

## Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado: Ensayos en especímenes de hormigón armado

A. Calvo Valdés<sup>1</sup> , M. H. F. Medeiros\*<sup>1</sup> , G. Macioski<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [medeiros.ufpr@gmail.com](mailto:medeiros.ufpr@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.529>

Recepción: 19/01/2021 | Aceptación: 03/08/2021 | Publicación: 01/09/2021

### RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar la efectividad de un sensor galvánico multi-electrodo en la detección de la probabilidad de corrosión en prismas de hormigón armado sometidos a ciclos húmedos y secos en una solución de NaCl. Se analizaron lecturas de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), obtenidas utilizando un electrodo de cobre de sulfato de cobre ( $Cu/CuSO_4$ ), lecturas de corriente galvánica ( $I_{gal}$ ) y potencial galvánico ( $E_{par}$ ). El sensor desarrollado mostró sensibilidad para detectar el frente de cloruro y predecir la posibilidad de corrosión de la armadura. Las variables  $E_{corr}$ ,  $E_{par}$  e  $I_{gal}$  presentaron comportamientos diferentes como parámetros para monitorear la corrosión.

**Palabras clave:** corrosión; potencial; sensor galvánico; corriente galvánica.

**Citar como:** Calvo Valdés, A., Medeiros, M. H. F., Macioski, G. (2021), "Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado: Ensayos en especímenes de hormigón armado", Revista ALCONPAT, 11 (3), pp. 64 – 87, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.529>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Rua XV de Novembro, 1299 - Centro, Curitiba - PR, 80060-000, Brasil.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, los autores Analiet Calvo Valdés y Marcelo H. F. Medeiros contribuyeron con la actividad de consulta bibliográfica, redacción de textos y desarrollo del programa experimental, en un total de 33,3% cada uno. El autor Gustavo Macioski con la actividad de revisión y consulta bibliográfica, completando el 33,3% restante.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) 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/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2022.

## Corrosion sensor for monitoring reinforced concrete structures: Tests on reinforced concrete specimens

### ABSTRACT

The aim of the research was to evaluate the effectiveness of a galvanic multi-electrode sensor to detect the probability of corrosion in reinforced concrete prisms subjected to drying and wetting cycles in a NaCl solution. The corrosion potential ( $E_{corr}$ ) readings obtained using a copper sulfate copper electrode (Cu/CuSO<sub>4</sub>) were analyzed along with the galvanic current ( $I_{gal}$ ) and galvanic potential ( $E_{par}$ ) readings. The sensor developed showed sensitivity to detect the chloride front and to predict the possibility of corrosion of the reinforcement. The parameters  $E_{corr}$ ,  $E_{par}$  and  $I_{gal}$  presented distinct behaviors in terms of its use as parameters for corrosion monitoring.

**Keywords:** corrosion; potential; galvanic sensor; galvanic current.

## Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado

### RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a eficácia de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos na detecção da probabilidade de corrosão em prismas armados de concreto submetidos a ciclos de secagem e molhagem em uma solução de NaCl. Se analisaram as leituras de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) obtidas por meio de um eletrodo de referência de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>) com as leituras de corrente galvânica ( $I_{gal}$ ) e potencial galvânico ( $E_{par}$ ). O sensor desenvolvido apresentou sensibilidade para detectar a frente de cloretos e prever a possibilidade de corrosão das armaduras. As grandezas  $E_{corr}$ ,  $E_{par}$  e  $I_{gal}$  apresentaram comportamentos distintos como parâmetro de monitoramento da corrosão.

**Palavras-chave:** corrosão; potencial; sensor galvânico; corrente galvânica.

### 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.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://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 degradación de estructuras de hormigón debido a la corrosión afecta la construcción civil en todo el mundo, con repercusiones en función del volumen de casos registrados, la precocidad con la que ocurren, así como la cantidad de recursos involucrados en su evaluación y reparación (Meira, 2017).

El costo anual de la corrosión en todo el mundo supera el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial, aproximadamente USD\$ 2,2 mil millones de dólares (Hays, 2020). En función del momento en que se interviene, los costos son potencializados (Meira, 2017), pudiendo llegar a superar el costo original de la construcción (Dong et al., 2011).

La corrosión reduce el módulo de elasticidad del hierro, disminuye la adherencia entre la armadura y el hormigón, afecta el comportamiento sísmico, y la capacidad de carga estática de las estructuras de hormigón armado. La oxidación del hierro (con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como componente principal) se produce por la corrosión de la barra de acero que provoca una expansión de volumen y aumento de la tensión de tracción en el hormigón, provocando que el hormigón se deforme y aparezcan grietas (Zhao et al., 2017).

La corrosión de la barra de acero en el interior del hormigón ocurre, esencialmente, por dos motivos: primero, debido a la reducción de la alcalinidad del hormigón por la carbonatación, y segundo, por la presencia de iones cloruros, que mismo con el pH elevado, rompen puntualmente la película protectora de la armadura (França, 2011).

La evaluación de las estructuras afectadas generalmente implica estimar la durabilidad de las mismas (Wu et al., 2017). La durabilidad es resultado de la interacción de las estructuras de hormigón con el ambiente, y es influenciada por las condiciones de uso, de operación y por los procesos de mantenimiento. Para evaluar el desempeño de las construcciones se realizan inspecciones visuales en conjunto con ensayos de campo y de laboratorio (Mota, 2011).

Las inspecciones visuales sistemáticas ciertamente reducen el nivel de incertidumbre con relación al estado de la estructura, pero esta técnica presenta importantes limitaciones ya que se basan en observaciones superficiales de la estructura durante pequeños espacios de tiempo (Inaudi, 2009) lo que puede provocar errores peligrosos y un uso ineficiente de los recursos para el mantenimiento de las estructuras.

A través de los sensores en cambio, es posible obtener datos de forma regular, garantizar la simultaneidad de lecturas en varios puntos y, consecuentemente, compatibilizar diversos parámetros (Santos, 2014). Los sensores consiguen fornecer informaciones en tiempo real (Zhao et al., 2017) que alimentan modelos matemáticos de previsión de vida útil (Araújo et al., 2013), de forma a estimar dos etapas fundamentales del fenómeno de la corrosión: la fase de iniciación y la fase de propagación de la corrosión, según el modelo fenomenológico propuesto por Tuutti (1982) (Figueiredo e Meira, 2013).

De esa forma, es posible realizar pronósticos de las estructuras monitoreadas, y disminuir los costos asociados a obras de recuperación o sustitución. En Brasil, por ejemplo, de acuerdo con un estudio del *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)*, hasta el año 2025 un poco más de 89 millones de reales deben ser destinados al mantenimiento de 15 puentes que atienden a 12 estados de la Federación. Parte de esta cantidad será invertida en sistemas de monitoreo, y el uso de sensores puede proporcionar mayor durabilidad y sustentabilidad del parque de obras de arte de la infraestructura pública (M. Torres-Luque et al., 2014).

En EE. UU., según la Administración Federal de Carreteras (*FHWA*), en concordancia con un informe de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (*ASCE*) del 2013, se deben invertir en el mantenimiento de la infraestructura pública, 20.500 millones de dólares anuales hasta el 2028. En Europa, el costo anual estimado para el mantenimiento de puentes de hormigón armado, es de alrededor de mil millones de euros (Zoghi, 2013).

Por lo tanto, los sensores electroquímicos industrializados han atraído la atención (Zhao et al., 2017), incluyendo: electrodos integrados, sondas de corriente de macro-corrosión, sensores de polarización lineal, sensores de resistencia eléctrica, sensores de potencial de corrosión y sensores galvánicos (Dong et al., 2011; Chen et al., 2017).

En el contexto de la inducción de corrosión por cloruro, un sensor galvánico es probablemente la mejor opción para el monitoreo (Klassen y Roberge, 2008). Su instalación en la estructura proporciona medidas de intensidad de corriente galvánica y potencial de corrosión que permiten monitorear la profundidad del frente de penetración de cloruros (Mccarter y Vennesland, 2004; Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013). Están formados por dos metales con diferentes potenciales eléctricos (ánodo y cátodo) (Andrade et al., 2008), separados espacialmente (Angst y Buchler, 2015).

La macro-celda galvánica creada por los metales dará como resultado un flujo de corriente ( $I_{gal}$ ) entre el metal que actúa como ánodo y el metal que actúa como cátodo en el par. Este flujo se puede medir sin la aplicación de corriente externa, siendo esta la principal ventaja de este tipo de sensor, ya que garantiza la sencillez del sensor y de los sistemas de medida, reduciendo los costos asociados. El flujo de corriente dentro de la macro-celda se puede medir usando un amperímetro de resistencia cero. Por la ley de Ohm, este flujo de corriente entre las regiones mencionadas está limitado por la resistencia del electrolito, la resistencia a la polarización anódica, y la resistencia a la polarización catódica (Andrade et al., 2008; Baltazar et al., 2007). Por tanto, la corriente inducida por el acoplamiento del ánodo y el cátodo es proporcional a la disolución del hierro en el ánodo de la macro-celda (Mccarter y Vennesland, 2004).

La corriente galvánica ( $I_{gal}$ ) no debe confundirse con la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ), que se puede obtener mediante la ecuación de Stern-Geary, a partir del valor de la resistencia de polarización ( $R_p$ ) (Martínez y Andrade, 2009), o mediante la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), que continúa siendo una técnica utilizada fundamentalmente en laboratorio (McCarter y Vennesland, 2004) debido a la superposición de arcos de fenómenos simultáneos y ruidos de medición, asociados a la heterogeneidad del hormigón en estructuras en servicio (Ribeiro et al., 2015).

Por otro lado, la estimación directa de los valores reales de  $R_p$  a partir de la relación entre la variación de potencial y el cambio inducido en la corriente ( $\Delta E/\Delta I$ ), generalmente no es factible en grandes estructuras de hormigón. Porque la señal eléctrica aplicada tiende a desaparecer a medida que aumenta la distancia entre el contraelectrodo ( $CE$ ), necesario para registrar el parámetro, y el electrodo de trabajo ( $WE$ ). Para evitar este problema, es posible utilizar anillos de confinamiento en una determinada zona de la superficie del ( $WE$ ) (Feliú et al., 1990). Sin embargo, es inviable confeccionar un sensor para empotrar en hormigón que, además de permitir la lectura de la  $R_p$ , confine una zona específica de la armadura (Martínez y Andrade, 2009).

Un sensor a ser embebido en el hormigón para medir  $R_p$  e  $I_{corr}$ , debe incluir en su composición un electrodo de referencia (REF), un contraelectrodo ( $CE$ ), y también se requiere un electrodo de trabajo ( $WE$ ) para evitar el efecto de distancia crítica ( $D_{crit}$ ) entre el ( $CE$ ) y la armadura principal en el caso que esta se encuentre en estado pasivo. Además de los parámetros de corrosión electroquímica, se debe considerar un termopar para medir temperatura y medidores de resistividad, para considerar el efecto de la variación de temperatura y humedad en el hormigón. Por lo tanto, aumentarían los costos asociados a materiales y sistemas de lectura.

El sensor galvánico es uno de los sensores de corrosión más comercializados en el mercado internacional. Sin embargo, un sensor puede costar alrededor de USD\$ 400, lo que encarece y dificulta su uso en obras públicas, además del limitado número de proveedores (Araújo et al., 2013). En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de un sensor galvánico con múltiples electrodos, fabricado con materiales brasileños de bajo costo. Para ello, los sensores desarrollados fueron embebidos en prismas de hormigón armado que fueron expuestos a una

solución acuosa con la adición de NaCl (3,5% en masa) en ciclos alternados de inmersión parcial y secado. Se intentó simular las condiciones de servicio de una zona de variación de mareas dentro de una atmósfera marina. El trabajo también tiene como objetivo evaluar cómo la disposición del sensor, la resistencia del hormigón y el efecto de los ciclos de humectación y secado pueden afectar las lecturas realizadas.

El sensor galvánico fabricado utiliza el sensor *CorroWatch Multisensor* como referencia, pero en lugar de utilizar titanio activado como cátodo, que es diez veces más caro que el acero convencional (ISE, 2020), se eligió el cobre. Así, el trabajo aborda una investigación relacionada con la solución de problemas vinculados con el control de calidad, patología y recuperación de la construcción, abordaje que es un tema recurrente en la revista Alconpat (Real et al., 2015; Hernández et al., 2016; Macioski et al., 2016; Pérez et al., 2018).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Cuerpos de prueba de concreto

El programa experimental consistió en el análisis del comportamiento de sensores galvánicos instalados en prismas de hormigón armado, con dimensiones: (150 x 150 x 100) mm y dos barras de acero CA-50 con un diámetro de 6,3 mm (1/4") colocadas paralelas entre sí. La Figura 1 ilustra la configuración del cuerpo de prueba. Para cada hormigón se produjeron 4 cuerpos de prueba, totalizando 8 prismas.

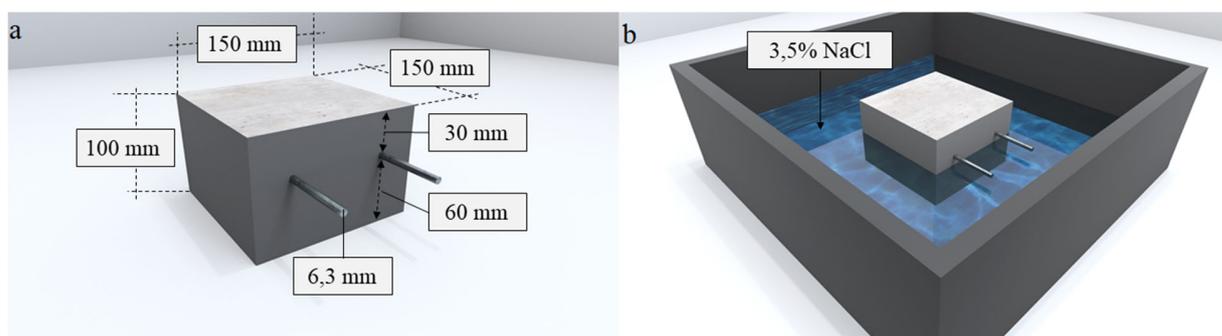


Figura 1. (a) Configuración del cuerpo de prueba prismático de hormigón armado. (b) Cuerpo de prueba inmerso parcialmente. Fuente: Autor.

En los prismas, el recubrimiento de las barras principales se definió utilizando como referencia la NBR 6118: 2015. Se consideró que las estructuras o algunos de sus elementos pueden estar expuestos a condiciones ambientales muy fuertes (Clase IV). Para la Clase IV, la norma indica una cobertura mínima ( $c_{min}$ ) de 50 mm, asumiendo que los cuerpos de prueba son representativos de una viga o columna. De esta forma, el recubrimiento del refuerzo principal con relación a la superficie del prisma expuesta a la solución de NaCl, fue de 60 mm. En las superficies laterales y en la superficie expuesta al aire, las barras tienen un recubrimiento de 30 mm, como se muestra en la Figura 1 (a).

En este experimento se utilizaron dos hormigones, utilizados convencionalmente en plantas de hormigón de la región de Curitiba, como muestra la Tabla 1. El ensayo de resistencia a la compresión de los hormigones (cilindros  $\varnothing 10 \times 20$  cm), se realizó de acuerdo con la NBR 5739 (2018). Se produjeron tres probetas para cada serie. La resistencia a la compresión promedio ( $f_{cm}$ ) del hormigón con relación agua/cemento (a/c) de 0.75 fue 20.62 MPa, y la  $f_{cm}$  del hormigón con (a/c) de 0.45 fue 39.36 MPa. La prueba se llevó a cabo con los cuerpos de prueba en estado saturado con superficie seca.

Tabla 1. Proporciones de mezcla utilizadas para moldear los cuerpos de prueba.

Concreto	Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Arena [kg/m <sup>3</sup> ]	Piedra [kg/m <sup>3</sup> ]	a/c [kg/kg]
15 MPa	242,11	970,86	997,50	0,75
30 MPa	410,04	758,58	1053,82	0,45

El hormigón de 15 MPa simula una estructura antigua. Cabe señalar que hace algunas décadas eran permitidas resistencias características ( $f_{ck}$ ) menores que 20 MPa en estructuras. La norma brasileña NBR 6118: 1980 solo establecía que el hormigón debía tener una resistencia característica  $f_{ck}$  superior a 9 MPa, y compatible con la adoptada en el proyecto, así como cumplir con los criterios de control de calidad previstos en la ABNT NBR 12655. La NBR 6118: 1980 no incluía criterios de durabilidad para la ejecución de hormigón estructural según el nivel de agresividad del entorno al que estaría expuesta la estructura. Además, normas como la ACI 318-14 recomiendan un  $f_{ck}$  mínimo de 17 MPa para estructuras de hormigón armado expuestas a la humedad y una fuente externa de cloruros (Clase C2).

El hormigón de 30 MPa corresponde a la Clase III (atmósfera marina o industrial) según la NBR 12655: 2006 y la versión actualizada de la NBR 6118: 2014, similar al concreto recomendado por la ACI 318-14 ( $f_{ck} = 30$  MPa - a/c = 0.40) para las mismas condiciones de exposición. Para la ejecución de los prismas de hormigón armado se utilizó cemento CP-II-F-32, el cual tiene hasta un 25% de material carbonoso (NBR 16697: 2018). El agregado fino fue arena fina y como agregado grueso se utilizó grava No. 1. La caracterización física de los agregados y los estándares considerados para ello se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización física de los agregados.

Agregado	Dimensión máxima característica	Módulo de finura	% de finos	Masa específica
Grueso (Piedra 1)	19,00 mm	1,83	0,39%	2,66 g/cm <sup>3</sup>
Fino (Arena fina)	0,600 mm	2,40	9,06%	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Normativa	ABNT NM 248:2003			ABNT NBR NM 52:2003 ABNT NBR NM 53:2003

La consistencia del hormigón se midió mediante el método de ensayo de asentamiento (*Slump test*), de acuerdo con las recomendaciones de la norma brasileña NBR 7223:1992. Para ambos hormigones se adoptó una fluidez en el rango de  $80 \pm 10$  mm, con el fin de mantener una consistencia plástica para producir todos los cuerpos de prueba, que no requirieron el uso de aditivos. Los prismas fueron sometidos a un proceso de cura por inmersión en agua saturada con cal como indica la norma NBR 5738:2003 por un período de 91 días.

Se adoptó un período de cura mayor que el recomendado por la norma NBR 5738: 2003 (28 días) para simular una estructura real que será sometida a ensayos de campo después de años en servicio. Por lo tanto, no se realizaron lecturas electroquímicas durante el endurecimiento del hormigón o durante el período de curado del hormigón. Dado que el objetivo era simular el interior de una estructura real para evaluar el desempeño del sensor, no se consideró un período de estabilización del hormigón fuera de la cámara de cura. Se hicieron consideraciones similares en el trabajo de Rocha (2012) y de Dotto (2006).

Finalmente, luego del proceso de curado de 91 días, los cuerpos de prueba se colocaron en un horno a 50 °C durante 5 días para su secado. Enseguida, las superficies laterales de los prismas fueron

aisladas de la exposición a cloruros con una pintura epoxi, con la intención que el frente de contaminación avanzara solamente por la fase con recubrimiento de 60 mm. Para inducir la corrosión del acero embebido en el hormigón, se utilizó un proceso de envejecimiento acelerado que involucró la absorción y difusión de iones de cloruro en la matriz del cemento. El envejecimiento acelerado siguió un sistema de inmersión parcial alternado en ciclos. Los ciclos consistieron en el secado en estufa a 50 °C durante 5 días y la inmersión parcial de los prismas en agua con 3,5% de NaCl en masa durante 2 días, como muestra la Figura 1 (b). Este enfoque se adoptó con base en otros trabajos que utilizaron el mismo sistema de inmersión alternado (Freire, 2005; Dotto, 2006; Silva, 2010; Rocha, 2012; Silva, 2017).

Además, el sistema adoptado y la concentración de sal intentan reproducir condiciones de servicio similares a una zona de variación de mareas, dentro de una atmósfera marina. En esta región, hay contacto con agua contaminada con cloruros, con ciclos de mojado y secado. Lo que caracteriza una condición de exposición crítica en términos de corrosión del refuerzo. El principal mecanismo de degradación presente en estas condiciones es la corrosión del refuerzo por acción de iones cloruro (Lima y Morelli, 2004), que es el ataque considerado para evaluar el desempeño de los sensores en este trabajo.

## 2.2 Configuración del sensor

La macro-celda galvánica considerada en el estudio está formada por cobre y acero CA-50. Se utilizaron barras de acero de 60 mm de longitud y 6,3 mm (1/4") de diámetro (ánodo), instaladas a diferentes alturas sobre una placa de cobre (cátodo) de 50 por 50 mm, y 4 mm de espesor. Todos los metales fueron pulidos con cepillo de alambre de acero. A continuación, se enjuagaron con agua destilada, se sumergieron en alcohol y se secaron al aire. La placa de cobre fue configurada para que el área expuesta ( $A_c$ ) fuera igual a la suma de las áreas superficiales de los ánodos ( $A_a$ ) que componen la macro-celda galvánica, para una relación  $A_c/A_a = 0.97$ . La figura 2 muestra un modelo del sensor galvánico utilizado en el estudio.

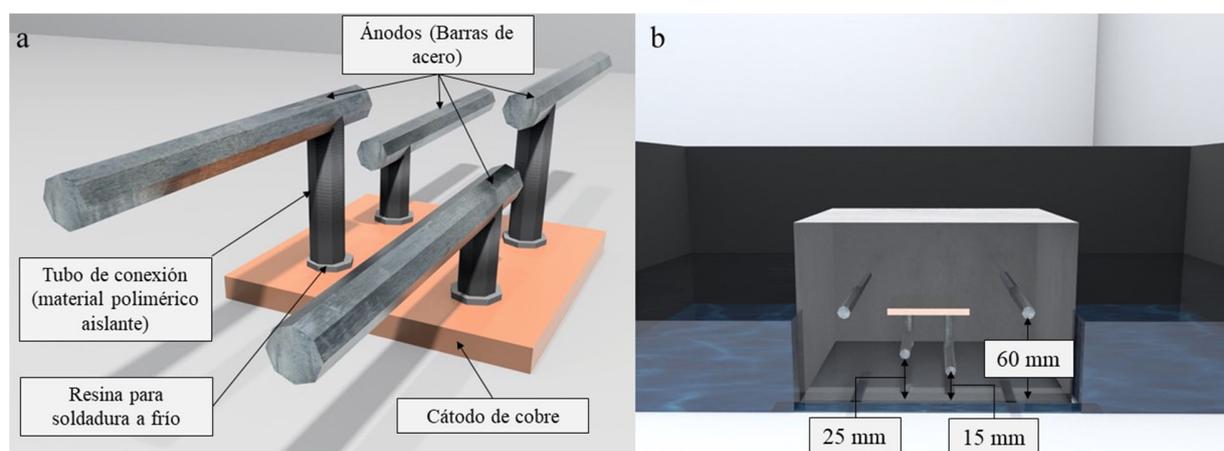


Figura 2. a) Sensor galvánico utilizado en el estudio. b) Sensor galvánico instalado dentro del cuerpo de prueba. Fuente: Autor.

Dos de los ánodos del sensor quedaron instalados a una profundidad de 15 mm y los dos restantes a una profundidad de 25 mm, con respecto a la superficie del cuerpo de prueba expuesta a la solución de NaCl, como se muestra en la Figura 2 (b). Siendo estas las profundidades en las que el sensor debe indicar estado activo de corrosión por la entrada de cloruros. La Figura 3 muestra el proceso de producción de los prismas y la instalación del sensor.

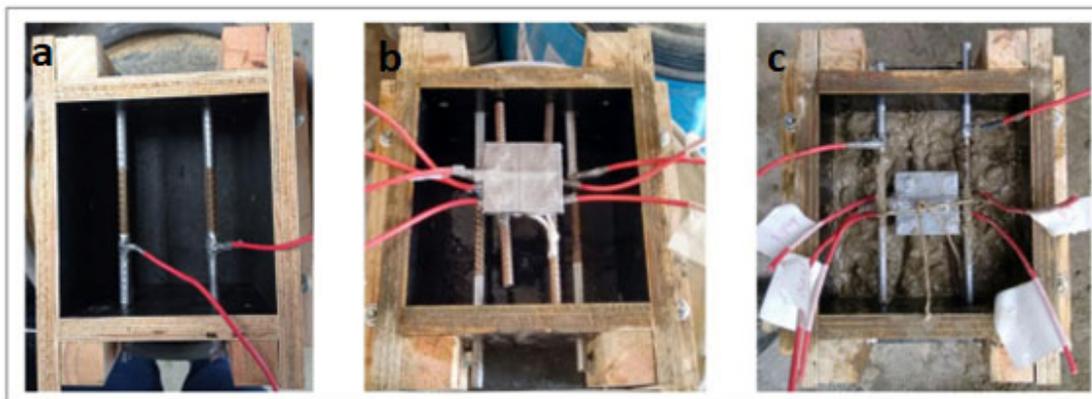


Figura 3. a) Instalación de las barras principales. b) Formas lubricadas con aceite y con el sensor colocado. c) Producción con el sensor embebido. Fuente: Autor.

Para encajar las barras de acero en la placa de cobre se realizaron 4 orificios de 8.0 mm de diámetro ( $> 6,3$  mm), como se muestra en la Figura 4. Las barras de acero se fijaron en la placa de cobre con resina para soldadura en frío, con el objetivo de evitar un par galvánico no deseado que podría comprometer el correcto funcionamiento del sensor además de exponer el dispositivo a una degradación prematura. Para el circuito eléctrico externo que conecta los electrodos y permite el flujo de electrones, se utilizó cable de cobre protegido con una película de PVC y una sección transversal de  $2.5 \text{ mm}^2$ , el cual fue soldado a los metales involucrados. Los puntos de soldadura se protegieron con material polimérico aislante.

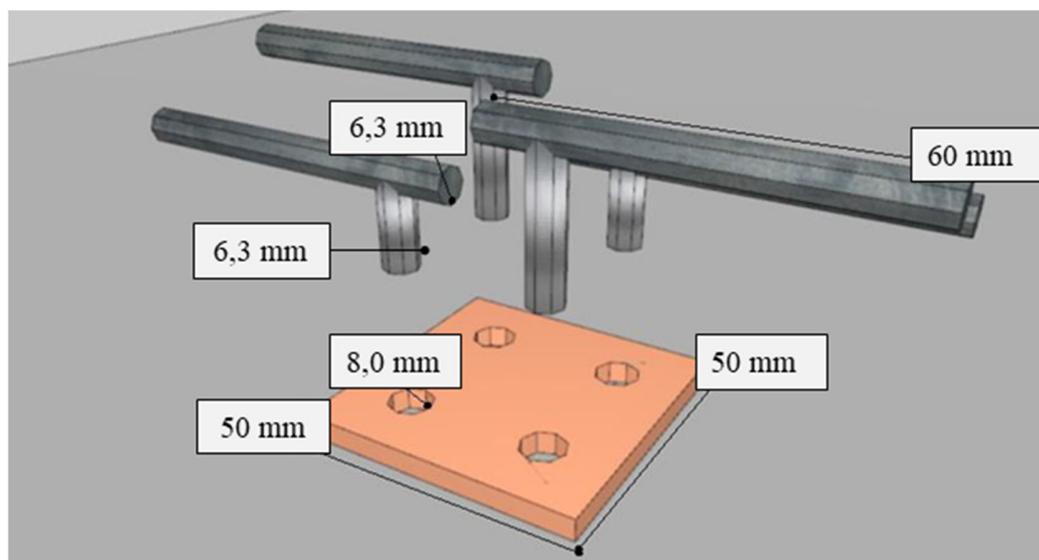


Figura 4. Esquema de montaje del sensor.

Los metales (electrodos) para la construcción del sensor galvánico fueron elegidos en función del potencial de equilibrio irreversible predeterminado ( $E_{eq}$ ). Los potenciales de equilibrio irreversibles son potenciales de electrodo que varían por causa de la polarización o factores externos. Se determinan experimentalmente y se denominan comúnmente potenciales de corrosión (Gentil, 1996). Para determinarlos, se utiliza un electrodo de referencia, como el electrodo de hidrógeno estándar, por ejemplo. El  $E_{eq}$  indica la tendencia del electrodo de sufrir reducción u oxidación en un determinado medio. Cuanto mayor es el potencial de corrosión del electrodo en una tabla de potenciales, mayor es la tendencia del electrodo a sufrir oxidación, es decir, a comportarse como

un ánodo (Gentil, 1996; Pawlick et al., 1998; Souza, 2014).

El potencial de equilibrio irreversible del hierro, sumergido en un electrolito que simula agua de mar, con referencia a un electrodo de hidrógeno, está en el rango de (-0,34 a 0,50) V. Sin embargo, el potencial de corrosión del cobre está en el rango de (-0,02 a 0,05) V (Akimov, 1957). En el estudio, no se llevó a cabo el correspondiente procedimiento experimental para determinar el valor de potencial irreversible del cátodo y el ánodo por separado.

Finalmente, con el fin de hacer más práctico el sensor, proteger los cables de cobre y en consecuencia mejorar el registro de lecturas electroquímicas, se colocaron conectores eléctricos en todos los extremos, como se muestra en la Figura 5 (b).

### 2.3 Ensayos de caracterización y técnicas electroquímicas

En cada ciclo de exposición, las lecturas electroquímicas se realizaron en el segundo día de inmersión parcial en el agua con 3,5% de NaCl. Para determinar el potencial de los pares del sensor a lo largo del proceso de envejecimiento, se utilizó el registrador de datos LabVIEW 8.5, que leyó la diferencia de potencial de polarización ( $E_{par}$ ), como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. a) Registrador LabVIEW 8.5 leyendo  $E_{par}$ . b) Cuerpo de prueba con conectores eléctricos. Fuente: Calvo, (2018).

En teoría, el potencial de un par galvánico ( $E_{par}$ ) es el resultado de la combinación de los potenciales de los metales involucrados. Es un proceso espontáneo causado por la naturaleza diferente de los electrodos, que conduce a la polarización de ambos metales para un potencial combinado ( $E_{par}$ ) (Gentil, 1996; Pawlick et al., 1998). Es decir, se obtiene de la diferencia entre el potencial positivo correspondiente al cátodo ( $E_{cathode}$ ) y el potencial negativo (Ánodo) correspondiente al ánodo, como se muestra en la Ecuación (1) (Pawlick et al., 1998) en el ambiente en el que están insertados.

$$E_{par} = E_{célula} = E_{cátodo} - E_{ánodo} \quad (1)$$

En la práctica,  $E_{cátodo}$  es el potencial de polarización del cátodo, y  $E_{ánodo}$  es el potencial de polarización del ánodo. El potencial de polarización es el resultado del desplazamiento ( $\eta$ ) del potencial de equilibrio irreversible del metal ( $E_{eq}$ ) por la formación del par galvánico. Por tanto, la ecuación 1 se puede escribir como muestra la Ecuación (2).

$$E_{par} = (E_{eq} + \eta)_{cátodo} - (E_{eq} + \eta)_{ánodo} \quad (2)$$

Como no se aplica corriente externa a la macro-célula galvánica, el potencial de polarización de los electrodos (ánodo y cátodo) siempre está en el rango del potencial natural de los metales dentro del hormigón (Mccarter y Vennesland, 2004). Por lo tanto, el valor de  $E_{par}$  fluctuará en función de las condiciones del ambiente (Pawlick et al., 1998). Siendo así, el valor de  $E_{par}$  debe obtenerse empíricamente (Sousa, 2014), y su valor incluye los valores de  $E_{cq}$  y  $\eta$ , prescindiendo de la determinación de estos factores por separado.

De esa forma, el registrador de datos generó una lectura individual correspondiente a cada uno de los pares ánodo-cátodo del sensor proyectado. El equipo de lectura reconoce cada par como un canal de lectura individual. Se analizó si la lectura de la diferencia de potencial se mantiene estable a lo largo del tiempo, y el tipo de reacción que indicaba: galvánica ( $E_{par}>0$ ) o electrolítica ( $E_{par}<0$ ). Para registrar la corriente galvánica ( $I_{gal}$ ), se utilizó la técnica electroquímica Zero Resistance Ammeter (ZRA) que utiliza un amperímetro de resistencia cero, acoplado a un potencióstato SP-200 que realiza la lectura a través del software EC-Lab. Esta técnica consiste en medir la corriente galvánica en un par formado por metales diferentes, uno con comportamiento anódico y otro con comportamiento catódico.

La técnica también se utiliza para medir ruido electroquímico. Consiste en estabilizar el voltaje entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, y medir la corriente y el potencial con relación al electrodo de referencia (EC-LAB., 2011). En este caso, los electrodos de trabajo son las barras de acero del sensor galvánico. Como contraelectrodo se utilizó una malla de acero inoxidable y el electrodo de referencia fue la placa de cobre del sensor.

Para validar el comportamiento del sensor, las lecturas de corriente galvánica y potencial del par se correlacionaron con las lecturas de potencial de circuito abierto ( $E_{corr}$ ). Por su sencillez, la medición del potencial de corrosión,  $E_{corr}$ , es el método más utilizado en las determinaciones de campo (Martínez y Andrade, 2009). A partir de estas mediciones, se dibujan mapas potenciales que revelan las zonas que tienen más probabilidades de corroer en estado activo (ASTM C876-15). En cada ánodo se efectuó una lectura, totalizando 6 lecturas por cuerpo de prueba: cuatro en los ánodos del sensor y dos en las barras de refuerzo. En las lecturas se utilizó un electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>. Para analizar los resultados con el fin de estimar la probabilidad de corrosión, se consideraron los límites encontrados en la ASTM C876-15.

Aún no existe una normativa que establezca un rango fijo de valores de  $I_{gal}$  y  $E_{par}$  para caracterizar el estado activo del acero en el hormigón. Por tanto, no es el valor absoluto lo que se debe considerar, sino la variación de sus valores en el tiempo (Raupach y Schiessl, 2001; Araújo et al., 2013).

Finalmente, se realizó el método colorimétrico mediante aspersión de nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>). Este método permite determinar de forma cualitativa la profundidad del frente de penetración de los cloruros que ingresan al hormigón por absorción y difusión. Este ensayo no cuantifica los cloruros libres (Real et al., 2015; França, 2011, Pontes et al., 2020). El ensayo consiste en rociar una solución acuosa de AgNO<sub>3</sub> (0,1 M) sobre las mitades del espécimen recién fracturado. Cuando se rocía la solución de nitrato de plata sobre la superficie del hormigón, se produce una reacción fotoquímica. Cuando hay cloruros libres, se produce un precipitado blanco de cloruro de plata. En la región sin cloruros o con cloruros combinados, se forma un precipitado marrón, óxido de plata (Medeiros, 2008; Marcondes, 2012).

Para realizar el ensayo, los cuerpos de prueba se rompieron en la dirección del flujo de cloruros justo antes de la aspersión para evitar que ocurriera la carbonatación. En paralelo, en una de las mitades se realizó una prueba con spray de fenolftaleína (1% en alcohol etílico) para evitar falsos positivos. Ya que en presencia de carbonatos también se forma un precipitado blanco (Jucá, 2002). Después de pulverizar la solución acuosa de nitrato de plata, se realizaron diez mediciones de la profundidad de penetración de los cloruros, a cada 10 mm, siguiendo las recomendaciones de NT BUILD 492 (2000). Evitando así errores grandes en la lectura de la profundidad alcanzada por los

cloruros. Antes de rociar el nitrato de plata y la fenolftaleína, se cepilló cada mitad para eliminar el polvo de la superficie.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Potencial de corrosión

La Figura 6 muestra los resultados del Potencial de Circuito Abierto ( $E_{corr}$ ) en los especímenes de hormigón con 15 MPa. La Figura 7 muestra los datos correspondientes a los cuerpos de prueba con 30 MPa. Ambas figuras muestran el promedio de las lecturas obtenidas en los ánodos del sensor galvánico instalado en el interior de los especímenes, con un recubrimiento de 1,5 cm y 2,5 cm, respectivamente. En estas figuras también se muestran los promedios correspondientes a las barras principales con recubrimiento de 6 cm.

Al final del primer ciclo de inmersión, se observaron valores de  $E_{corr}$  negativos ( $<-350$  mV) en los ánodos instalados a 1,5 cm y 2,5 cm, en ambos hormigones. Varias investigaciones observaron valores más negativos (indicativos de corrosión activa) en el inicio de las pruebas de corrosión (Gurdián et al., 2014; Rocha et al., 2014; Capraro et al., 2016; Jiang et al., 2017; Medeiros et al., 2017; Godinho et al., 2018; Godinho et al., 2019; e Capraro et al., 2021). Este comportamiento está relacionado con el proceso de formación de la película protectora sobre el acero, que implica la oxidación de la superficie metálica y, por ello, genera lecturas electronegativas inicialmente (Poursaee, 2016; Meira, 2017; Ribeiro et al., 2018).

Siendo así, el  $E_{corr}$  cambia gradualmente, pasando de valores más negativos a valores más positivos, hasta que se estabiliza e indica la formación de la película protectora (Sun et al., 2017), en ausencia de agentes agresivos dentro del hormigón. Capraro et al. (2021), por ejemplo, observaron altos valores negativos ( $-600$  mV /  $-700$  mV) desde el inicio del monitoreo hasta 800 días en todas las series expuestas a ciclos de inmersión y secado en cámara seca ( $55 \pm 5\%$  HR y  $23 \pm 2$  ° C). Del mismo modo, Godinho et al. (2018), observaron lecturas en el rango de  $-486$  mV a  $-550$  mV hasta 100 días.

Para favorecer la formación de la película protectora en barras de acero antes de concretar, Ghods et al. (2010), Nahali et al. (2014), Williamson e Isgor, (2016) y Godinho et al. (2019), sugieren la inmersión de las barras de acero en soluciones sintéticas que simulan el interior del hormigón, antes de concretar.

En este trabajo, el monitoreo de los ánodos instalados a 1,5 cm y 2,5 cm no mostró un nivel de estabilización, sino una tendencia a volverse más electronegativo a medida que aumentaba el contenido de cloruros en el interior del hormigón.

En cuanto a la durabilidad del hormigón, la ABNT NBR 6118 (2014) estipula valores mínimos de recubrimiento ( $c_{min}$ ) sobre la armadura según la agresividad del entorno en el que se inserta la estructura. En este caso, para los ánodos del sensor galvánico (1,5 y 2,5 cm), estos valores no se respetaron intencionadamente. Sumado a esto la interconectividad entre los poros existentes y las micro-grietas en la pasta, la eficiencia de la protección física que proporciona el revestimiento, es reducida.

Además, según Leek (1991) y Ribeiro et al. (2014), incluso con la reserva alcalina resultado de la concentración de  $Ca(OH)_2$  en el hormigón y la película de protección, la presencia de cloruros en el interior del hormigón puede desencadenar la disolución de la película protectora e iniciar el proceso corrosivo. Según los autores Huafu et al. (2015) y Jin et al. (2017), a medida que aumenta el grado de contaminación por cloruros, más negativo tiende a volverse el valor de  $E_{corr}$ .

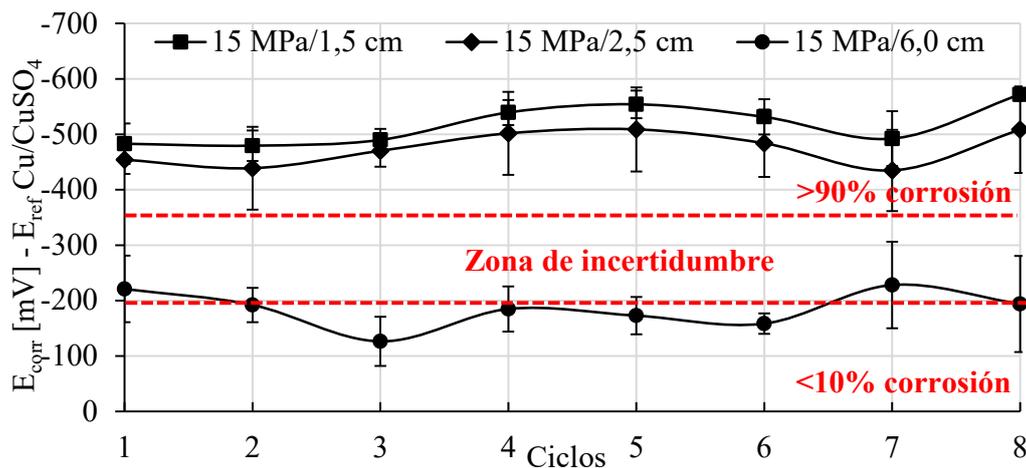


Figura 6. Potencial de corrosión para el hormigón de 15 MPa. Fuente: Autor.

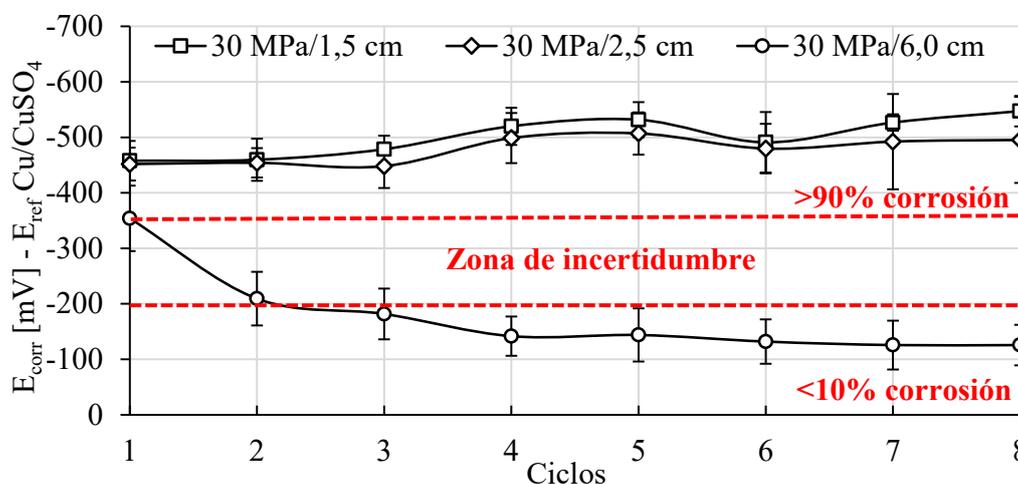


Figura 7. Potencial de corrosión para el hormigón de 30 MPa. Fuente: Autor.

Por otro lado, en las barras principales con 6 cm de recubrimiento, la probabilidad de corrosión fue menor que 10%, o el  $E_{corr}$  se mantuvo en el rango de (-200 a -350 mV), en ambos hormigones. Un comportamiento similar fue observado por los autores Romano et al. (2013), quienes estudiaron el desempeño de un sensor con electrodos a diferentes profundidades con relación a la superficie expuesta del espécimen: 1,5 y 3 cm. En el estudio, el electrodo colocado a menor profundidad indicó estado activo de corrosión antes del electrodo con recubrimiento de 3 cm. Además, las barras de refuerzo con recubrimiento de 4 cm pasaron al estado activo 100 días después que el electrodo del sensor instalado a menor profundidad.

Teóricamente, los valores de  $E_{corr}$  más electronegativos indican un nivel crítico de iones de cloruro alrededor de los ánodos del sensor. Si los ánodos se instalan a diferentes profundidades, los ánodos más cercanos a la superficie exterior, a través de la cual se produce la penetración de iones, deberían presentar más valores electronegativos más rápidamente que los ánodos ubicados a mayor profundidad (Romano et al., 2013).

Finalmente, el análisis de varianza ANOVA y el posterior análisis de Tukey con 95% de confianza, indicaron que la resistencia del hormigón no influyó en los resultados obtenidos durante el monitoreo del potencial de corrosión. Por tanto, este parámetro en los especímenes de ambos hormigones se comportó de la misma forma.

### 3.2 Potencial del par

Las Figuras 8 y 9 muestran los valores promedios de potencial del par para los seis ánodos del sistema (sensor de corrosión + barra de acero). Para el hormigón de 15MPa, cuando el valor de potencial del par era negativo, la probabilidad de corrosión del ánodo era menor que 10% o estaba en la zona de incertidumbre de acuerdo con las lecturas de potencial de circuito abierto.

Con base en los resultados observados en este trabajo, 20 mV / min. es el valor de potencial del par ( $E_{par}$ ) que caracteriza al par galvánico estudiado, para la disposición y metales utilizados (acero carbono-cobre). En paralelo, 200 mV / min. aparenta indicar el cambio para el estado activo (indicado con una línea discontinua roja en las Figuras 8 y 9).

El potencial del par de los ánodos con recubrimiento de 1,5 cm y 2,5 cm, estuvo en el rango de 20 a 200 mV / min., y el  $E_{corr}$  indicaba corrosión activa, durante los primeros ciclos. A partir del 4º ciclo en adelante, el potencial del par fue superior a 200 mV / min., y los ánodos estaban definitivamente en estado activo, independientemente del recubrimiento. Dado que los valores de  $E_{par}$  positivos indican que el proceso de oxidación predomina sobre el proceso de reducción y el ánodo está sufriendo corrosión (polarización anódica). Cuanto mayor es la diferencia de potencial en el par galvánico, más intensa tiende a ser la polarización anódica (Pawlick et al., 1998, Sousa, 2014; Fernandes y Martendal, 2015) y más intensa es la reacción de corrosión en el par.

Para el hormigón de 30MPa (Figura 9), se observó un comportamiento similar en los seis ánodos a 1,5, 2,5 y 6,0 cm de profundidad. La resistencia del hormigón no influyó en los resultados obtenidos durante el monitoreo del potencial del par, según análisis estadístico (ANOVA y Tukey con 95% de confianza). Es necesario destacar que el error promedio de las lecturas de  $E_{par}$  es pequeño en comparación con el  $E_{corr}$  (Figuras 6 y 7). De esa forma, la estabilidad en las lecturas tomadas a través del sensor galvánico, fue comprobada.

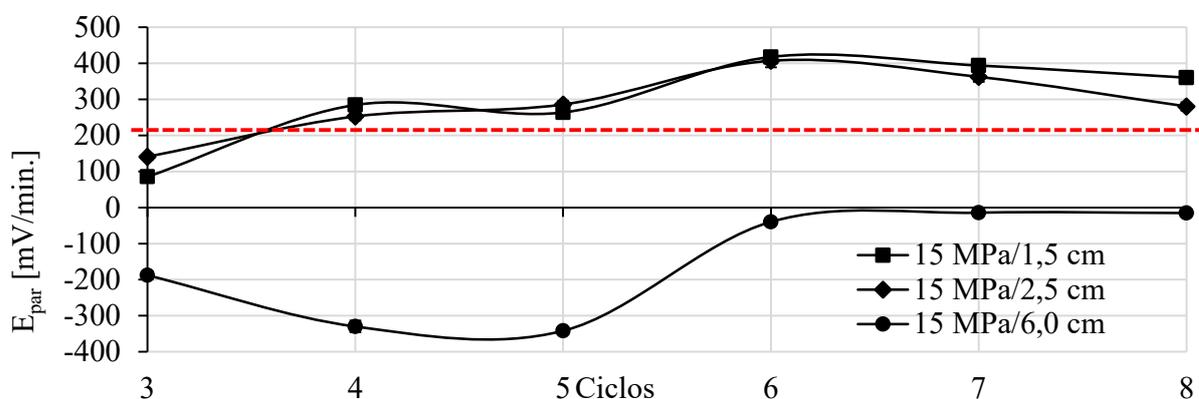


Figura 8. Potencial del par para el hormigón de 15 MPa. Fuente: Autor.

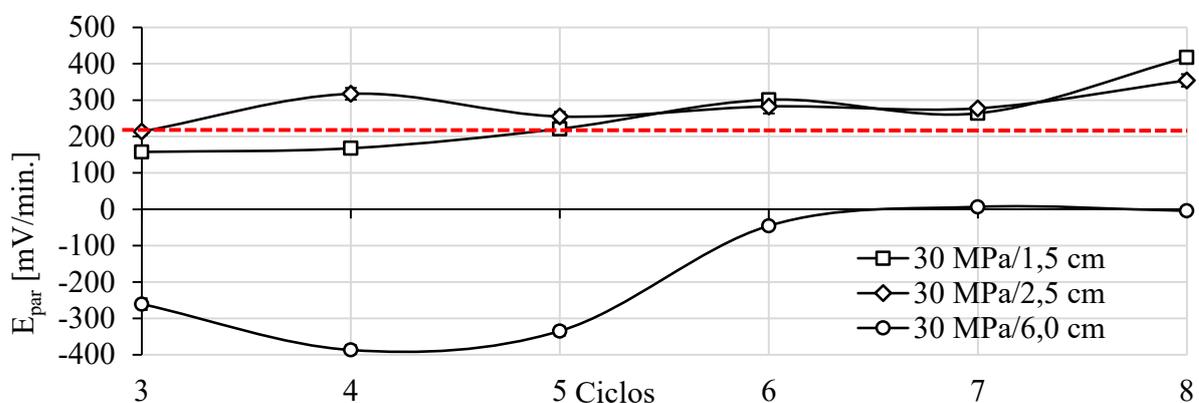


Figura 9. Potencial del par para el hormigón de 30 MPa. Fuente: Autor.

Angst y Buchler (2015) exponen algunas dificultades intrínsecas para monitorear el potencial mixto de una macro-celda galvánica ( $E_{par}$ ): (i) las reacciones anódicas y catódicas generalmente ocurren en el mismo elemento estructural, (ii) o no es posible colocar electrodos de referencia cerca del ánodo y el cátodo, (iii) o la conductividad del electrolito es demasiado alta y, por lo tanto, la diferencia de potencial demasiado baja para ser medida con precisión.

Sin embargo, Angst y Buchler (2015) se refieren a una macro-célula formada en la superficie de una barra de acero, producto de la penetración de cloruros en el hormigón que causa corrosión localizada. Un sensor galvánico en cambio, está formado por pequeñas piezas de metal con diferentes potenciales eléctricos donde una actuará como ánodo y la otra como cátodo; embutidos en el hormigón a profundidades siempre menores que la del refuerzo (Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013), lo que reduce la influencia de la conductividad del electrolito.

Resta entonces considerar el aspecto (ii) mencionado por los autores: la posibilidad de colocar electrodos de referencia cerca del ánodo y del cátodo. Así, en futuros estudios que utilicen el sensor galvánico propuesto en este trabajo, se recomienda instalar también un electrodo de referencia. Esta práctica permitirá determinar por separado el potencial del ánodo y del cátodo, y así poder determinar la curva de polarización de cada electrodo, y mejorar la monitorización del potencial del par galvánico.

También se sugiere monitorear el comportamiento del potencial del par ( $E_{par}$ ) en un ambiente libre de agentes agresivos, hasta que el parámetro alcance un punto de equilibrio en el rango de valores positivos. Dado que su valor es función de los potenciales de los metales que componen el par galvánico en el interior del hormigón (Pawlick et al., 1998; Mccarter y Vennesland, 2004).

Además, la estabilidad a lo largo del tiempo del potencial del sensor también es influenciada por las densidades de corriente anódica y catódica. A su vez, las corrientes anódica y catódica son función del área del ánodo y del área del cátodo, respectivamente (Pawlick et al., 1998).

Por lo tanto, si el ánodo tiene un área insuficiente, el potencial del par mudará para valores más altos con un límite superior representado por el potencial de circuito abierto del metal que actúa como cátodo. A medida que aumenta el área del cátodo con relación al ánodo, aumenta la demanda de electrones del cátodo, mientras que el área del ánodo desde el cual se suministrarán los electrones disminuye, y así aumenta la velocidad de disolución del ánodo (Sousa, 2014). En estas condiciones, existe el riesgo de que el ánodo se degrade excesivamente y disminuya la vida útil del sensor. Por tanto, el comportamiento del sensor galvánico debe evaluarse con una relación área cátodo / área ánodo ( $A_C/A_A$ ) igual a 1, con el fin de mejorar el funcionamiento del sensor propuesto en el trabajo.

Inicialmente, el programa experimental no preveía la realización de este ensayo, pero resultó sumamente importante para comprender el comportamiento del sensor a lo largo del tiempo.

### 3.3 Corriente galvánica

Teóricamente, cuando se establece un proceso corrosivo en las barras, la corriente galvánica aumenta en el rango de valores positivos, debido a la variación del potencial del ánodo, que asume valores más negativos respecto a los obtenidos inicialmente, en su estado pasivo (Araújo et al., 2013; Lacerda y Muller, 2015). Un aumento de la corriente galvánica, acompañado de una disminución del potencial de circuito abierto, indica que se ha alcanzado un nivel crítico de iones cloruro (Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013).

En las Figuras 10 y 11 se puede observar que, durante el monitoreo la corriente galvánica ( $I_{gal}$ ) fue negativa durante siete de los ocho ciclos en los seis ánodos monitoreados (cuatro del sensor galvánico y las dos barras principales). Para el hormigón de 15 MPa (Figura 10), se observaron valores positivos de corriente galvánica en el ciclo 7, luego de 141 días de monitoreo. Sin embargo, vuelven a ser negativos en el ciclo 8. En el caso del hormigón de 30 MPa, en la Figura 11 se observa que la corriente galvánica fue positiva en los ciclos 7 y 8.

En principio, los valores de corriente positiva están de acuerdo con el potencial de circuito abierto más negativo que -350 mV (probabilidad de corrosión > 90%), y con el potencial de par mayor que 200 mV / min., observado en los ánodos instalados en una profundidad a 1,5 y 2,5 cm de profundidad.

En las barras principales instaladas con 6 cm de recubrimiento, el  $E_{par}$  indicó una reacción electrolítica durante el ensayo, lo que significa que las barras estaban en estado pasivo, en concordancia con el valor de potencial de circuito abierto medido. Por tanto, el registro de corriente galvánica positiva ( $I_{gal}$ ) no se corresponde con lo observado en las barras en las pruebas anteriores. Sin embargo, la corriente galvánica estuvo cerca de cero durante todo el experimento. Los valores de corriente galvánica cercanos a cero también son indicativos de la condición pasiva del acero (Park et al., 2005; Sousa, 2014). Siendo así, de manera similar a lo que sucedió en la primera etapa del programa experimental con los sensores inmersos en una solución acuosa (Calvo et al., 2017), la  $I_{gal}$  mostró mayor inercia para identificar la presencia de un agente agresivo. Además, según Ribeiro y Cunha (2014), la corriente galvánica ( $I_{gal}$ ) decae a lo largo de la medición, mostrando un comportamiento capacitivo y esto dificulta la monitorización.

Los resultados de corriente galvánica obtenidos en los seis ánodos (1,5, 2,5 y 6 cm) instalados en los cuerpos de prueba de 15 MPa, fueron estadísticamente equivalentes a los valores de corriente galvánica registrados en los ánodos instalados en los especímenes de 30 MPa.

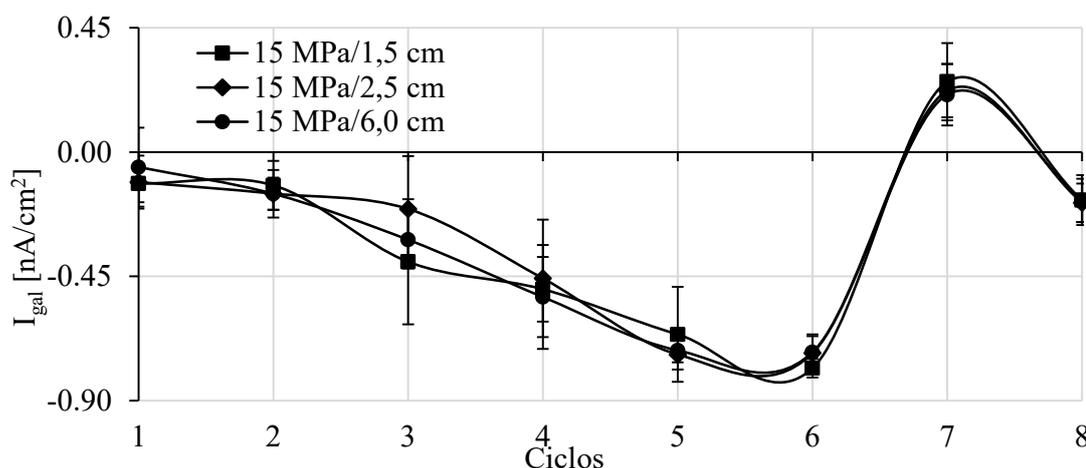


Figura 10. Corriente galvánica para el hormigón de 15 MPa. Fuente: Autor.

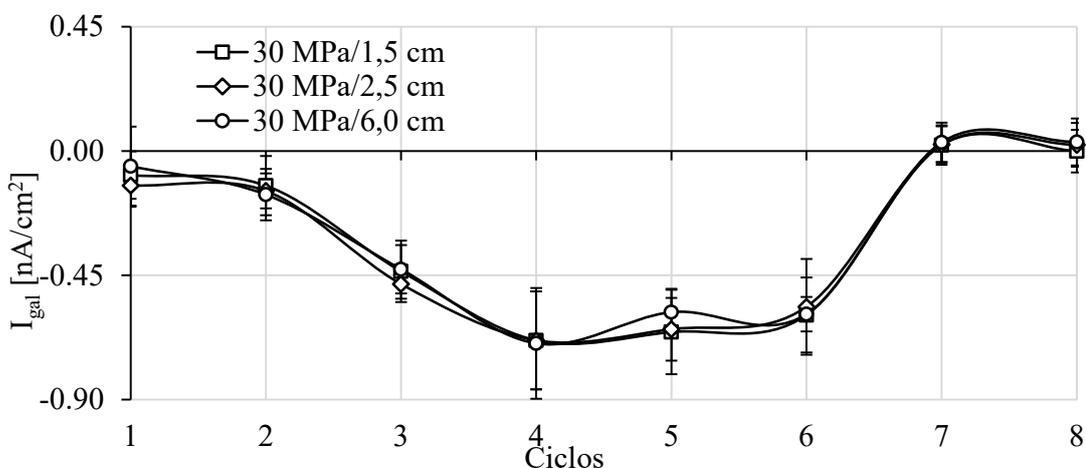


Figura 11. Corriente galvánica para el hormigón de 30 MPa. Fuente: Autor.

Finalmente, para el análisis de los datos se aplicó el modelo lineal, con determinación de  $R^2$  para inferir la correlación entre las técnicas electroquímicas consideradas en el trabajo. Ningún factor de correlación ( $R^2$ ) se acercó a 0,9, por lo que no se puede afirmar que exista una relación lineal positiva entre las técnicas electroquímicas. Es decir, las cantidades medidas difieren y no convergen. Por este motivo, este tipo de estudio es importante, ya que la elección de la técnica correcta, o conjunto de técnicas, es fundamental para que el seguimiento sea eficaz. Además, las sugerencias realizadas anteriormente para mejorar el funcionamiento del sensor son fundamentales para poder comprender y estimar el comportamiento de las magnitudes evaluadas en campo de forma correcta.

### 3.4 Penetración de cloruros a través del método colorimétrico

Al final del experimento, se realizaron pruebas colorimétricas con nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3/0.1 \text{ M}$ ) y fenoltaleína. En la Figura 12 se observa el aspecto de las mitades de los especímenes luego de rociar los indicadores. En ningún de los ocho cuerpos de prueba ensayados, se observó hormigón carbonatado como indica el color rosa en la mitad a la derecha. Esta evidencia de que no hubo carbonatación en el hormigón, es importante para tener la certeza de que la prueba colorimétrica con aspersión de la solución de nitrato de plata será efectiva, sin indicar el falso positivo alertado en el trabajo de Pontes et al. (2020).

En la mitad de la izquierda, se pueden ver dos regiones distintas en cuanto al color: una con un precipitado marrón correspondiente a la región sin cloruros libres, y otra sin color en la región afectada por cloruros libres, lo que indica hasta donde llegó el frente de penetración de cloruros. En la Figura 12, la región sin cloruros se delimitó con una línea discontinua.

Después de 150 días, al final del octavo ciclo, el frente de penetración de cloruro alcanzó una profundidad promedio de 7,6 cm en los cuerpos de prueba de 15 MPa, y de 7,2 cm en los especímenes de 30 MPa. Por lo tanto, en el hormigón alrededor de los ánodos del sensor, se alcanzó un nivel crítico de cloruros. Los resultados obtenidos en los ánodos del sensor durante el monitoreo de  $E_{\text{corr}}$  y  $E_{\text{par}}$ , indicaron una alta probabilidad de corrosión.

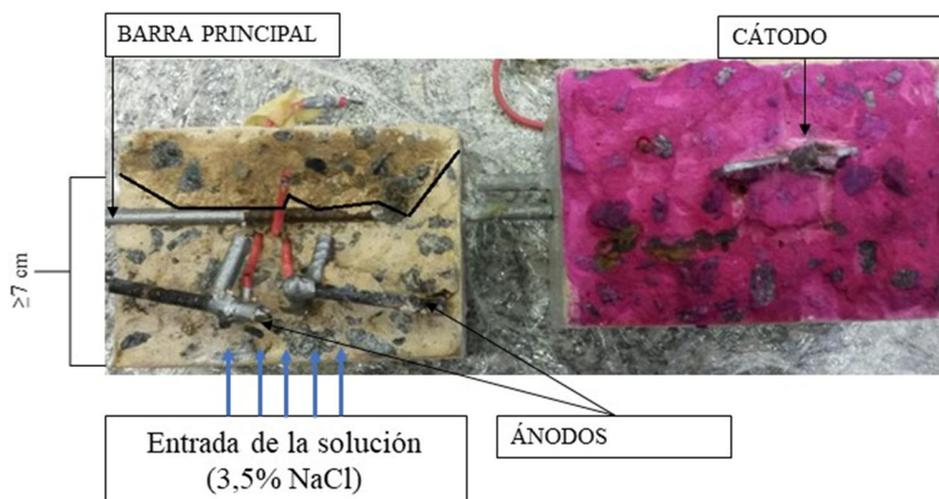


Figura 12. Ensayo colorimétrico (penetración de cloruros y carbonatación) en el cuerpo de prueba al final del monitoreo.

Se observa que la profundidad de penetración de los cloruros al final de los ciclos fue similar entre los hormigones de 15 MPa y 30 MPa. En este sentido, es necesario señalar que además de la porosidad, la fisuración también contribuye para que los agentes agresivos penetren en el hormigón e inicien su acción destructiva en la estructura. Después del endurecimiento de la masa, las grietas

son resultado, entre otros factores, de la contracción por secado, la corrosión del refuerzo y los ciclos alternos de humectación y secado (Brandão y Pinheiro, 1999). En este trabajo, los tres factores actuaron en combinación, proporcionando la aparición de microfisuras, como se muestra en la Figura 13.

La aparición de microfisuras puede haber intensificado la penetración capilar del agua con iones cloruro, provocando un comportamiento similar en los hormigones, diferente de lo observado en condiciones de exposición natural. Por tanto, el secado en estufa a 50 ° C no parece adecuado y debería reevaluarse en otros estudios similares. Además, estudios que evaluaron la penetración de cloruros en diferentes cementos brasileños observaron que los hormigones con CP-II-F tienen una alta capacidad de penetración de iones cloruro en comparación con otros tipos de cemento, reduciendo así la influencia de la relación  $a/c$  (Pereira, 2001; Crauss, 2010; Frota et al., 2018).



Figura 13. Microfisuras en los cuerpos de prueba.

Por otro lado, incluso el frente de penetración de cloruros habiendo alcanzado las barras principales (6 cm de recubrimiento), la concentración crítica de cloruros para dañar la película protectora de la armadura, no se alcanzó en el hormigón a esta profundidad. Ya que la probabilidad de corrosión se mantuvo inferior al 10%, o en la zona de incertidumbre. Mientras que el  $E_{par}$  indicó una reacción electrolytica, o como máximo estuvo en el rango de -5 a 20 mV / min.

En este sentido, es necesario señalar que la llegada de cloruros a la vecindad de la armadura, por sí sola, no representa el inicio del proceso de corrosión. El proceso solo comenzará cuando el contenido de iones de  $Cl^-$  alrededor de la barra de acero alcance la concentración crítica (Jin et al., 2017) para romper la película protectora del acero.

La mayoría de las normas establecen la concentración de iones  $Cl^-$  permitida con relación a la masa de cemento. Aunque es un punto muy controvertido, el valor de 0.4% con relación a la masa de cemento es un consenso en la mayoría de las normas (Casado, 1997). La norma NP EN 206, por ejemplo, adopta el valor de 0.4% (Silva, 2017) y la ABNT NBR 12655 (2006) establece 0.15% en las condiciones de servicio de la estructura.

Además, al romper los cuerpos de prueba, se pudo confirmar la presencia de producto de corrosión alrededor de las barras del sensor, pero no alrededor de la parte expuesta de las barras principales (6 cm de recubrimiento). Cabe señalar que los extremos de las barras principales se protegieron con cinta aislante gris, de manera que solo quedaron expuestos 60 mm de la barra, la misma longitud que los ánodos del sensor, como se muestra en la Figura 3 (a).

#### 4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de un sensor galvánico con múltiples electrodos en el seguimiento de la corrosión en prismas de hormigón armado, comparándolo con métodos electroquímicos convencionales, y con la profundidad de penetración de cloruros. Las principales conclusiones del estudio son:

- La relación a/c no influyó en los ensayos, siendo el recubrimiento el factor que ejerció mayor influencia.
- El potencial de circuito abierto y el potencial del par indicaron estado activo de corrosión en los ánodos de los sensores (1,5 y 2,5 cm) antes que en las barras principales (6 cm).
- Para efectos de este trabajo, 20 mV/min. es el valor de potencial del par ( $E_{par}$ ), que caracteriza el par galvánico de acero carbono-cobre evaluado. Mientras el valor de 200 mV/min. aparenta indicar el cambio para el estado activo.
- La corriente galvánica presentó poca variación a lo largo del tiempo, con comportamiento capacitivo durante los 150 días de monitoreo.
- La frente de penetración llegó a una profundidad mayor que 7 cm, alcanzando las barras principales (6 cm). Por este motivo, los ensayos indicaron una tendencia de la barra entrar en la zona de incertidumbre hasta que sean alcanzadas concentraciones suficientes de cloruros para dañar la película protectora de la armadura e iniciar la corrosión.
- El sensor desarrollado presentó sensibilidad para detectar la frente de cloruros y prever la posibilidad de corrosión de las armaduras. Siendo aún necesarios ajustes como acompañar el comportamiento del potencial del par ( $E_{par}$ ) y del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) en un medio libre de agentes agresivos hasta que el  $E_{par}$  estabilice. Se considera que los parámetros  $E_{corr}$ ,  $E_{par}$  e  $I_{gal}$  se comportan de formas distintas como parámetros de monitoreo de la corrosión.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad Federal de Paraná (LAME-DCC-UFPR), al Centro de Estudios en Ingeniería Civil (CESEC-UFPR), al Programa de Pós-graduação en Ingeniería Civil (PPGEC-UFPR), a la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES), a la Agencia Nacional de Aguas (ANA), y al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq).

#### 6. REFERENCIAS

- American concrete institute (ACI) (2014). ACI 318-14: *Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1980). NBR 6118: *Projeto e execução de obras de concreto armado*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2006). NBR 12655: *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2014). NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 248: *Agregados - Determinação da composição granulométrica*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009). NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 52: *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 53: *Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1992). NBR 7223: *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NBR 5738: *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018). NBR 5739: *Concreto — Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018). NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*.
- ASTM Internacional. (2015). ASTM C876 – 15 *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Edição atual aprovada em 1 de novembro de 2015. Publicado em abril de 2016. Originalmente aprovado em 1977. Última edição anterior aprovada em 2009 como C876-09. doi: <https://doi.org/10.1520/C0876-15>
- NT BUILD 492 (2000), *Non-Steady State Chloride Migration (Diffusion Coefficient)*.
- Araújo, A., Panossian, Z., Portella, P. D., Bäessler, R. (2013), Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor galvânico. *Revista Técnica*. Edição 194. Maio/2013. Link: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/194/artigo294083-1.aspx>
- Andrade, C., Figueiras, H., Félix, C., Coutinho, J. S. (2008), “Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão”, in: Anais do Encontro Nacional Betão Estruturas - BE2008. Guimarães. 5, 6, 7 de novembro de 2008.
- Angst, U., Buchler, M. (2015), On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. *Materials and Corrosion*. 66(10). doi: <https://doi.org/10.1002/maco.201407997>
- Akimov, G. V. (1957), “*Théorie et Méthodes d’Essais de la Corrosion des Métaux*”. Dunod. Paris. p 53.
- Baltazar, M., Almeraya, F., Nieves, D., Borunda, A., Maldonado, E., Ortiz, A. (2007). *Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos*. Scientia Et Technica, XIII (36),353-357. Acesso em: 17 de Julio de 2021. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903663>
- Brandão, A. M. S.; Pinheiro, L. M. (1999), *Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto*. Cadernos de Engenharia de Estruturas. n.8. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1999.
- BioLogic Science Instruments (2011), EC-LAB Software: Techniques and Applications. Version 10.1x. Fevereiro, Disponível em: <https://www.egr.msu.edu/~scb-group-web/blog/wp-content/uploads/2012/07/EC-Lab-software-Techniques-and-Applications-manual.pdf>
- Cheng, Y., Asad H., Chen, E., Ma, G., Li, Z. (2018), *Simulation of a novel capacitive sensor for rebar corrosion detection*. Construction and Building Materials. 174: 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.133>
- Chen, Y., Tang, F., Tang, Y., O’Keefe, M. J., Chena, G. (2017), *Mechanism and sensitivity of Fe-C coated long period fiber grating sensors for steel corrosion monitoring of RC structures*. Corrosion Science. 127: 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.08.021>
- Calvo Valdés, A., Farias Medeiros, M. H., de Jesus Roque, P. (2017). *Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado. Primeira etapa – Testes em solução aquosa*. Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada, 2(3). <https://doi.org/10.25286/rep.v2i3.689>
- Calvo Valdés, A. (2018), “*Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado*”. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação de Engenharia de Construção Civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba.

- Cascudo, O. (1997), “*O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas*”. Capítulo 2: Corrosão de armaduras em concreto. p 39-61. Capítulo 8: Potenciais de corrosão p 137-153. Primeira versão 1997.
- Capraro, A. P. B., Gervasio, S., Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Braganca, M., Oliveira, I. (2016), “*Avaliação dos mecanismos de corrosão de concretos contaminados com diferentes teores de pirita (FeS<sub>2</sub>)*”, in: Anais do 58o Congresso Brasileiro de Concreto (58o CBC 2016). Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Belo Horizonte/MG, 1–16.
- Capraro, A. P. B., Macioski, G., Medeiros, M. H. F. (2021), *Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete*. Engineering Failure Analysis. 120: 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105116>
- Crauss, C. (2010), “*Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria. 31 de agosto de 2010.
- De Lacerda, M. M., Müller, R. (2015), *Uso de sensor de taxa de corrosão instantânea como técnica de monitoramento da corrosão em estruturas de concreto*. Obra24horas. Acesso em: novembro / 2015. Disponível em: <https://www.obra24horas.com.br/artigos/concreto/uso-do-sensor-de-taxa-de-corrosao-instantanea-como-tecnica-de-monitoramento-da-corrosao-em-estruturas-de-concreto>
- De Lima, Ma. G., Morelli, F. (2004), “*Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP. p 1-20 2004. Disponível em: [https://semengo.furg.br/images/2004/07\\_2004.pdf](https://semengo.furg.br/images/2004/07_2004.pdf)
- Dotto, J. M. R (2006), “*Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana*”. Dissertação (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Dong, S.-G., Lin, C.-J., Hu, R.-G., Li, L.-Q., Du, R.-G. (2011), *Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor*. Electrochimica Acta. 56(4): 1881–1888. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.08.089>
- Freire, K. R. R (2005), “*Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2005.
- França, Clério Bezerra (2011), “*Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*”. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Católica de Pernambuco. Pró -Reitoria Acadêmica- PRAC.
- Fernandes, K. V., Martenda, P. C. (2015), *Por que os metais sofrem corrosão?* Engenheiro de Materiais. Acesso em: novembro 2015. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/tag/pilha-galvanica/>
- Figueiredo, E. J P., Meira, G. R. (2013), *Boletim Técnico: Corrosão das armaduras de concreto*. Boletín No. 6, Associação Latinoamericana de Controle da qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. ALCONPAT Internacional.
- Federal Highway Administration (FHA) (2011). *U.S. Government of Transportation. Bridge preservation guide*. August 2011.
- Feliú, S., González, J. A., Feliú Jr., S., Andrade, M. C. (1990), *Confinement of the electrical signal or in-situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete*. ACI Materials Journal. 87 (5):457.

- Frota, W.D.S.; Martins, E. R.; Valerio, P. P. (2018), *Avaliação da difusão de íons cloreto considerando concreto simples constituído por três principais classes de cimento portland convencional*. Sodebras Journal. 13(151): 99-113. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12429.64486>
- Godinho, J. P., Oliveira, R. L. N., Capraro, A. P. B., Réus, G. C., Medeiros, M. H. F. (2018), “*Influência das condições de limpeza de barras de aço carbono do concreto armado nas leituras eletroquímicas de densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão*”, in: Anais do 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto (3º DEGRADA), São Carlos/SP, 77–92.
- Godinho, J. P., Zermiani, B. N., Oliveira, R. L. N., Medeiros, M. H. F. (2019), *Comportamento eletroquímico do aço carbono inserido no concreto durante a passivação*. Revista Técnico-Científica do CREA-PR. ISSN 2358-5420 –Edição Especial – Setembro de 2019, 1 - 16.
- Gurdián, H.; García-Alcoel, E.; Baeza-Brotons, F.; Garcés, P.; Zornoza, E. (2014), *Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete with recycled aggregates, fly ash and spent cracking catalyst*. Materials (Basel). 7(4), 3176-3197. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7043176>
- Gentil, V. (1996), “*Corrosão*”. 3a Edição. Rio de Janeiro. Editora LTC. Capítulo 3: “Potencial de eletrodo”. p 14 – 28.
- Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G. A., Gub, G. P. (2010), *Electrochemical investigation of chloride-induced depassivation of black Steel rebar under simulated service conditions*. Corrosion Science. 52(5): 1649–1659. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.016>
- Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G., Miller, T. (2009), *The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement*. Cement and Concrete Composites. 31(1): 2–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.003>
- Hays, G. F. (2020), *Now is the Time*. Director General da World Corrosion Organization. Acesso em: dezembro de 2020. Disponível em: <http://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications/ /nowisthetime.pdf>
- Pei, H., Li, Z., Zhang, J., Wang, Q. (2015), *Performance investigations of reinforced magnesium phosphate concrete beams under accelerated corrosion conditions by multi techniques*. Construction Building Materials. 93: 982-994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.057>
- Hernández, Y., Troconis de Rincón, O., Torres, A., Delgado, S., Rodríguez, J., Morón, O. (2016). *Relación entre la velocidad de corrosión de la armadura y el ancho de fisuras en vigas de concreto armado expuestas a ambientes que simulan el medio marino*. Revista ALCONPAT, 6(3), 272 - 283. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.152>
- Institut Für Seltene Erden und Strategische Metalle (ISE) (2020), *Preços, ocorrência, extração e uso do Titan*. Acesso em: dezembro de 2020. Disponível em: <https://pt.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/titan/>
- Inaudi, D. (2009), “*Integrated Structural Health Monitoring Systems for Bridges*”. in: Anais do 1o Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP'09. Lisboa. 2009.
- Jucá, T. R. P. (2002), “*Avaliação de Cloretos Livres em Concretos e Argamassas de Cimento Portland pelo Método de Aspersão de Nitrato de Prata*”. Universidade Federal de Goiás. Escola Engenharia Civil II.
- Jin, M., Jiang, L., Zhu, Q. (2017), *Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes*. Construction Building Materials. 143: 1-5. 15 julho, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.131>
- Jiang, J. -Y., Wang, D., Chu, H. -Y., Ma, H., Liu, Y., Gao, Y., Shi, J., Sun, W. (2017), *The passive film growth mechanism of new corrosion-resistant steel rebar in simulated concrete pore solution: Nanometer structure and electrochemical study*. Materials (Basel). 10(4): 412. doi: <https://doi.org/10.3390/ma10040412>

- Klassen, R. D., Roberge, P. R. (2008), “*Technique for corrosion monitoring*”. Capítulo 5: Zero resistance ammetry and galvanic sensor. p 111-124.
- Leek, D. S. (1991), *The Passivity of Steel in Concrete*. Quarterly Journal of Engineering Geology. 24:55–66. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1991.024.01.05>
- Lv, H., Zhao, X., Zhan, Y., Gong, P. (2017), *Damage evaluation of concrete based on Brillouin corrosion expansion sensor*, Construction and Building Materials, 143: 387-394, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.122>
- Mccarter, W. J., Vennesland, Ø. (2004), *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials. 18(6): 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.008>
- Medeiros, M. H. F. (2008), “*Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente a ação de íons cloretos*”. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008.
- Medeiros, M. H. F., de Oliveira Andrade, J. J., Helene, P. (2011), “*Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto*”. Capítulo 22, Concreto: Ciência e Tecnologia, Geraldo Cechella Isaia (Editor), © 2011 IBRACON. URL: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>
- Medeiros, M. H. F., Rocha, F. C., Medeiros-Junior, R. A., Helene, P. (2017), *Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover*, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (RIEM). 10 (4):864–885. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>
- Torres-Luque, M., Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Sánchez Silva, M., Osma, J. F. (2014), *Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges*. Construction and Building Materials. 68:68-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.009>
- Marcondes, C. G. N. (2012), “*Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas*”. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGCEC. 2012.
- Meira, G. R. (2017), “*Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto - fundamentos, diagnóstico e prevenção*”. 1ª edição, editora do IFPB, João Pessoa-PB, 2017.
- Macioski, G., de Souza, D. J., Capraro Brandão, A. P., de Medeiros, M. H. F. (2016). *Análisis de la corrosión de barras de acero en función de la variación del pH del medio*. Revista ALCONPAT, 6(3), 223 - 234. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.153>
- Mota, A. C. M. (2011), “*Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*”. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Martínez, I., Andrade, C. (2009), *Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures*. Cement and Concrete Composites, 31(8): 545–554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.007>
- Nahali, H., Dhouibi, L., Idrissi, H. (2014), *Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution*. Construction and Building Materials. 50: 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.054>
- Pérez López, T., Sosa, M. R., Moo-Yam, V. M. J., Chávez, E., Pérez-Quiroz, J. T. (2018). *Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural*. Revista ALCONPAT, 8(1), 16 - 29. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>
- Pereira, E. V., Salta, M. M. (2012), “*Monitorização permanente da corrosão em estruturas de betão armado*”. Resultados a longo prazo”, in: Anais do Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012. FEUP, 24-26 de outubro de 2012.

- Pereira, E. V., Figueira, R. B., Salta, M. M. L., Da Fonseca, I. T. E. (2009), *A Galvanic Sensor for Monitoring the Corrosion Condition of the Concrete Reinforcing Steel: Relationship Between the Galvanic and the Corrosion Currents*. Journal of Sensor. 9(11): 8391-8398. doi: <https://doi.org/10.3390/s91108391>; ISSN 1424-8220. 2009.
- Pawlick, L. A., Stoner, G. E., Clemenña, G. G. (1998), *Development of an embeddable reference electrode for reinforced concrete structures*. Contract Research Sponsored by Virginia Transportation Research Council. URL: [https://www.virginiadot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/99-cr1.pdf](https://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/99-cr1.pdf)
- Park, Z.-T., Choi, Y.-S., Kim, J.-G., Chung, L. (2005), *Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 2. Laboratory electrochemical testing of sensors in concrete*. Cement and Concrete Research. 35(9): 1814–1819. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.027>
- Pontes, C. V., Réus, G. C., Araújo, E.C., Medeiros, M. H. F. (2020), *Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives*. Journal of Building Engineering. (34): 101860. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101860>
- Poursae, A. (2016), *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Elsevier, 1st Edition. Amsterdã, Holanda, 2016.
- Pereira, V. G. A. (2001), “*Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura*”. Dissertação de mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015). *Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte*. Revista ALCONPAT, 5(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Romano, P., Brito, P. S. D., Rodrigues, L. (2013), *Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions*. Construction and Building Materials. 47: 827–832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042>
- Ribeiro, V. D., Cunha, T. M. P. (2014), “*Corrosão em Estruturas de Concreto Armado*”. Capítulo 8: Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado, p 215.
- Ribeiro, D. V., Helene, P., Cascudo, O., Tutikian, B. F., Sales, A., Souza, C. A. C., Cunha, M. P. T., Lourenco, M. Z., Almeida, F. C. R. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. 2a, Elsevier Brasil, Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- Rocha, F. C. (2012), “*Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água / cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobertura e do teor de umidade do concreto*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2012.
- Rocha, F., Campos, H., de Andrade, T. S., Roquitski, A., Medeiros, M. H. (2014). *Influência da espessura de cobertura e da contaminação por cloretos nas leituras de potencial de corrosão de armaduras*. REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 8(2). <https://doi.org/10.5216/reec.v8i2.26968>
- Raupach M., Schiebl, P. (2001), *Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures*. NDT & E International. 34(6): 435-442. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00011-1)
- Ribeiro, D. V., Souza, C. A. C., Abrantes, J. C. C. (2015), *Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 8 (4): 529-546. Agosto 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000400007>

- Sousa, C. D. C. A. (2014), “*Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*”. Capítulo 2: Princípios da corrosão eletroquímica., p 13-34.
- Silva, P. N. R. (2017), *Ataque em estruturas de concreto por ação de cloretos*. Acesso em: dezembro 2017. Disponível em: <https://www.axfiber.com.br/single-post/2017/01/12/ataque-em-estruturas-de-concreto-por-a%C3%A7%C3%A3o-de-cloretos>
- Silva, E. P. (2010), “*Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado*”. Dissertação (Graduação) -Curso de Engenharia Estrutural e Construção Civil de Fortaleza. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2010.
- Santos, L. O. (2014), “*Monitoramento e ensaio de Pontes*”. in: Anais do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. p 1-14. 21-23 de Maio del 2014.
- Wu, L., Li, W., Yu, X. (2017), *Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments*. Construction and Building Materials. 152: 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.016>
- Williamson, J., Isgor, O. B. (2016), *The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar*. Corrosion Science. 106: 82–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.027>
- Zhang, J., Lui, C., Sun, M., Li, Z. (2017). *An innovative corrosion evaluation technique for reinforced concrete structures using magnetic sensors*. Construction and Building Materials. 135: 68-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.157>
- Zoghi, M. (2013), “*The International Handbook of FRP composites in civil engineering*”. 1st Edition. CRC Press. ISBN 9780849320132. September 26, 2013. Acesso: Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.crcpress.com/TheInternational-Handbook-of-FRP-CompositesinCivilEngineering/Zoghi/p/book/9780849320132>