

LA ELECTROQUIMICA EN LA EVALUACION DE LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

ELECTROCHEMISTRY IN THE ASSESSMENT OF CORROSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Valentina Millano, Miguel Sánchez, Oladis Troconis

Universidad del Zulia, Universidad del Zulia, Zulia-Venezuela

Email: millanov@gmail.com +58 414 6694686

Recibido: 11-01-2022

Aceptado: 15-02-2022

RESUMEN

Las armaduras originalmente se encuentran pasivadas dentro del concreto hasta que se inicia el proceso de corrosión. La acción degradante de los agentes agresivos comienza en la superficie del concreto penetrando progresivamente hacia el interior a medida que incrementa la porosidad, permeabilidad y tensiones internas. A medida que avanza el grado de deterioro produce pérdida de masa y capacidad resistente. Durante el proceso de corrosión en estructuras de concreto reforzado, la zona anódica y la catódica están localizadas en la superficie del acero de refuerzo, mientras que el concreto actúa de electrolito, estableciendo una celda electroquímica. En la evaluación de la velocidad de corrosión se utilizan ensayos naturales, simulados y acelerados. Sin embargo, se prefiere utilizar técnicas electroquímicas de ensayos de corrosión acelerada que permite simular una velocidad de corrosión en breves periodos de tiempo. La medida del potencial eléctrico, ruido electroquímico y tomografía electroquímica se pueden medir espontáneamente. Mientras que resistencia a la polarización lineal, polarización cíclica, voltametría cíclica, Impedancia electroquímica, pulso galvanostático, y otras, requieren aplicar una perturbación eléctrica para conseguir una cantidad de corrosión significativa mediante la formación de iones Fe^{++} , en un tiempo relativamente corto, y así determinar la consecuencia de la corrosión en la armadura.

Palabras Claves: Técnicas electroquímicas, corrosión, concreto reforzado

Valentina Milano: Profesora Titular de la Universidad del Zulia, en cátedras como Ciencia de los Materiales, Corrosión y Físico-Química en la Licenciatura de Ingeniería Química, y en la Maestría de Corrosión de la División de Graduados de la Facultad de Ingeniería de LUZ. Sus áreas de especialidad abarcan la electroquímica fundamental y aplicada, Materiales y corrosión en estructuras de concreto armado. Se ha desempeñado en cargos como Jefe de los Laboratorios de Materiales y Microscopía Electrónica de Barrido del Centro de Estudios de Corrosión-LUZ. **Oladis Troconis:** Es Ingeniera Química de la Universidad del Zulia (LUZ), tiene una Maestría en Ingeniería Química por la Universidad de Oklahoma en USA. Es Doctora en Electroquímica Fundamental y Aplicada por la Universidad de los Andes en Venezuela y recibió el Doctor Honoris Causa por la Universidad del Zulia. Trabaja en la Facultad de Ingeniería de LUZ, donde fue Fundadora y primera Directora del Centro de Estudios de Corrosión; allí continúa como Asesora del mismo. Actualmente, se encuentra como Científico Visitante en la Universidad de Texas en San Antonio, USA Su interés en investigación se ha centrado en la corrosión y su control, así como la prevención de problemas patológicos en estructuras de concreto armado y metálicas, Corrosión Atmosférica y Protección Catódica. **Miguel Sánchez:** Ingeniero Químico de la Universidad del Zulia (LUZ). Maestría en Gas (LUZ), Dr. En Electroquímica de la Universidad de Los Andes, Venezuela (ULA). Profesor titular de LUZ. Especialista en corrosión de la industria petrolera. Experticia en: concreto reforzado, inhibidores de corrosión, técnicas electroquímicas. Editor de la revista Ingeniería LUZ. Profesor invitado en: INIFTA (Argentina), INTEVEP (Venezuela). Universidad de Florida (UA).

ABSTRACT

The reinforcements are originally passivated within the concrete until the corrosion process begins. The degrading action of aggressive agents begins at the surface of the concrete, progressively penetrating inwards as porosity, permeability and internal stresses increase. As the degree of deterioration progresses, it produces loss of mass and resistant capacity. During the corrosion process in reinforced concrete structures, the anodic and cathodic zones are located on the surface of the reinforcing steel, while the concrete acts as an electrolyte, establishing an electrochemical cell. In the evaluation of the corrosion rate, natural, simulated and accelerated tests are used. However, it is preferred to use electrochemical accelerated corrosion test techniques that allow a corrosion rate to be simulated in short periods of time. Measurement of electrical potential, electrochemical noise and electrochemical tomography can be measured spontaneously. While resistance to linear polarization, cyclic polarization, cyclic voltammetry, electrochemical impedance, galvanostatic pulse, and others, require applying an electrical disturbance to achieve a significant amount of corrosion through the formation of Fe^{++} ions, in a relatively short time, and so on. determine the consequence of corrosion in the reinforcement.

Keywords: Electrochemical techniques, corrosion, reinforced concrete.

Introducción

El concreto armado es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, debido a su alta resistencia mecánica y baja porosidad. El refuerzo con barras de acero ha mejorado el comportamiento de los elementos estructurales sin modificar las propiedades macroscópicas de la matriz cementosa.¹ Con un adecuado diseño y adaptado a su entorno, el concreto reforzado es un material extremadamente duradero ya que el concreto es una barrera protectora para las barras de refuerzo. El concreto no fisurado le proporciona una alta protección al refuerzo de acero debido a su alta alcalinidad de la solución de poros ($\text{pH} = 12,5 - 13,5$)^{2,3,4} permitiéndole la formación de una fina capa superficial de óxido de hierro hidratado, que lo protege de la corrosión.

En la vida útil de la estructura del concreto armado, las barras de acero embebidas en el concreto sufren problemas de corrosión. La condición de la superficie del acero y la falta de homogeneidad local en la interface acero-hormigón parecen tener un efecto importante en el inicio de la corrosión. Los productos de corrosión ocupan un volumen mayor que el refuerzo de acero original que induce presión interna alrededor de la barra de refuerzo y tensiones de tracción desarrollarse en el concreto lo que afecta el desempeño de la estructura.⁵ Los daños de la corrosión inducida está vinculada con la formación y acumulación de productos de corrosión, que están estrechamente relacionado con el agrietamiento por expansión de la capa del concreto, que incluyen desconchado, deslaminación del concreto y reducción de la sección transversal del acero de refuerzo.^{1,6}

Por lo tanto, la corrosión de las barras de acero tiene una influencia significativa en la durabilidad de las estructuras del concreto armado. Esta corrosión puede provocar daños estéticos, reducción de la capacidad portante de la estructura, e incluso puede conducir a consecuencias fatales, como la falla estructural.^{1,2,6,7} Junto con los impactos estructurales, la corrosión también puede afectar la economía del país. La corrosión del acero en las estructuras provoca

pérdidas considerables a la sociedad debido a las necesidades de mantenimiento y reparación.⁸

Un significativo porcentaje de las estructuras de concreto son estructuralmente deficientes debido a la corrosión y deben ser sometidas a reparación y rehabilitación para recuperar el desempeño funcional y estructural.⁹ Este costo de reparación y rehabilitación contribuye directamente al costo de la corrosión. Además, el costo indirecto causa pérdida de productividad, retrasos en el tráfico, etc., incidiendo aproximadamente en un valor 10 veces mayor que la de costo de la corrosión. El costo directo e indirecto de la corrosión es más de tres veces el PIB mundial.¹⁰ Por lo tanto, los impactos de la corrosión se pueden definir tanto en términos estructurales como económicos.

Los fenómenos más perjudiciales a los cuales se encuentra sometido el concreto reforzado son la carbonatación y la entrada de iones de cloruro en el concreto, que provocan el agrietamiento/desprendimiento de la capa de concreto y degradación de la barra de acero.^{11,12,13,14}

Por lo tanto, la corrosión de las barras de acero es uno de los principales mecanismos de deterioro que amenaza la durabilidad del hormigón armado en las estructuras. El ataque de cloruro es uno de los agentes químicos más peligrosos que afectan las estructuras de concreto, al acumularse en alto contenido, particularmente cuando las estructuras se encuentran expuestas en medio marino, donde los iones de cloruro atraviesan la capa del concreto y pueden llegar a la superficie del acero.¹⁵

Este mecanismo no se entiende completamente ya que el evento ocurre dentro del concreto y la película es demasiado delgada para ser examinada. Un aspecto resaltante es que la intrusión de iones de cloruro depende fundamentalmente de la porosidad y permeabilidad del hormigón.

El proceso de corrosión de la barra de acero en el concreto se puede dividir en dos etapas: 1. etapa de iniciación, y 2. etapa de propagación de la corrosión, donde ocurre

la velocidad de la reacción de corrosión. La velocidad de corrosión está relacionada con la reducción efectiva de la sección transversal de la barra de acero, que influye significativamente en la capacidad de carga de la estructura. Generalmente, la corrosión del acero se considera en estado pasivo si la densidad de corriente es inferior a $0,1 \mu\text{Acm}^{-2}$, y en estado activo para valores superiores a $1 \mu\text{Acm}^{-2}$.¹⁶

Con base en el modelo de Tuutii,¹⁷ otros modelos consideraron el cambio en la tasa de corrosión durante la vida útil del concreto reforzado,¹⁸⁻²⁰ o incluyeron etapas adicionales para diferenciar la expansión del óxido, el agrietamiento de la cubierta y el desprendimiento/delaminación en la definición de la vida útil.²¹⁻²³ Sin embargo, el nivel de deterioro no es lineal ya que el agrietamiento y el desprendimiento del concreto pueden acelerar la velocidad de corrosión, mientras que la producción de productos de corrosión en el concreto agrietado puede llenar los poros, disminuyendo así la velocidad de corrosión.

En los últimos años, la velocidad de corrosión de las barras de acero en el concreto ha sido ampliamente estudiada y se han propuesto varios modelos de predicción basados en el principio electroquímico,²⁴ en el que, la velocidad de corrosión a menudo se representa por la densidad de corriente de corrosión.²⁵ Se han desarrollado modelos numéricos para describir el proceso de corrosión electroquímica, en el que la distribución del potencial de corrosión dentro de la cubierta de hormigón se calcula mediante una ecuación diferencial parcial de segundo orden,²⁶ quienes propusieron un modelo numérico con condiciones de contorno no lineales determinadas por el proceso de polarización electroquímica y transporte de masa proceso. Kim y Kim²⁷ propusieron un modelo numérico para velocidad de corrosión localizada en el hormigón, considerando la influencia de iones de cloruro alrededor de las barras de acero.

Bo et al.²⁸ propusieron un modelo numérico mejorado, considerando las influencias de temperatura y humedad relativa en proceso

de control de la reacción de corrosión. Arpit et al.²⁹ expuso un modelo para barras de acero usando la ecuación de Butler Volmer, basándose en la cinética de la reacción electroquímica.

Sin embargo, para los modelos simplificados, así como el modelo numérico, los parámetros de corrosión electroquímica son difíciles de determinarse, y por lo general se adoptan valores empíricos para la predicción de la velocidad de corrosión, que afecta la precisión y predicción de resultados. Los parámetros de corrosión electroquímica son la clave para predecir la velocidad de corrosión de las barras de acero. La relación ánodo/cátodo (A/C) es también un parámetro esencial en el proceso electroquímico. Cuando A/C es 0,2 la velocidad de corrosión del acero puede ser unas 100 veces mayor que la de A/C.³⁰ Sin embargo, la relación A/C es difícil de determinar, debido a la incertidumbre del área del cátodo y del ánodo en la barra de acero.

Angst et al.³¹ muestra que la corrosión de las barras de acero se produce en la superficie en contacto con los poros del concreto. Esta región de poros es vital, ya que estos poros en la zona interfacial proporcionan el acceso primordial para el ingreso de cloruro, y por tanto puede inducir la corrosión de las barras de acero. Además, el coeficiente de difusión de cloruro en la zona de interfase es 6-12 veces mayor que en el resto la de la pasta^{32,33} disminuyendo la resistividad del hormigón y acelerando el proceso de corrosión debido a la alta porosidad.³⁴

Así, se puede resumir que la corrosión de las barras de acero en el concreto está estrechamente relacionada con los poros en la zona de interacción interfacial acero/concreto. Por lo tanto, para poder determinar con precisión los parámetros electroquímicos, es necesario considerar el efecto de la porosidad en la zona de interacción interfacial del acero-hormigón. Teniendo en cuenta la corrosión uniforme en el concreto reforzado expuesto a la atmósfera, los dos principales factores que influyen en el proceso de corrosión son el contenido de agua y la estructura de poros

en la interfase acero-hormigón. Sin embargo, independientemente del mecanismo de despasivación, es decir, carbonatación o corrosión inducida por cloruro, se espera que la corrosión no uniforme sea el proceso principal para las estructuras de concreto reforzado debido a las variaciones locales en la exposición ambiental o la presencia de barras de refuerzo interconectadas con diferentes propiedades.

Luego, los estudios futuros pueden centrarse en su efecto sobre la corrosión de macroceldas para obtener más información sobre los mecanismos de corrosión de las estructuras de concreto reforzado. Con respecto al monitoreo de la corrosión usando métodos eléctricos, la técnica de potencial de media celda con mapeo de potencial es precisa para ubicar áreas con un alto riesgo de corrosión.³⁵

Los desarrollos recientes en la medición de la resistividad del hormigón han demostrado que el uso de la tomografía de resistividad eléctrica³⁶⁻⁴² permite considerar adecuadamente la heterogeneidad inherente del hormigón y proporciona más información sobre los fenómenos de transporte en el material. Sin embargo, durante la etapa de propagación de la corrosión, la resistencia a la polarización sigue siendo el parámetro más importante a determinar ya que proporciona información cuantitativa de la velocidad de corrosión.⁴³⁻⁴⁶

Si los métodos convencionales de configuración de tres electrodos pueden proporcionar una determinación precisa en el caso de una corrosión uniforme, a menudo fallan en el caso de la macrocelda de corrosión en los experimentos de campo.

Avances recientes han demostrado que una configuración de cuatro electrodos sin ninguna conexión a la barra de refuerzo puede usarse para la evaluación y prueba no destructiva de corrosión. Aún se requieren estudios para cuantificar la velocidad de corrosión, este método parece ser sensible a la corrosión localizada y, por lo tanto, más adecuado para las investigaciones de campo. Finalmente, el acoplamiento de simulaciones numéricas con métodos

complementarios de ensayos eléctricos y otros no destructivos es esencial para consolidar los resultados y proporcionar un mejor diagnóstico de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.⁴⁷

Dado que la corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales fenómenos de deterioro que afectan la durabilidad de las estructuras de concreto armado. En caso que se promuevan daños estructurales, la corrosión también aumentará el costo asociado con ella. Por lo tanto, la protección del refuerzo acero en estructuras de concreto de la corrosión es una necesidad inevitable. Diversas técnicas de protección en la práctica para mitigar la corrosión del acero de refuerzo en la estructura de concreto, como el uso de reparación con parches, recubrimientos protectores, método de corriente impresa y ánodos de sacrificio.⁴⁸

Entre estos, la técnica de protección electroquímica que utiliza ánodos de sacrificio se puede sugerir como una herramienta muy eficaz para la mitigación de la corrosión. El sistema de protección catódica con ánodo de sacrificio es menos popular técnica de control de la corrosión debido a la falta de conocimiento sobre los beneficios de esta y el amplio uso de otras prácticas de control de la corrosión. En consecuencia, el estudio de la corrosión, su mitigación y el seguimiento son importantes para estructuras de concreto armado.

La corrosión localizada es un fenómeno común en una amplia gama de materiales y ambientes, incluida la corrosión del acero reforzado y pretensado en concreto,⁴⁹⁻⁵³ por lo tanto existe la necesidad de métodos que cuantificar in situ la tasa de corrosión local. Para la medición no destructiva de velocidad de corrosión instantánea, generalmente, solo se emplean técnicas electroquímicas.⁵⁴⁻⁵⁹

Por ser el concreto un medio poroso, sólido y opaco complica la medición no invasiva de la velocidad de corrosión por varias razones. Primero, cualquier sensor de medición en las técnicas electroquímicas, deben colocarse a una mínima distancia del acero, para evitar la dilución de las señales adquiridas, y por lo

tanto la limitación de la precisión y fiabilidad de la medida. En segundo lugar, dado que el acero se corroe y no poder ser inspeccionado visualmente, el área de comportamiento anódico de la galvánica celda de corrosión permanece desconocida.

Por lo tanto, es difícil relacionar la corriente de corrosión medida a un área, y posteriormente convertirlo a una densidad de corriente de corrosión, o tasa de corrosión en términos del espesor o pérdida de masa por unidad de tiempo. Estos aspectos han recibido una atención considerable en el campo de la inducción de cloruro corrosión del acero en el hormigón desde la década de 1980.^{56,60-64}

Numerosos investigadores se han enfocado en superar el problema de la superficie anódica desconocida, que potencialmente induce errores en la obtención de la velocidad de corrosión hasta en varios órdenes de magnitud. En estas búsquedas se incluyen intentos de confinar la corriente de polarización aplicada durante las mediciones electroquímicas para obtener la velocidad de corrosión.^{59,60,65,66}

Sin embargo, la factibilidad y el éxito de estos enfoques ha sido cuestionado repetidamente, tanto en la validación experimental⁵⁹⁻⁶⁵ y en el razonamiento teórico.⁶⁷⁻⁷⁰ El área superficial anódica desconocida en la corrosión localizada de metales incrustados en medios porosos sigue siendo la principal limitación para la cuantificación no destructiva en la determinación de la velocidad de corrosión localizada.

Este problema fundamental es relevante en las diferentes técnicas electroquímicas, que se limita en general a la interpretación de resultados obtenidos en las mediciones mediante las técnicas resistencia de polarización lineal, mediciones de pulso galvanostático, impedancia de espectroscopia electroquímica, etc.

Actualmente se ha venido desarrollando la tomografía electroquímica, que supera estas limitaciones al combinar un modelo numérico directo, que describe el campo de

potencial eléctrico en el medio poroso, con mediciones electroquímicas tomadas en la superficie utilizando un método inverso estocástico para determinar la velocidad de corrosión, y la ubicación y el tamaño del sitio anódico.⁷¹

Además, esta técnica ofrece información sobre parámetros como las densidades de corriente de intercambio y permite la cuantificación de la incertidumbre de la solución obtenida.

PARTE EXPERIMENTAL

En Laboratorio:

Las técnicas de recolección de datos empleadas fueron, técnicas electroquímicas de Medición del Potencial de Corrosión (E^{cor}), Polarización Lineal (R_p), Polarización Cíclica (PC), Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)^{71,72}; y como técnicas no electroquímica, se realizó la Inspección visual de los aceros expuestos a solución de agua de poro; Perfil de cloruros en las probetas de concreto armado expuestas a medios con iones cloruros, y el avance de la carbonatación en las probetas expuestas a dióxido de carbono.

Los parámetros experimentales característicos, para la aplicación de las técnicas electroquímicas de medición de velocidad de corrosión, son los siguientes: Espectroscopia de Impedancia electroquímica Potenciostática (EIE): se aplicó una perturbación sinusoidal en el orden de 105 Hz hasta 10-2 Hz con 10 mV rms.

Polarización Lineal: esta técnica fue aplicada luego de la técnica de EIE, con un rango de potencial de perturbación de ± 10 mV vs potencial de corrosión, a una velocidad de barrido de 0,28 mV/s.

En campo:

Para la evaluación de la actividad electroquímica de la armadura se utilizará un corrosímetro portátil, denominado por su fabricante como GECOR10. Este está conformado por 3 componentes de vital importancia: la unidad de medida y dos

sensores diferenciados. La unidad de medida LG-ECM-06 controla el sistema, realización de las medidas y procesamiento de los datos. Esta unidad, conectada al sensor ECM-10A mide la intensidad de corrosión, i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) sobre un área definida de la armadura, así como el potencial de corrosión, E_{corr} (mV) con respecto a un electrodo de cobre-sulfato de cobre (CSE). Con el sensor LG-ECS-10B se registra la resistividad del concreto (kohm.cm), la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa (% H.R).

Como primer paso para realizar esta medición se debe confirmar la conductividad eléctrica de las barras con sus respectivos cables, para garantizar la veracidad de la data recolectada. La medición de los potenciales de corrosión (E_{corr}), se realizarán periódicamente utilizando un electrodo de Cu/CuSO_4 . Para evaluar el comportamiento de las barras según las medidas electroquímicas, se utilizarán los criterios descritos en Durar.⁷³

Soluciones y celdas

Los electrodos a utilizar en los ensayos en agua de poro, fueron elaborados al igual que para las probetas de concreto, con barras corrugadas de acero al carbono, con la misma composición que las barras utilizadas en las probetas de concreto armado. Se empleó Teflón (PTFE) de alta densidad específica como material soporte para la construcción del cuerpo y sus componentes.

La solución de agua de poro KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH ,^{74,75} utilizada en los experimentos, fue preparada con diferentes concentraciones de iones cloruro. Para cada experimento se utilizó un volumen de 150 mL de la solución fresca, suficiente para cubrir más de la mitad del cuerpo del electrodo de trabajo. Es importante resaltar que para cada ensayo se midió el pH de la solución, encontrando promedios de 12,8 de pH. Las concentraciones de iones cloruro usadas para la solución de agua de poro fueron de 0,5 M.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicaciones y casos en campo:

En las aplicaciones en campo, las técnicas electroquímicas más utilizadas son la polarización línea para determinar o cuantificar la velocidad de reacción, es decir, de la corrosión, en los casos en particular, de la corrosión del acero embebido en concreto; de la mano de la técnica de potencial de actividad electroquímica que permite conocer la probabilidad de riesgo para la ocurrencia de la reacción en estudio.⁷³

En un caso de corrosión en sótanos, Figura 1, los problemas por corrosión se debieron a elevadas concentraciones de cloruros, que alcanzaron la armadura desde el subsuelo debido a altas corrientes freáticas y salobres.

En la Figura 2, se observan que los daños por corrosión (a) manchas, (b) acero expuesto y



(a)



(b)

Figura. 1. (a) Vista panorámica de las Residencias Mata de Coco. (b) Vista de la Columna M-22, cara Sur y Este, evidenciando delaminación del concreto con corrosión severa del refuerzo

(c) grietas, se presentan preferencialmente desde la parte inferior hacia la superior. El nivel de riesgo encontrado en las 236 columnas evaluadas, de un total de 299, fue de 57 columnas (24%) con daños severos, 83 columnas (41%) con daños moderados y el resto de las columnas en buen estado aparente (35%).

La concentración de cloruros encontradas en muestras de aguas estancadas en el sótano de la residencia, estuvo comprendida en un intervalo entre 1179 – 1371 mg Cl⁻/l, mientras que los cloruros en el concreto sobrepasaron los 4000 mg Cl⁻/Kg cemento⁷³ (Figura 3), que inician y mantiene un proceso activo por corrosión del acero.

En la Figura 3, se aprecia como los núcleos extraídos a bajas alturas en las columnas

(Figura 3 a) de 30 a 97 cm, presentan un aumento de la concentración de cloruros hacia su interior, es decir hacia las mayores profundidades. Por su parte en la Figura 3b se muestran los resultados para núcleos extraídos a 200 cm de altura, donde se aprecia concentraciones bajas de cloruros y que estas disminuyen hacia su interior.

El comportamiento electroquímico encontrado es correspondiente a los daños evidenciados, ya que muestran actividad del acero por corrosión en muchas de las columnas inspeccionadas, como por ejemplo lo observado en la Tabla 1 para la columna J29 con velocidades de corrosión de hasta 0,123 μA/cm² y potenciales entre -223,9 a -609,6 mV vs CuSO₄, correspondientes a criterios de riesgo elevado por corrosión.



(a) Columna en estado moderado, J18, cara sureste

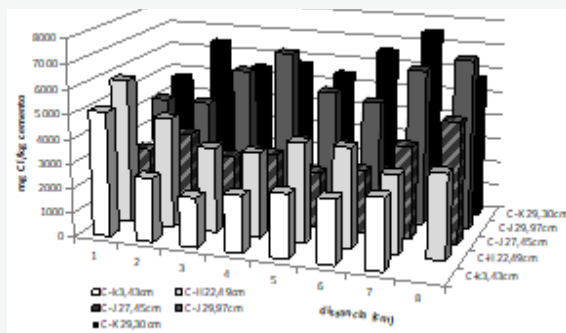


(b) Columna en estado severo, K22, cara sureste

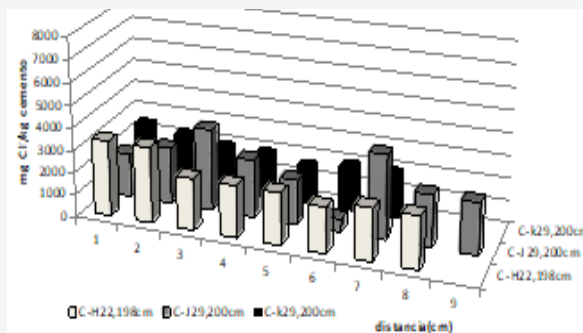


(c) Columna en estado moderado, J29, cara norte

Figura 2. Daños por corrosión presenten en las columnas del sótano.



(a)



(b)

Figura 3: Perfil de concentración de cloruros de los núcleos extraídos de la parte inferior de las columnas, (a) entre 30 a 97 cm de altura; (b) a 200 cm de altura.

Tabla 1. Medidas electroquímicas de potencial (mV) y velocidad de corrosión (icor, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) en la columna J -29.

Potencial (mV vs Cu/CuSO4)				
Altura (cm)	Cara Norte		Cara Este	Cara Oeste
	Barra Este	Barra Oeste	Barra Norte	Barra Norte
200	-283,5* (icorr = 0,068 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	-373,3	-263,1	-309,9
175	-290,8	-301,6	-223,9	-257,4
160	-283,0* (icorr = 0,027 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	-	-	-
150	-248,6	-260,4	-275,1	-313,5
125	-223,1	-243,3	-46,3	-402,5
114	-234,0* (icorr = 0,123 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	-	-	-
100	-294,1	-352,5	-354,2	-246,4
75	-301,4	-343,4	-357,8	-344,9
50	-460,3	-462,6	-460,3	-447,0
25	-609,6	-571,0	-609,6	-549,1

Es importante mencionar, que se halló espesores de concreto carbonatado en un intervalo entre 0 a 3 cm, encontrándose las menores o nulos espesores carbonatados a las menores alturas, mientras que los espesores más altos carbonatados se registraron para las mayores alturas, típico de las condiciones de un estacionamiento no ventilado.⁷⁶

En otro caso en un sótano, los daños por corrosión correspondieron solo a problemas

por carbonatación del concreto, Figura 4, con espesores que están entre 11,8 a 72,9 mm siendo el espesor del concreto de 60 mm. Mientras que los cloruros a nivel de barra solo alcanzaron los 431 a 1309 ppm en base cemento, pero altas porosidades entre 16 y 19, con bajas resistencias a la compresión 148 a 295 Kg/cm², que evidencian la baja calidad y alta porosidad del concreto que potencia y facilita la carbonatación del concreto.⁷⁶



Figura. 4. Vista Frontal de la cara Sur de la Columna 1 (a), columna 3 superior (b) y columna 3 superior (c) del Sótano Nivel II, evidenciando delaminación del concreto y refuerzo expuesto, por daños por corrosión.

Este último caso de corrosión que se presenta, muestra los daños de corrosión por carbonatación del concreto encontrados en el Estadio Olímpico José Encarnación “Pachencho” Romero, durante trabajos de inspección en agosto del 2004, perteneciente al Polideportivo de Maracaibo, Figura 5, el cual consta de dos tribunas, una techada (Figura 5a) y otra no techada (Figura 5b).

Estas tribunas están conformadas por 21 y 43 ejes respectivamente, y casi 2000 gradas.

Durante la inspección se observaron daños por corrosión en la parte externa e interna preferencialmente Figura 6, evidenciando desde grietas, concreto con pérdida de adherencia hasta acero expuesto.



Figura 5. Estadio Olímpico José Encarnación “Pachencho” Romero, Maracaibo, Venezuela, construido en 1968.



Figura 6. Daños por corrosión en tribuna no techada en la parte inferior



Figura 7. Perfiles de concreto carbonatado en núcleos extraídos(a) y gradas en sitio (b)

El intervalo del recubrimiento de concreto encontrado fue muy variado, desde 20 a 40 mm, y el espesor de concreto carbonatado (Figura 7a) coincide con este intervalo en la mayoría de los casos, evidenciando un gran porcentaje de concreto carbonatado, Figura 7b. Por su parte, el comportamiento electroquímico registrado evidencio

actividad por corrosión, con velocidades de corrosión elevadas y potenciales electronegativos referidos a riesgo por corrosión por carbonatación, Figura 8, comportamiento y daños característicos de riesgos de corrosión en un medio ambiente urbano tropical.⁷⁷

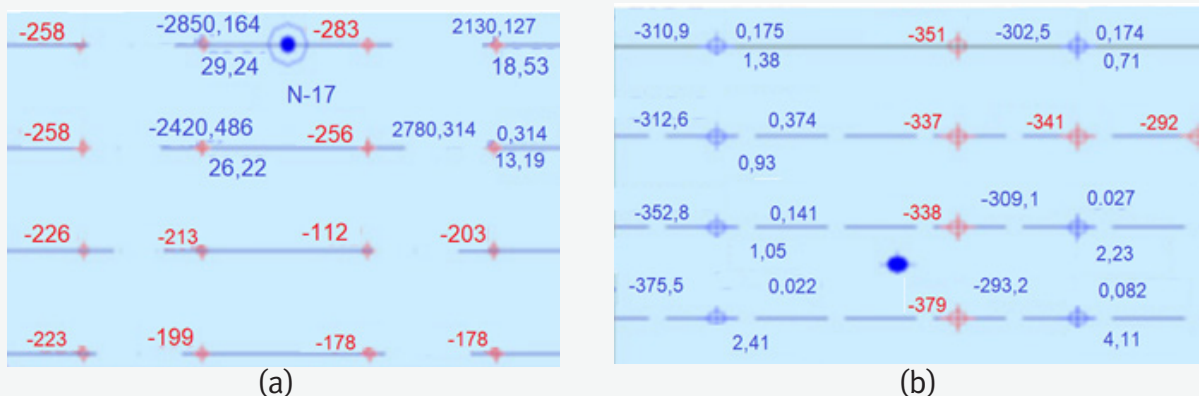


Figura 8. Comportamiento electroquímico de gradas en tribuna no techada. (a) Grada 17 eje 33-34 (b) Grada 12 eje 6-7

Aplicaciones y casos en laboratorio:

En los casos de estudio de la corrosión en laboratorio, se muestran resultados del comportamiento del acero al carbono sumergido en solución de agua de poro de concreto (simulada químicamente) y embebido en mortero. Algunas de las técnicas más utilizadas para estudiar no solo la velocidad de reacción sino los procesos fisicoquímicos que pueden ser vinculados a las reacciones, es la de impedancia electroquímica.

La Figura 9 muestran los espectros de impedancia para los aceros al carbono sometidos o no a esfuerzo mecánico en agua de poro sin NaCl y con 0,5 M de cloruro(2). Para los dos casos en el diagrama de Nyquist (Figuras 9a y 9d) se distingue una sola constante de tiempo para los aceros, evidenciado por la formación de un semicírculo a altas o mayores resistencias para los refuerzos sin carga sugiriendo un estado pasivo, mientras que los aceros sometidos a esfuerzo mecánico muestran un semicírculo bien definido, de menor diámetro demostrando mayor actividad electroquímica, lo que representa un aumento de la velocidad de corrosión.⁷⁸

Por su parte en el diagrama de Bode, Figuras 9b y 9e, se aprecia igualmente el efecto que tiene la carga mecánica sobre la actividad electroquímica de los refuerzos, ya que el comportamiento del módulo de impedancia y/o resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) alcanzan valores mayores para los aceros sin carga mecánica aplicada, como por ejemplo para el caso de estos aceros en

agua de poro sin cloruros donde se obtuvo una resistencia a la transferencia mayor a los 100.000 Kohm.cm², mientras que los aceros sometidos a carga mecánica alcanzan valores tan bajos como 0,98 Kohm.cm², registrándose una considerable diferencia entre ambas condiciones donde el módulo de impedancia de los aceros sometidos a carga es de por lo menos diez (10) órdenes menor.^{78,79} Los cambios del ángulo de fase (Figuras 9c y 9f) alcanzan valores entre 78 grados y 59,1 grados, indicando posibles reacciones farádicas en la interfase metal-electrolito y complementándose con los valores de capacitancia que se encuentran en el orden de los $\mu\text{F}/\text{cm}^2$.

La técnica de Polarización lineal, también es utilizada en laboratorio para cotejar y validar las mediciones en campo. En las Figuras 10 y 11 se muestran los potenciales y velocidades de corrosión de los refuerzos de aceros al carbono sin y con esfuerzo mecánico en agua de poro con NaCl. Para el caso del acero sin esfuerzo aplicado y en agua de poro sin NaCl se determinó un valor promedio de potencial de corrosión de -137,7 mV vs Ag/AgCl y una velocidad de corrosión promedio de 0,03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, correspondiente a valores de baja a despreciable potencialidad corrosiva, que indican formación y estabilidad de la película pasiva sobre el refuerzo. Sin embargo para estos mismos aceros al carbono pero sometido a esfuerzo mecánico se obtuvo un potencial a -323,3 mV vs Ag/AgCl y una velocidad de corrosión correspondiente a 320 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicativos de una alta probabilidad de corrosión del acero, debido posiblemente al esfuerzo mecánico aplicado el cual estaría perturbando la pasividad del

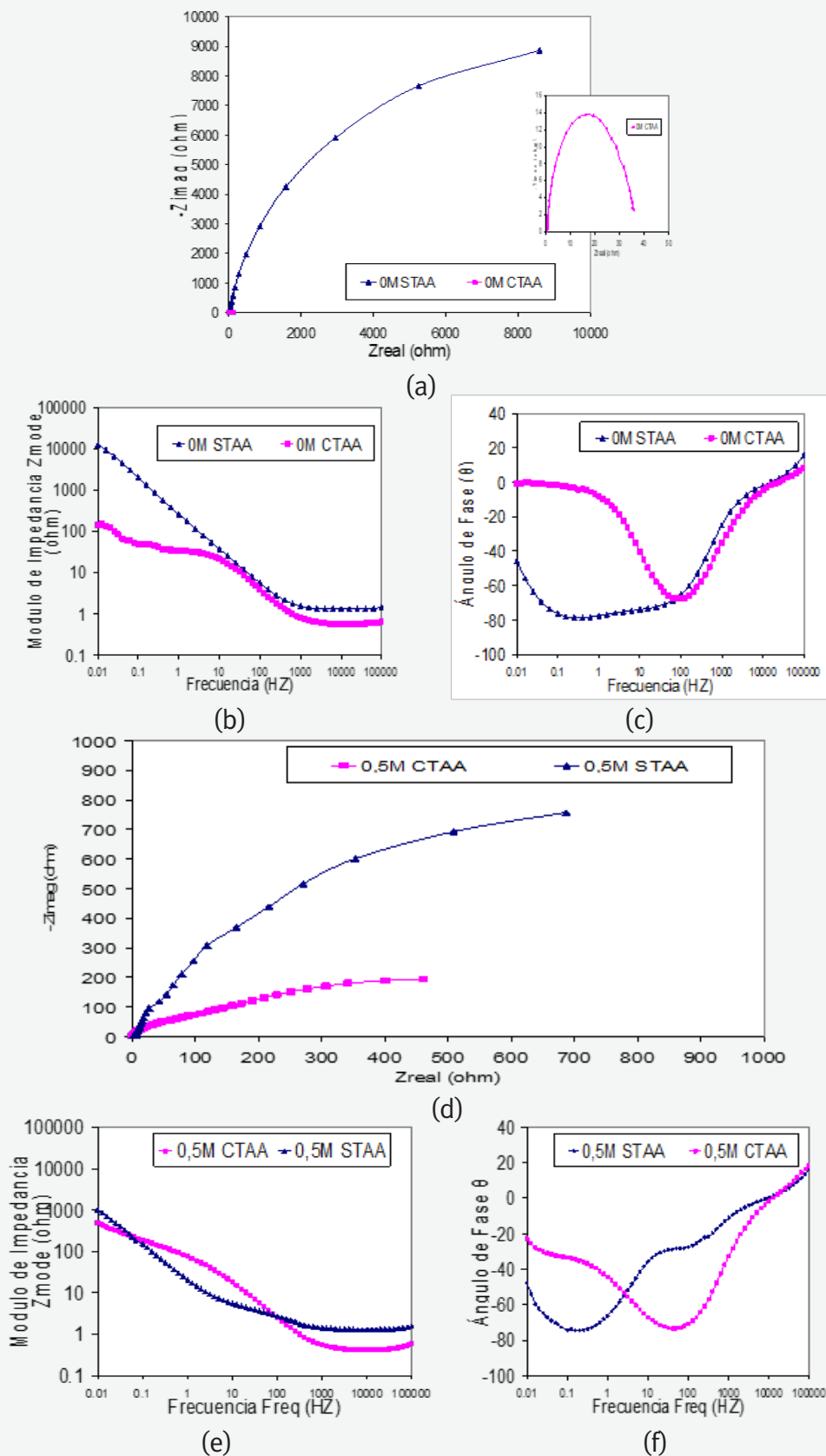


Figura 9. Diagrama de Nyquist (a, d) y Bode (b, c, e, f) de los refuerzos de aceros al carbono (AA) en agua de poro Sin cloruros (0M) y con 0,5M de cloruros sometidos o no a esfuerzo mecánico.

refuerzo, posiblemente por un desarreglo interno del material ejercido por el esfuerzo lo que no permite la formación de la película pasiva en el periodo de tiempo evaluado aun en ausencia de agentes agresivos como el cloruro.

Mientras que para los aceros en agua de poro con 0,5M la actividad electroquímica aumenta proporcionalmente a la concentración de cloruros evaluada y a la condición de la aplicación del esfuerzo mecánico; ya que para el caso de los aceros en agua de poro con 0,5M se obtuvieron valores de -362,2 mV vs Ag/AgCl y 0,7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, y -385,95 mV vs Ag/AgCl, 2,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, para los aceros sin y con esfuerzo mecánico aplicado, respectivamente.

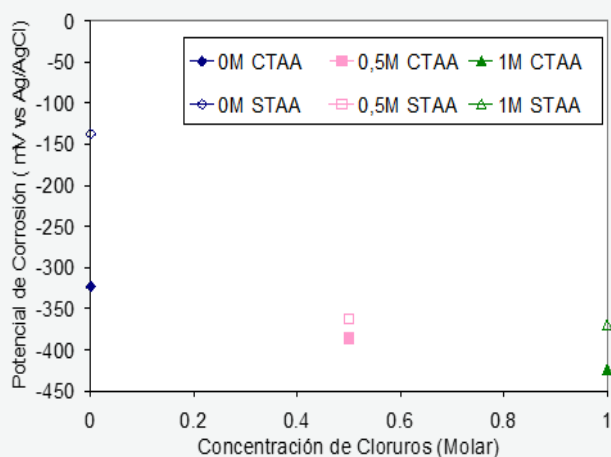


Figura 10. Potenciales de corrosión para los refuerzos de aceros al carbono (AA) en agua de poro sin y con cloruros en concentraciones de 0,5M y 1M sin y con esfuerzo mecánico.

Sin embargo, los aceros sometidos a esfuerzo mecánico alcanzan valores con un orden de magnitud mayor al encontrado en los refuerzos sin carga aplicada, lo que sugiere al igual que para los aceros sin la presencia de cloruros un efecto de la actividad electroquímica de la carga mecánica aplicada sobre el refuerzo de acero al carbono pero menos acentuada⁷⁹.

La evaluación a través de la técnica de impedancia electroquímica mostró el mismo comportamiento evidenciando claramente la susceptibilidad de los refuerzos bajo la acción de la carga, independientemente de la concentración o no de cloruros en el medio.

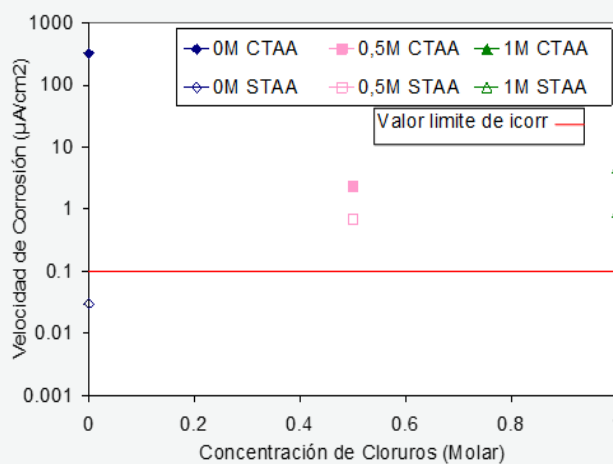


Figura 11. Velocidad de corrosión de los refuerzos de aceros al carbono (AA) en agua de poro con 0,5M y 1M de cloruros sometidos o no a esfuerzo mecánico.

Conclusión

1. Los factores que afectan más la velocidad de corrosión son los agentes agresivos, la humedad, la temperatura y la formación de macropares galvánicos.
2. Los productos de corrosión, debido al aumento de volumen que presentan, ejercen tensiones sobre el concreto circundante, y si estos esfuerzos sobrepasan el límite de tracción del concreto producen el agrietamiento, y en casos severos desprendimiento y consecuentemente se aumentan las vías de entrada de agentes agresivos.
3. En la evaluación de la velocidad de corrosión del concreto reforzado se utilizan ensayos naturales, simulados y acelerados.
4. La corrosión de la armadura en el concreto es el principal factor que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

5. Durante el proceso de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, la zona anódica y la catódica están localizadas en la superficie del acero de refuerzo, mientras que el concreto actúa de electrolito formando una celda electroquímica. La desigualdad en el estado energético entre las dos zonas de la superficie de la armadura (diferencia de potencial) provoca el flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo.

6. La medida del potencial eléctrico, ruido electroquímico y tomografía electroquímica se pueden medir espontáneamente.

7. La resistencia a la polarización lineal, polarización cíclica, voltametría cíclica, Impedancia electroquímica, pulso galvanostático, pulso coulombostático y otras, requieren para alcanzar una cantidad de corrosión significativa en un tiempo relativamente corto, aplicar una perturbación para provocar la formación de iones Fe^{++} .

Referencias

- 1.- Van Damme H. 2018. Concrete material science: Past, present, and future innovations, *Cem. Concr.* 1414 Res. 112, 5–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>.
- 2.- Mehta PK. 2001. Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International.* 23(10):61-66.
- 3.- Malhotra VM, Carrette GG. 1982. Silica fume: a pozzolan of new interest for use in some concretes. *Concrete Construction.* May:445-446.
- 4.- Kayali O, Zhu B. 2005. Corrosion performance of medium-strength and silica fume high strength reinforced concrete in a chloride solution. *Cement and Concrete Composites.* 27(1):117-124.
- 5.- Mackechnie JR, Alexander MG. 2001. Repair principles for corrosion-damaged reinforced concrete structures. *Research Monograph* 5 1–36.
- 6.- Angst UM. 2018. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete *Mater. Struct.* 1–20.
- 7.- Broomfield JP. 1997. *Corrosion of steel in concrete.* St. Edmundsbury Press Limited.
- 8.- Bhattacharjee B. 2012. Some issues related to service life of concrete structures. *Indian Concr. J.* 8623– 29.
- 9.- Michel A, Otieno M, Stang H, Geiker MR. 2016. Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations. *Cem. Concr. Compos.* 70.
- 10.- Koch G, Varney J, Thompson N, Moghissi O, Gould M, Payer J. 2016. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies. *Study NACE International* 1–30.
- 11.- Yu B, Liu ZJ, Chen Z. 2017. Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity. *Construct. Build. Mater.* 138, 101–113. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100.
- 12.- Song HW, Saraswathy V. 2007. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures—A Review. *International Journal of Electrochemical Science.* 2, 1-28.

- 13.- Zacharopoulou A, Zacharopoulou E, Batis G. 2014. Protection Systems for Reinforced Concrete with Corrosion Inhibitors. *Open Journal of Metal*. 4, 86-92. <https://doi.org/10.4236/ojmetal.2014.44010>.
- 14.- O'Reilly M, Darwin D, Browning J, Xing L, Lock Jr CE, Virmani YP. 2013. Effect of Corrosion Inhibitors on Concrete Pore Solution Composition and Corrosion Resistance. *ACI Materials Journal*. 110, 577-586.
- 15.- Hanson CM, Poursaee A, Jaffer SJ. 2012. Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete. *The Masterbuilder*, December 2012.
- 16.- Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland O, Salta M, Raharinaivo A. 2004. Elsener, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in 1716 concrete by means of the polarization resistance method, *Mater. Struct.* 37 (2004) 623–642. 1717 <https://doi.org/10.1007/BF02483292>. 1718.
- 17.- Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Sweden: CBI, 468 p.
- 18.- Qing Li C. 2004. Reliability based service life prediction of corrosion affected concrete structures, *J. 1719 Struct. Eng.* 130 1570–1577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-1720_9445\(2004\)_130:10\(1570\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-1720_9445(2004)_130:10(1570)). 1721.
- 19.- Raupach M. 2006. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion – an overview, 1722 *Mater. Corros.* 57, 605–613. <https://doi.org/10.1002/maco.200603991>. 1723.
- 20.- Otieno B, Beushausen HD, Alexander MG. 2011. Modelling corrosion propagation in 1724 reinforced concrete structures – A critical review, *Cem. Concr. Compos.* 33, 240–245. 1725 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.11.002>. 1726.
- 21.- Chen D, Mahadevan S. 2008. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking 1727 simulation, *Cem. Concr. Compos.* 30, 227–238. 1728 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.007>. 1729.
- 22.- Chen F, Baji H, Li CQ. 2018. A comparative study on factors affecting time to cover cracking as a 1730 service life indicator, *Constr. Build. Mater.* 163, 681–694. 1731 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.120>. 1732.
- 23.- Alexander M, Beushausen H. 2019. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced 1733 concrete structures – review and critique, *Cem. Concr. Res.* 122, 17–29. 1734 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>.
- 24.- Otieno MB, Beushausen HD, Alexander MG. 2011. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures - a critical review. *Cement Concr.Compos.* 33 (2), 240–245. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.11.002.
- 25.- Isgor C OB, Razaqpur AG. 2006. Modelling steel corrosion in concrete structures. *Mater. Struct.* 39 (3), 291–302. doi:10.1007/s11527-005-9022-7.
- 26.- Kranc SC, Sagüés AA. 2001. Detailed modeling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete. *Corrosion Sci.* 43 (7), 1355–1372. doi:10.1016/S0010-938X(00)00158-X.
- 27.- Kim C CY, Kim JK. 2008. Numerical analysis of localized steel corrosion in concrete. *Construct. Build. Mater.* 22 (6), 1129–1136. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.02.007.

- 28.-Bo YU, Zhan L, Liu J et al. 2016. Influences of temperature and humidity on control mode and rate of reinforcing steel corrosion. *J. Build. Mater.* 19 (05), 844–849. doi:1007-9629(2016)05-0844-06.
- 29.- Arpit CG, Homayoon S, Eshmaiel G, Olubanwo AO, Khorami M. 2019. Predicting the corrosion rate of steel in cathodically protected concrete using potential shift. *Construct. Build. Mater.* 194, 344–349. doi:10.1016/j. conbuildmat.2018.10.153.
- 30.- Chi CG. 2009. Research on electrochemical corrosion behavior of 70/30Cu-Ni alloy in seawater. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- 31.- Angst UM, Geiker MR, Alonso MC, Polder R, Isgor OB, Elsener B et al. 2019. The effect of the steel–concrete interface on chloride-induced corrosion initiation in concrete: a critical review by RILEM TC 262-SCI. *Mater. Struct. Constr.* 52 (4), 88. doi:10.1617/s11527-019-1387-0.
- 32.- Wu K, Shi H, Xu L, Ye G, De Schutter G. 2015. Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement Concr. Res.* 79, 243–256. doi:10.1016/j. cemconres.2015.09.018.
- 33.- Zhu Z, Chen H, Liu L, Li X. 2017. Multi-scale modelling for diffusivity based on practical estimation of interfacial properties in cementitious materials. *Powder Technol.* 307, 109–118. doi:10.1016/j. powtec.2016.11.036.
- 34.- Soylev TA, François R. 2003. Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel. *Cement Concr. Res.* 33 (9), 1407–1415. doi:10. 1016/s0008-8846(03)00087-5.
- 35.- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Method for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C876. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- 36.- Andrade C. 2018, “Diseño y evaluación de la vida útil a través de resistividad eléctrica concreta”, *Revista ALCONPAT*, 8 (3), pp. 264-279, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>.
- 37.- Andrade C. 2004. “Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity”. International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, 22-24, RILEM Publications SARL.
- 38.- Andrade C, Bolzoni F, Fullea J. 2011. Analysis of the relation between water and resistivity isotherms in concrete, *Materials and Corrosion*, 62, no.2 130-138, <https://doi.org/10.1002/maco.201005777>.
- 39.- Andrade C, Castellote M, D’Andrea R. 2011. Measurement of ageing effect of chloride diffusion coefficients in cementitious matrices, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 412, Issue 1, pp 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.12.236>.
- 40.- Andrade C, D`Andréa R. 2010. *Revista ALCONPAT*, 8 (3), 2018: 264 – 279 Diseño y evaluación de la vida útil a través de resistividad eléctrica concreta C. Andrade 278. Concrete mix design based on the electrical resistivity- 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona- Italy June. Ed. Coventry University UK.
- 41.- Andrade C, D’Andrea R, Rebolledo N. 2014. “Chloride ion penetration in concrete: The

reaction factor in the electrical resistivity model”, *Cement and Concrete Composites*, Volume 47, pp 41-46, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.022>.

- 42.- Andrade C, Fullea J, Alonso C. 2000. The use of the graph corrosion rate-resistivity in the measurement of the corrosion current- Proceedings of the International Workshop on “Measurement and interpretation of the on-site corrosion rate. MESINA- RILEM Proc. No. 18. Ed. Andrade C, Alonso C, Fullea J, Polimon J, Rodriguez J. Rilem Publications S.A.R.L. 157-166.
- 43.- Stern M, Geary AL. 1957. Electrochemical polarization. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of the Electrochemical Society*, 104(1), pp. 56–63.
- 44.- Andrade C, Gonzalez JA. 1978. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Werkst. Korros.*, 29, p. 515.
- 45.- Feliú S, González JA, Feliú S Jr, Andrade C. 1990. Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarisation resistance in reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, September–October, pp. 457–460.
- 46.- Alonso C, Castellote M, Andrade C. 2002. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta*, 47, pp. 3469–3481.
- 47.- Rodrigues R, Gaboreau S, Gance J, Ignatiadis I, Betelu S. 2020. Re- inforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, Elsevier, pp.121240. [10.1016/j.conbuildmat.2020.121240](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240). hal-02979786.
- 48.- Chousidis N, Rakanta E, Ioannou I, Batis G. 2015. Anticorrosive Effect of Electrochemical Manganese Dioxide By-Products in Reinforced Concrete. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 3, 9-20.
- 49.- Page C. 1975. Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures. *Nature* 258, 514–515.
50. Raupach M. 1996. Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete—theoretical background and practical consequences. *Constr. Build. Mater.* 10, 329–338.
- 51.- Kranc S, Sagüés AA. 2001. Detailed modeling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete. *Corros. Sci.* 43, 1355–1372.
- 52.- Elsener B. 2002. Macrocell corrosion of steel in concrete—implications for corrosion monitoring. *Cem. Concr. Compos.* 24, 65–72.
- 53.- Angustia UM. 2018. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Mater. Struct.* 51, 1–20.
- 54.- Andrade C, González J. 1978. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Mater. Corros.* 29, 515–519.
- 55.- Hansson CM. 1984. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. *Cem. Concr. Res.* 14, 574–584.

- 56.- Rodriguez P, Ramirez E, Gonzalez J. 1994. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. *Mag. Concr. Res.* 46, 81–90.
- 57.- Elsener B. 1995. Corrosion rate on reinforced concrete structures determined by electrochemical methods. *Mater. Sci. Forum* 192, 857–866.
- 58.- Videm K, Myrdal R. 1997. Electrochemical behavior of steel in concrete and evaluation of the corrosion rate. *Corrosion* 53, 734–742.
- 59.- Nygaard PV. 2009. Non-Destructive Electrochemical Monitoring of Reinforcement Corrosion. (Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU) (BYG-Rapport; No. R- 202.
- 60.- Escalante E, Ito S, Cohen M. 1980. Measuring the Corrosion Rate of Reinforcing Steel in Concrete. Technical Report (National Bureau of Standards).
- 61.- Gonzalez J, Molina A, Escudero M, Andrade C. 1985. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates—i. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. *Corros. Sci.* 25, 917–930.
- 62.- Feliu S, Gonzalez J, Andrade C, Feliu V. 1989. Polarization resistance measurements in large concrete specimens: mathematical solution for a unidirectional current distribution. *Mater. Struct.* 22, 199–205.
- 63.- Kranc SC, Sagües A. 1993. Polarization current distribution and electrochemical impedance response of reinforced concrete when using guard ring electrodes. *Electrochim. Acta* 38, 2055–2061.
- 64.- Elsener B. 2005. Corrosion rate of steel in concrete—measurements beyond the Tafel law. *Corros. Sci.* 47, 3019–3033.
- 65.- Feliu SF, González JA, Andrade MC. 1990. Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete. *Mater. J.* 87, 457–460.
- 66.- Poursaee A, Hansson C. 2008. Galvanostatic pulse technique with the current confinement guard ring: the laboratory and finite element analysis. *Corros. Sci.* 50, 2739–2746.
- 67.- Clément A, Laurens S, Arliguie G, Deby F. 2012. Numerical study of the linear polarisation resistance technique applied to reinforced concrete for corrosion assessment. *Eur. J. Environ. Civ.* 16, 491–504.
- 68.- Angst U, Büchler M. 2015. On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. *Mater. Corros.* 66, 1017–1028.
- 69.- Laurens S et al. 2016. Steady-state polarization response of chloride-induced macrocell corrosion systems in steel reinforced concrete—numerical and experimental investigations. *Cem. Concr. Res.* 79, 272–290.
- 70.- Angst U, Büchler MA. 2020. New perspective on measuring the corrosion rate of localized corrosion. *Mater. Corros.* 71, 808–823.
- 71.- Andrade C, Castelo V, Alonso C, González JA. 1986. “The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in concrete by the polarization resistance and AC Impedance

- Methods”. ASTM STP 906, V. Chaker, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 43-63.
- 72- Clayton CR, Olefjord I, Marcus P, Oudar J. 1995. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc, New York, 157.
- 73.- González Fernández JA. 1989. “Control de la Corrosión, Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas”. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Madrid. España.
- 74.- T de Rincón O, Andrade C, y Colaboradores. 1998. “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”. CYTED. Segunda Edición.
75. Albani OA, Zerbino JO, Vilche JR, Arvia AJ. 1986. A comparative electrochemical and ellipsometric study of the iron electrodes in different alkaline electrolytes. *Electrochim. Acta* 31, 1403.
76. Pedferri P, Bertolini L, Bolzoni F, Pastore T. 1997. Behavior of Stainless Steel in Concrete, Workshop Maracaibo.
77. Linares D, Sánchez M. 2003. Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara de carbonatación acelerada. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 26(1), p.34-44.
78. Castro-Borges P, Veleza L, Balancán-Zapata M, Mendoza-Rangel JM, Juárez-Ruiz LA. 2013. “Effect of Environmental Changes on Chemical and Electrochemical Parameters in Reinforced Concrete. The Case of a Tropical Marine Atmosphere”, *J. Electrochem. Sci.*, Vol.8, No.5, pp.6204-6211.
79. Feliú V, González JA, Andrade C, Feliú S. 1998. Equivalent Circuit for Modelling the Steel-Concrete Interface. I. Experimental Evidence and Theoretical Predictions. *Corrosion Science*. 40, 975-993. <http://hdl.handle.net/10261/226888>