2015) (Figura 2).



Figura 2. Zona de exposición de los especímenes.

2.3 Parámetros electroquímicos, eléctricos y ambientales.

Durante aproximadamente 1300 días se realizó un seguimiento electroquímico y eléctrico para conocer el comportamiento de las probetas. Sin embargo, estas mediciones no siguieron una secuencia fija entre sí debido a las condiciones de exposición natural. El seguimiento se realizó con un corrosímetro comercial (Gcorr 6), equipado con un sensor con confinamiento de señal, colocado en el centro de las probetas, y con un cable de conexión al electrodo de trabajo. Este arreglo permite medir el potencial de corrosión (E_{corr}) en mV, la velocidad de corrosión (i_{corr}) en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y la resistencia eléctrica del concreto, lo que ayuda a determinar su resistividad (ρ) en $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$.

El registro interno de las condiciones ambientales de los especímenes se obtuvo mediante una sonda de temperatura y humedad que se introducía al interior del concreto

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos únicamente de las velocidades de corrosión y de las resistividades puntuales a lo largo del tiempo, en los que se observan periodicidades causadas por las condiciones ambientales.

3.1 Velocidad de corrosión.

La Figura 3 presenta las velocidades de corrosión puntuales obtenidas a lo largo de aproximadamente 1300 días para los tres espesores de recubrimiento de las probetas M1 y M2 con relación a/c de 0.45. Se observa claramente el efecto de la relación a/c sobre la cinética electroquímica; se observan de manera consistente resultados de i_{corr} inferiores al umbral de despasivación ($0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Las fluctuaciones menores responden directamente a los ciclos naturales de humectación y secado del clima costero, atribuibles a la matriz densa, independientemente del espesor de recubrimiento (15, 20 o 30 mm).

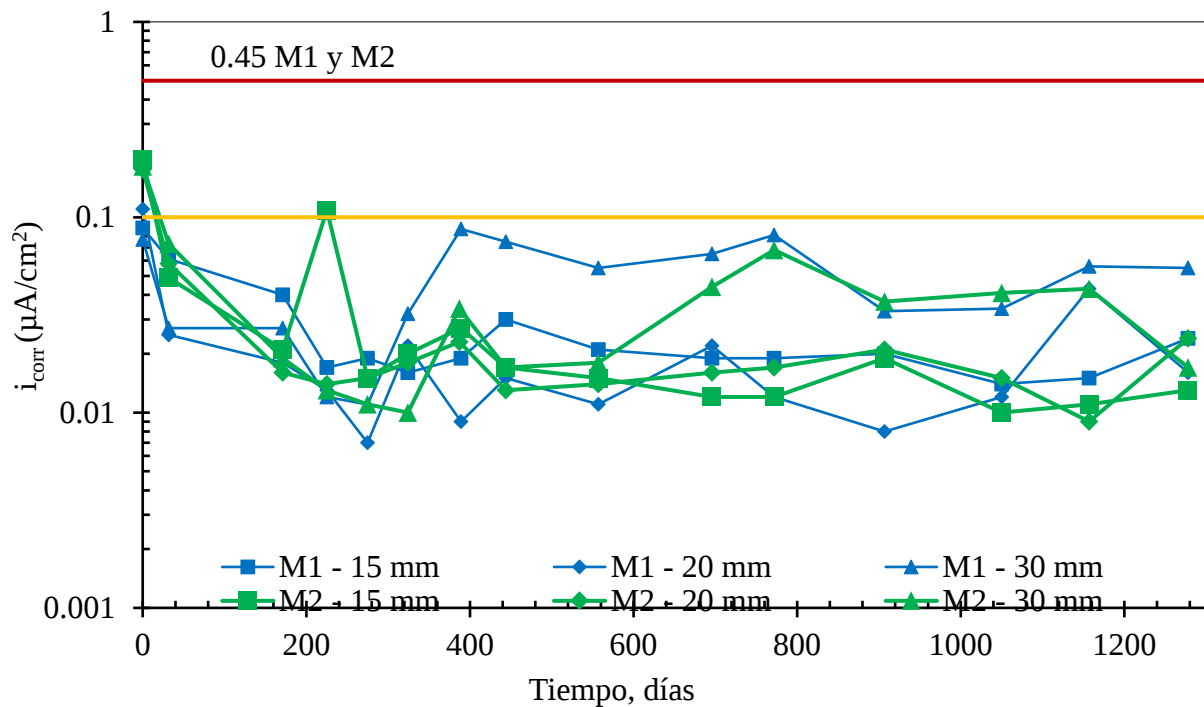


Figura 3. Velocidad de corrosión puntual de las probetas en los métodos M1 y M2.

3.2 Resistividad

La Figura 4 presenta los resultados puntuales de la resistividad eléctrica a lo largo del tiempo para los tres espesores de recubrimiento de las probetas M1 y M2. En estas se pueden observar dos etapas: la primera, cuando el concreto se encuentra en las primeras fases de hidratación y presenta resistividades de alrededor de 10 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$; y, pasado el año, los valores tienden a incrementarse considerablemente, de manera consistente con el proceso de hidratación y, por consiguiente, con el refinamiento de la red de poros.

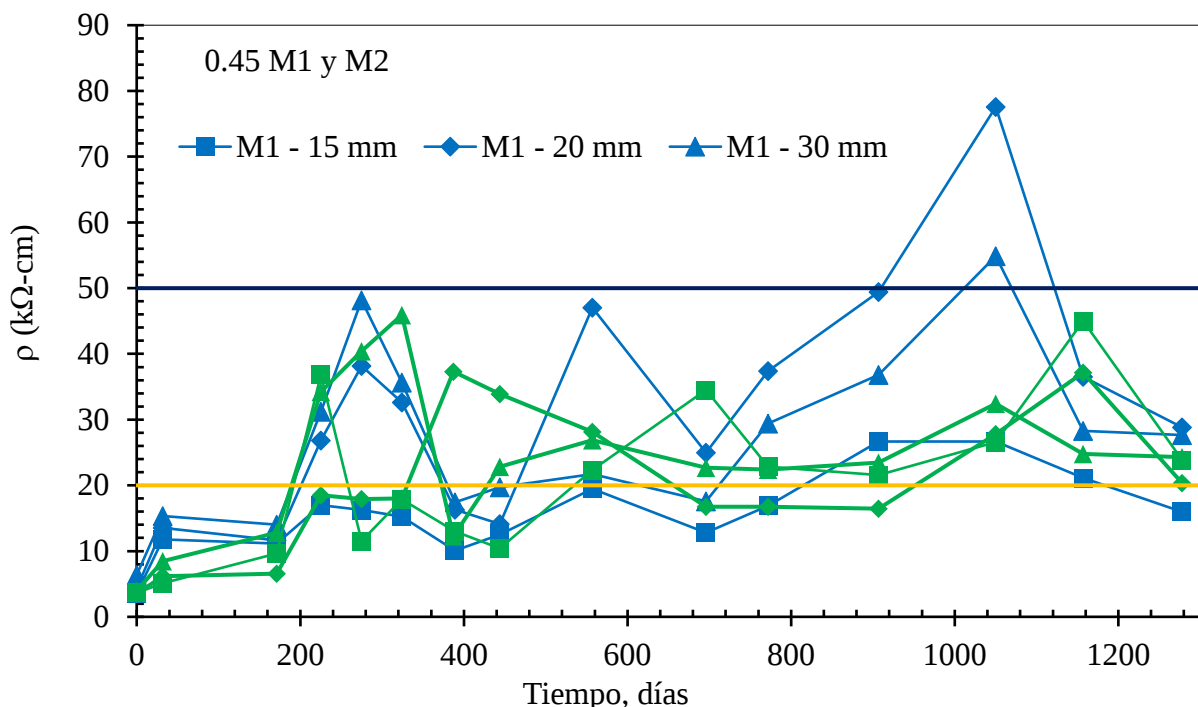


Figura 4. Resistividad eléctrica puntual de las probetas en los métodos M1 y M2.

4. DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que, a lo largo de 1300 días de exposición natural, una relación a/c baja en ambos métodos de dosificación produce concretos con comportamientos electroquímicos equivalentes. Esto demuestra que, a pesar de que un método se base en la redistribución granulométrica que eleve, sobre todo, los contenidos de finos, permite un estado pasivo aún bajo condiciones de sitio tan agresivas. Por lo tanto, el reajuste granular no compromete la durabilidad de los concretos de buena calidad ni aspectos como la resistencia, el costo, la huella de carbono y la microestructura, como demostraron Murillo Mosquera et al. (2025).

Para llevar a cabo un análisis más profundo de los resultados, las Figuras 5 y 6 muestran las correlaciones entre la resistividad y la velocidad de corrosión de los M1 y M2, respectivamente. La Figura 5 presenta el análisis de M1, donde se observa una degradación del ajuste a medida que aumenta la profundidad del acero: en el recubrimiento más superficial se observa una R^2 de 0.75; al incrementar la profundidad del recubrimiento, la R^2 disminuye a 0.20. Resulta de interés el desempeño comparativo del método 2 (M2) presentado en la Figura 6. A pesar de operar con un diseño distinto al volumétrico tradicional (M1), la optimización del acomodo de los agregados implementada en el M2 logró mantener valores de resistividad y de velocidad de corrosión estadísticamente equiparables o superiores a los del M1. Esto demuestra que la minimización de vacíos mediante una selección granulométrica no compromete el desempeño por durabilidad frente a la penetración de cloruros.

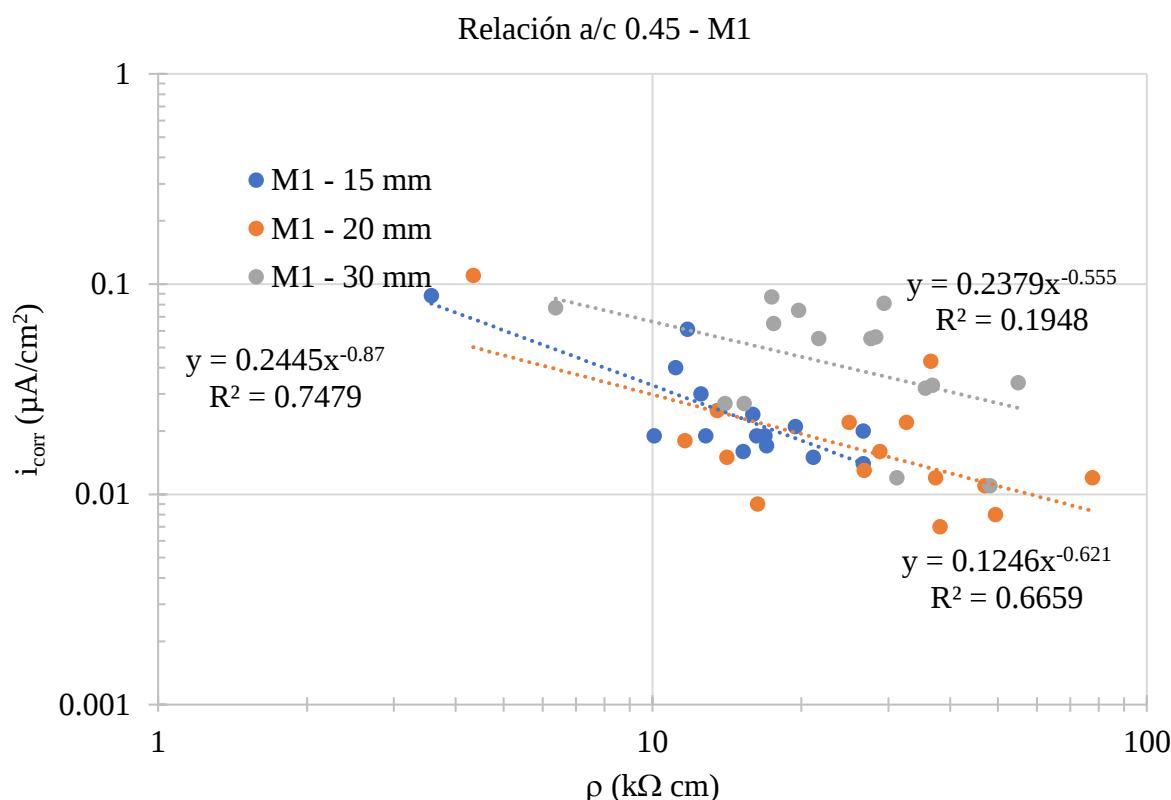


Figura 5. Correlación entre la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión de M1 en función del espesor de recubrimiento.

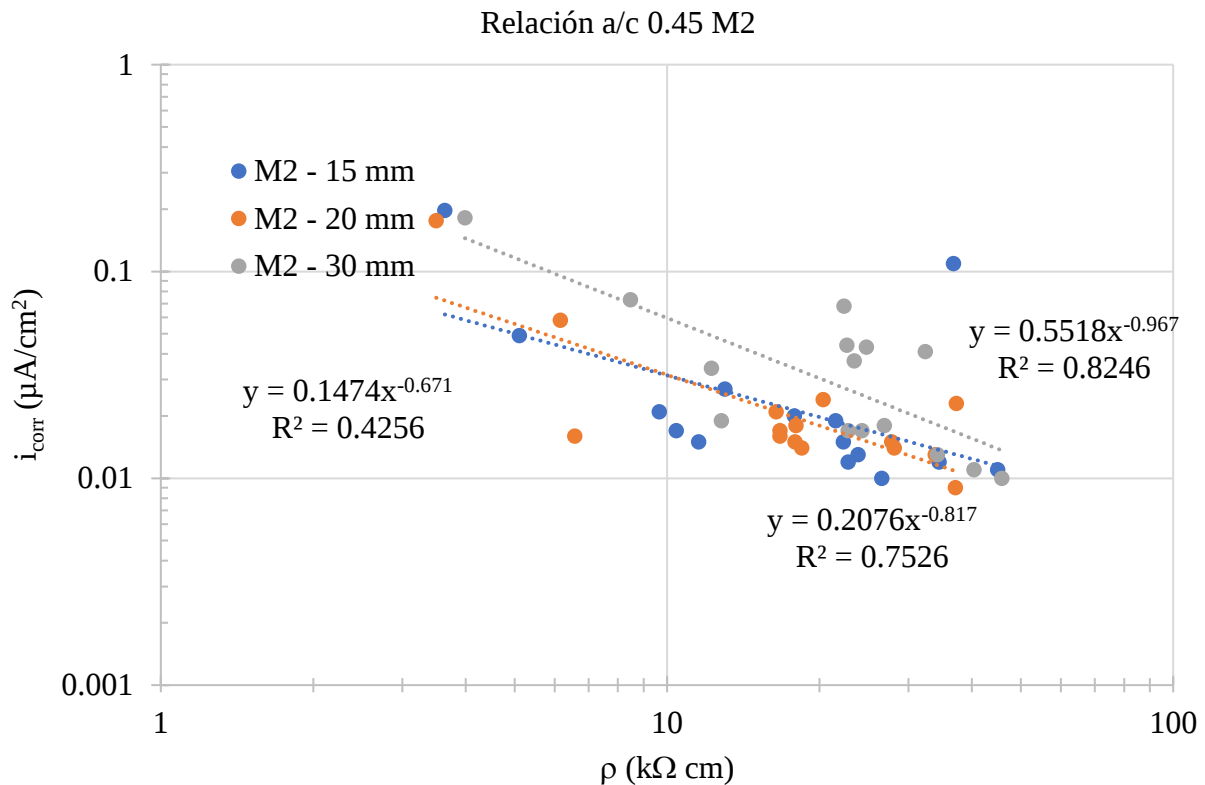


Figura 6. Correlación entre la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión de M2 en función del espesor de recubrimiento.

Al proyectar la correlación general entre la resistividad y la velocidad de corrosión utilizando todos los datos experimentales obtenidos en cada método de ensayo (M1 y M2), sin distinguir entre los espesores de recubrimiento (15 mm, 20 mm y 30 mm), la dispersión del monitoreo natural cobra protagonismo. La nube de datos, moldeada constantemente por los gradientes de temperatura y humedad al interior de las probetas, genera un modelo que se aleja de la proporcionalidad establecida por el exponente -1 del modelo teórico de Andrade. Las condiciones cambiantes de la exposición real hacen que la pendiente empírica sea más moderada, lo que significa que, en estructuras marinas a la intemperie bajo las mismas condiciones que en este estudio, la resistividad pierde parte de su capacidad predictiva, independientemente del espesor de recubrimiento, al menos en la etapa de iniciación de Tuutti (1982). Lo anterior cobra importancia debido a la interacción, aun cuando el acero esté pasivado, con los otros factores que influyen en el concreto reforzado (relación a/c, grado de saturación, temperatura, contenido de cloruros, carbonatación, entre otros). Esto conlleva el uso cuidadoso de las ecuaciones y los modelos predictivos de cinética de corrosión, así como de técnicas complementarias para su confirmación. Sobre todo, cuando se trata de grandes obras de infraestructura, en las que los ingenieros deben emplear márgenes de seguridad más amplios al diagnosticar la cinética del daño.

Un análisis generalizado de los puntos podría dar una idea de lo que ocurre si no se consideran criterios como la geometría del elemento o sus condiciones. En la Figura 7 se presentan las correlaciones generales de M1. Al proyectar todos los datos en una sola gráfica, sin diferenciar los espesores de recubrimiento, se observa la dispersión generada por el monitoreo natural en las etapas iniciales. La nube de datos agrupa los microclimas generados a cada profundidad, lo que da lugar a una línea que promedia comportamientos heterogéneos y se aleja del modelo teórico.

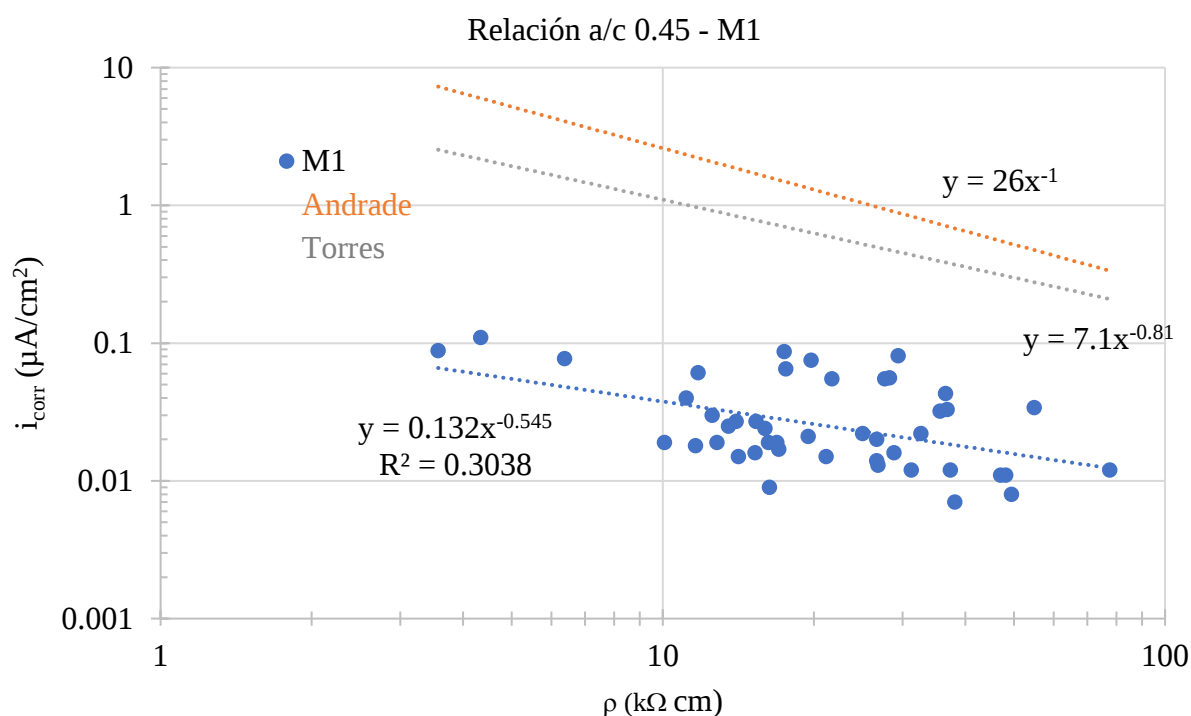


Figura 7. Correlación general entre la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión de M1.

El desempeño comparativo del M2 presentado en la Figura 8 resulta interesante debido a un mejor acoplamiento de la ecuación, un R^2 mayor y una pendiente más cercana a 1. Sin embargo, la nube de datos también refleja la variabilidad del intemperismo y demuestra que la minimización de vacíos mediante la selección granular es un buen método de diseño para relaciones a/c bajas.

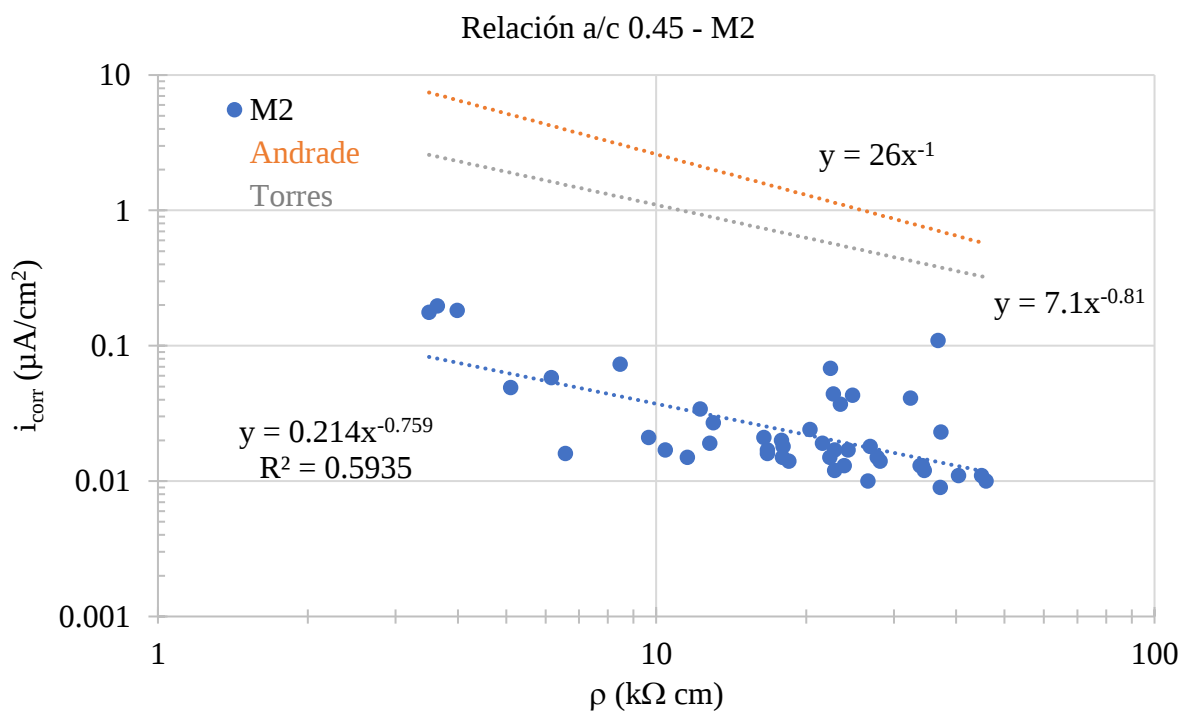


Figura 8. Correlación general de la resistividad eléctrica y la velocidad de corrosión de M1.

La presentación de las correlaciones por espesor de recubrimiento se estableció para observar lo que ocurre cuando no se agrupan tres profundidades con distintos niveles de actividad electroquímica, ya que podría generarse una correlación entre los diferentes recubrimientos. Presentar los valores individuales por profundidad, con su línea de tendencia y su ecuación, permite juzgar si el ajuste general promedia comportamientos homogéneos o incorpora comportamientos dispares. Como se observa en la Tabla 5, ocurre lo segundo, ya que los exponentes por recubrimiento varían entre -0.555 y -0.87, con un valor general de -0.545, para M1, y entre -0.671 y -0.967, con un valor general de -0.759, para M2. El ajuste general no debe entenderse como una propiedad del material, sino como la suma de las contribuciones de los microclimas internos en cada profundidad de recubrimiento.

Tabla 5. Resumen de las correlaciones puntuales y generales de M1 y M2.

Método	Recubrimiento	Ecuación	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
	General	$y = 0.132 \rho^{-0.545}$	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
	General	$y = 0.214 \rho^{-0.759}$	0.59

Como se observa en la Tabla 5, los ajustes en función del espesor de recubrimiento difieren entre ambos métodos, en direcciones opuestas. Es decir, en M1, el coeficiente R² y los exponentes se alejan de la unidad a medida que aumenta el recubrimiento, mientras que en M2 se acercan a la unidad a medida que aumenta el recubrimiento. Dicho de otro modo, la correlación entre la resistividad y la velocidad de corrosión del M2, basada en el acomodo de los agregados, se ajusta mejor a las ecuaciones descritas en la literatura a medida que aumenta el espesor de recubrimiento, mientras que el M1, basado en volúmenes absolutos, se degrada. Esto podría explicarse por el microclima interno, que se mantiene estable gracias al acomodo de los agregados. Sin embargo, debe corroborarse mediante pruebas físicas y no atribuirse únicamente al recubrimiento.

5. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación electroquímica de especímenes de concreto diseñados por dos métodos y con relación a/c, expuestos a un ambiente marino tropical por aproximadamente 1300 días, se establecen las siguientes conclusiones:

- El control de la relación a/c baja permite mantener el acero de refuerzo en estado pasivo frente a condiciones marinas independientemente del espesor de recubrimiento o del método de diseño.
- El M2 demostró ser una alternativa de diseño viable. El acomodo de los agregados permitió una evolución resistiva acorde con el M1.
- La correlación entre la resistividad y la velocidad de corrosión se ve influida por la geometría del espécimen y por la dosificación del concreto. Las ecuaciones de estimación no se alinearon y presentaron comportamientos dispares, probablemente debido a la influencia del entorno natural.
- El diseño de la mezcla afecta la estabilidad del microclima interno frente a los cambios ambientales.

- En el método M1, el modelo propio obtenido se degradó a medida que aumentaba el espesor de recubrimiento. En el M2, la aproximación matemática se ajusta mejor al adentrarse en el concreto.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ing. Mercedes Balancán Zapata y a la M.C. Alexia Zozayal por el apoyo con la obtención de resultados y el análisis de datos. Un agradecimiento póstumo especial al Dr. Viterbo O'Reilly quien fue el creador del 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>
- Hornbostel, 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/jmce7.mteng-17914>

Maldonado, L., Veleza, 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>

Rodríguez, 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>