

02-006

MODELLING OF MACROCELL PROCESSES IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.

Martínez Ibernón, Ana⁽¹⁾; Ramón Zamora, José Enrique⁽¹⁾; Soto Camino, Juan⁽¹⁾

⁽¹⁾IDM - Instituto Interuniversitario de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico. Universitat Politècnica de València

The generation of macrocells in concrete reinforcements is one of the main factors that strongly influences on the increase of corrosion rates in reinforced concrete structures. Therefore, it is fundamental to study these macrocells with the aim to detect the phenomena causing them. Thus, being able to develop monitoring systems for their detection and control. On the other hand, one of the most promising developments to monitor long-term behavior of reinforced structures in real time is the introduction of sensors. Besides, this approach allows monitoring areas of difficult access.

The aim of this paper is to do an initial study of both the working procedure of this specific corrosion sensors and their efficiency in the monitoring of corrosion currents in reinforced concrete structures and a first assessment on the impact that macrocells have on reinforced concrete. To achieve this, we have built three geometrically equal concrete specimens. In order to produce macrocells the concrete characteristics composing them vary. The reinforcement of both specimens consists in four stainless steel rebars and six sensors, used to realize the corrosion studies. Concluding that the effect of macropar intensifies corrosion currents and that sensors are an effective technique to monitoring the corrosion processes.

Keywords: *Macrocell; galvanic macrocouple; microcell; corrosion current; corrosion monitoring.*

MODELIZACIÓN DE PROCESOS DE MACROPAR GALVÁNICO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

La generación de macroceldas en las armaduras es uno de los factores que más incrementan la velocidad de deterioro por corrosión de las estructuras de hormigón armado. Por tanto, será fundamental su estudio con el fin de poder modelizar el proceso y detectar las causas que lo generan, pudiendo así desarrollar sistemas de monitorización apropiados para su detección y control. Por otra parte, uno de los desarrollos más prometedores para controlar el comportamiento, a largo plazo, de las estructuras es la introducción de sensores. Permiten controlar el estado de las estructuras en tiempo real, de forma no destructiva y en cualquier zona. El objetivo de este trabajo será hacer un estudio inicial tanto del comportamiento y la eficacia de los sensores propuestos como del impacto que tiene la generación de macroceldas. Para ello, se construyeron tres probetas de hormigón con igual geometría pero distinta composición (con el fin de provocar la formación de macroceldas). En cada probeta se embebieron cuatro barras de acero y seis sensores. Llegando a la conclusión que el efecto de macropar intensifica las corrientes de corrosión y que los sensores son una técnica efectiva para el seguimiento de este proceso de degradación de las estructuras.

Palabras clave: *Macrocela; macropar galvánico; microcela; corriente de corrosión; monitorización*

Correspondencia: Ana Martínez Ibernón; anmarib295@gmail.com



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Habitualmente, las condiciones químicas del hormigón son favorables para que el acero en contacto con él este pasivado y, como consecuencia, las velocidades de corrosión son realmente pequeñas. Pero, en ocasiones, bajo circunstancias desfavorables, tiene lugar la pérdida de la lámina pasiva del acero, lo que acelera su corrosión. Como ejemplo de estas situaciones ocasionales podemos señalar aquellas en que se produce el ataque por cloruros o cuando se produce la carbonatación del hormigón en ambientes húmedos. El gran inconveniente que se produce en estos casos es que la velocidad de corrosión media en armaduras en estado activo (despasivado) puede ser del orden de 20 a 100 veces la de las armaduras pasivas (Andrade et al., 1992).

El rápido deterioro que pueden sufrir las estructuras de hormigón armado (HA), debido a la corrosión de las armaduras de acero, constituye una verdadera amenaza para el mundo actual tanto en el aspecto económico como de seguridad de servicio.

No obstante, es necesario señalar que no sólo son los problemas citados los que conlleva la corrosión, sino que también produce un sobre coste energético y medioambiental. Esto se traduce, por una parte, en un incremento del consumo tanto de materia prima como de energía y, por otra, en aumento de las emisiones de sustancias contaminantes producidas en la industria siderúrgica.

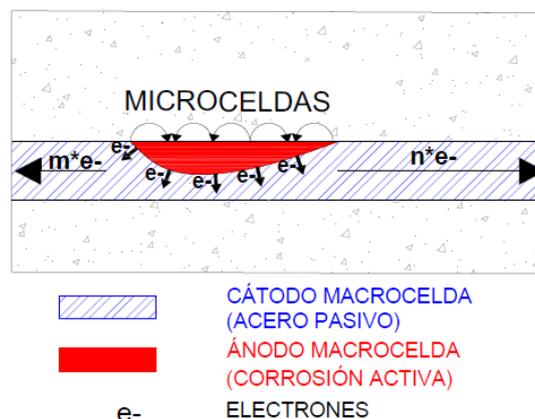
Por tanto, será importante la detección, control y eliminación o reducción del problema de la corrosión, no sólo, desde un punto de vista económico y de la durabilidad de las estructuras si no, también, desde un punto de vista energético y ecológico.

Para poder eliminar o reducir este problema, deben entenderse las causas que lo provocan y cuantificar el efecto de éstas. Uno de los procesos de transferencia electrónica que mayor impacto tiene en la degradación de las estructuras por corrosión es la existencia de macroceldas o macropar galvánico (Andrade et al., 1992). Estas macroceldas o macropilas se deben a la existencia de grandes zonas pasivas de armadura en contacto eléctrico con zonas activas, siendo estas últimas en las que se produce la corrosión del acero al ser las fuentes de electrones. En la macrocelda la zona activa actúa como ánodo de la macropila y la zona pasiva como cátodo, actuando como electrolito la disolución de poro del hormigón (Andrade, Garcés & Martínez, 2008; Bertolini, Elsener & Pedferri, 2004 y Gulikers, 1996).

Según afirman diversos autores, la corrosión de macrocelda debe coexistir con la corrosión de microcelda (Andrade et al., 1992 y Ji, Zhao, Zhou, Ma, & Zeng, 2013). Esta corrosión de microcelda es la debida a las heterogeneidades de composición o estructura que existen a nivel microscópico. Cada heterogeneidad tiene su propia variación de energía libre de modo que la micropila queda definida entre las dos fases diferenciadas de la microestructura, con la existencia del ánodo (borde de grano), cátodo (grano), electrolito (medio corrosivo) y conducción eléctrica (interior del metal).

En la figura 1 podemos ver un esquema de lo que entendemos por macrocelda y microcelda.

Figura 1: Esquema definición macroceldas y microceldas



Debido a la importancia que tiene el efecto de macrocelda en el incremento de la velocidad de corrosión, se han realizado gran número de trabajos con el objeto de modelizar estos procesos y así facilitar el estudio de la corrosión.

Por otra parte, acerca de los métodos de medición empleados en los estudios realizados hasta el momento, el método más extendido para medir las corrientes de macropar galvánico o macrocelda es el uso de un amperímetro de resistencia casi nula (ZRA). En cambio, para la medición de las corrientes de microcelda se usa el método de resistencia de polarización lineal (LPR) (Andrade, Garcés & Martínez, 2008; Hansson, Poursaee, & Laurent, 2006; Hornbostel et al., 2016 y Nasser et al., 2010).

El usar los ZRA para medir directamente las corrientes de macropar galvánico en estos estudios ha sido posible porque cátodo y ánodo eran elementos diferenciados que se podían conectar y desconectar libremente para poder introducir (en serie) un amperímetro. Pero en las estructuras de hormigón armado reales no podemos conectar el amperímetro entre ánodo y cátodo por lo que deberemos desarrollar un sistema que nos permita evaluar el impacto de este proceso, pudiendo ser adecuado el uso de sensores propuesto por Alcañiz et al. (2015). La utilidad de estos sensores va a ser analizada en la investigación planteada.

En la actualidad, la introducción de sensores para la monitorización de los procesos de corrosión en estructuras de hormigón armado (HA) es una de las técnicas no destructivas más prometedoras (Andrade C. et al. 2001). Estos sensores permitirán controlar el estado de las estructuras en tiempo real, de forma no destructiva y en cualquier zona.

En el mercado, la mayoría de sensores electroquímicos que encontramos para el estudio de los parámetros que afectan a la durabilidad de las estructuras de HA son sensores electroquímicos (Andrade et al., 2001 y Gandía Romero, 2014). Su modo de funcionamiento consiste en la transformación de los efectos que produce la interacción entre el sensor y el componente de interés, siendo esta interacción fruto de la reacción espontánea o estimulada eléctricamente mediante equipos, en una señal eléctrica de corriente o tensión, la cual somos capaces de interpretar.

El sistema de sensores específicos a analizar, consiste en el uso de pequeños elementos realizados con el mismo acero que el de la armadura a estudiar, distribuidos a lo largo de la estructura y conectados eléctricamente a ella. Pretendiéndose así, que los sensores participen de las condiciones físico-químicas de su entorno de modo que, las mediciones en ellos, permitan determinar el estado de corrosión de la armadura (Alcañiz et al. 2015) y (Ramón et al., 2016).

En este sistema, se plantea la medición de la corriente de macrocelda circulante entre el sensor y la estructura a través de un amperímetro de resistencia casi nula (Ramón et al., 2016), pudiéndose monitorizar los cambios en el sistema e identificar si se está produciendo la corrosión activa del acero.

La ventaja de los sensores específicos frente a los sensores galvánicos existentes en el mercado (Park et al., 2005 y Pereira et al., 2009), es que los primeros participan en los procesos de corrosión que se dan en la estructura. Por otra parte, aventajan a los sensores potencióstáticos (Gandía-Romero et al., 2016), en que, con los sensores específicos se puede mostrar el grado de corrosión.

La monitorización de la durabilidad mediante sensores en estructuras reales está todavía en desarrollo, aun así, existen algunos ejemplos de estructuras reales donde se han incorporado sensores para controlar la corrosión (Martínez & Andrade, 2009).

Atendiendo a lo anteriormente expuesto el objetivo principal del presente trabajo consiste en el estudio de las corrientes de corrosión en estructuras de hormigón armado inducidas por el efecto de macropar galvánico. Se estudiarán las causas que las inducen y se intentará dar una propuesta de modelización inicial del fenómeno. Así mismo, se estudiará la efectividad del uso de sensores para la detección, seguimiento y control de este proceso de degradación de los aceros en estructuras de hormigón armado.

2. Experimental

2.1. Probetas

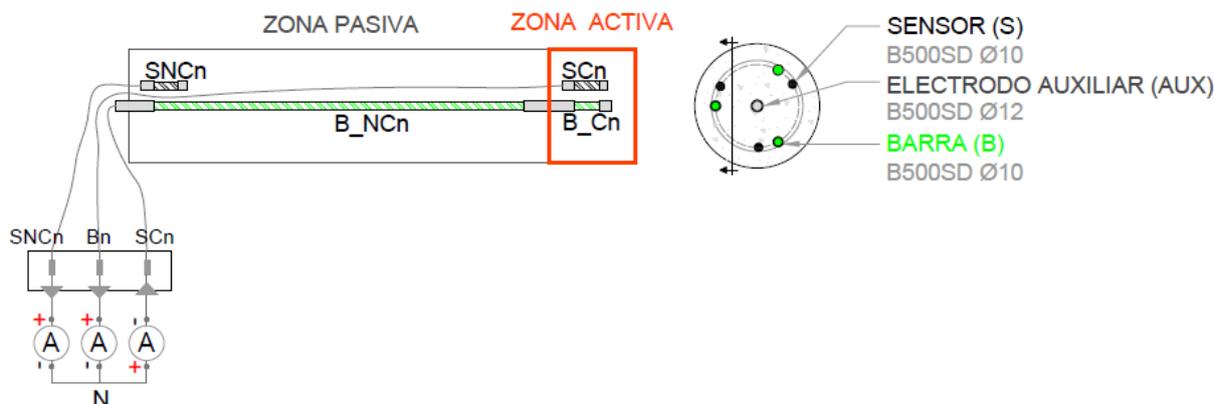
Para el estudio planteado se diseñaron y construyeron tres probetas de hormigón armado de iguales características geométricas pero distintas características en el hormigón que las forma. Con ellas se pretende analizar las siguientes causas precursoras del fenómeno de macropar galvánico:

- Ataque de cloruros localizado en estructuras de hormigón armado (Probeta P_Cl).
- Carbonatación del hormigón en estructuras de hormigón armado (Probeta P_CO₂).
- Distinta aireación (o concentración de O₂ en las inmediaciones de la armadura) (Probeta P_O₂).

Las probetas fueron fabricadas con base circular de 15 cm de diámetro y con una altura de 60 cm. El hormigón utilizado fue un hormigón de relación agua cemento 0.8.

En ellas diferenciaremos dos zonas, marcadas en el esquema de la figura 2.

Figura 2: Esquema diseño probetas



Nota: ZONA PASIVA, las condiciones del hormigón favorecen la pasividad del acero. ZONA ACTIVA, se fuerza la despasivación del acero. SC: sensores embebidos por completo en zona activa. SNC: sensores embebidos por completo en zona pasiva. B: Armaduras. B_NC parte embebida en zona pasiva y B_C parte embebida en zona activa. La n corresponde al número de elemento.

En la zona activa, en el caso de la probeta con cloruros (P_Cl⁻), se añadió en el agua de amasado 35g/l_{agua} de cloruro de sodio (sal), imitando así un amasado con agua marina. En el caso de la probeta P_CO₂, solo se carbonató el hormigón de esta zona y en la probeta de aireación diferencial (P_O₂) se usó un hormigón de relación a/c 0.5.

El proceso de carbonatación consistió en inyectar CO₂ en la zona a carbonatar (zona activa), en condiciones de caudal constante, a una presión de 1 atm durante el tiempo necesario para que el frente de carbonatación llegará a las armaduras. El tiempo necesario para completar el proceso fue de un mes.

En la matriz de hormigón fueron embebidos los siguientes elementos de acero corrugado B 500SD (figura 2):

- Armaduras (B): 3 barras de 56 cm de largo y 10 mm de diámetro. Simulan la armadura en una estructura de hormigón armado. Parte de ella, está embebida en la zona pasiva (B_NC) y, parte de ella, en la zona definida como activa (B_C).
- Sensores (S): 6 sensores de 3 cm de largo y 10 mm de diámetro. De los cuales tres se colocaron en la zona pasiva (SNC), en el extremo más alejado de la zona activa y tres se colocaron en la zona activa (SC). De tal forma que cada elemento B tiene asociados dos sensores con los que se pretende monitorizar su corrosión (tabla 1). El entorno de estos es similar al de la zona más próxima de la barra a ellos (figura 2). Por otra parte, se conectaron eléctricamente a las barras para inducir la generación de una/s macrocelda/s o macropila/s entre ellos, debido a que los potenciales de corrosión o equilibrio de los elementos metálicos en el electrolito son distintos, consiguiéndose que los sensores participen en los procesos de corrosión del elemento estudiado.
- Electrodo Auxiliar(AUX): 1 barra de 56 cm de largo y 12 mm de diámetro, que se utilizó como electrodo auxiliar en los ensayos electroquímicos realizados.

En la tabla 1 quedan identificados los elementos de cada una de las probetas, y la asociación de los sensores a los electrodos de trabajo correspondientes.

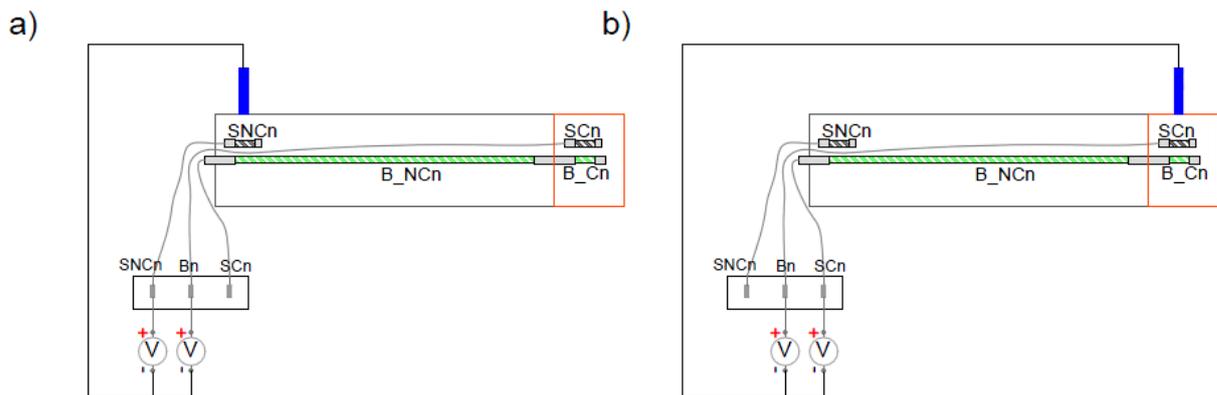
Tabla 1: Leyenda de elementos embebidos en cada probeta

PROBETA	ELECTRODOS DE TRABAJO	SENSORES
P_Cl ⁻	B1	SC1; SNC1
	B2	SC2; SNC2
	B3	SC3; SNC3
P_CO ₂	B4	SC4; SNC4
	B5	SC5; SNC5
	B6	SC6; SNC6
P_O ₂	B7	SC7; SNC7
	B8	SC8; SNC8
	B9	SC9; SNC9

2.2. Ensayos

- Para la medición de corrientes de macrocelda inducida, entre los sensores y la barra, fue usado un amperímetro de resistencia casi nula (ZRA), tal y como se muestra en la figura 2. El sentido de corrientes positivo será el marcado en ésta.
- Los potenciales de corrosión fueron medidos mediante el uso de electrodo de referencia de calomelanos (SCE), con voltímetro de alta impedancia. Los puntos en los que se colocó el electrodo de referencia para medir los potenciales de los distintos elementos quedan reflejados en la figura 3.

Figura 3: Esquema posición del sensor de referencia para la medición del potencial en cada elemento



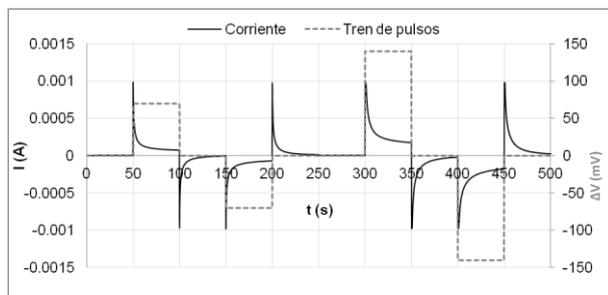
Nota: Figura a) medición del potencial en los elementos SNC y en la zona pasiva del elemento B (B_NC). Figura b) medición del potencial en los elementos SC y en la zona activa del elemento B (B_C).

- Para la obtención de corrientes de corrosión en los diferentes elementos que componen el modelo de ensayo preparado (descritos anteriormente), se usó la técnica de pulsos desarrollada por Alcañiz et al. (2015). En esta técnica, se somete a la muestra a un tren de pulsos voltamétricos. Con ella se consigue que, al aplicar pequeños escalones de potencial, la muestra no se polarice y, mediante el ajuste de los resultados al circuito equivalente pertinente (figura 5), obtener la corriente de

corrosión de una manera más precisa que con el método LPR. En la figura 4 vemos el tren de pulsos aplicado y un ejemplo de la respuesta en intensidad.

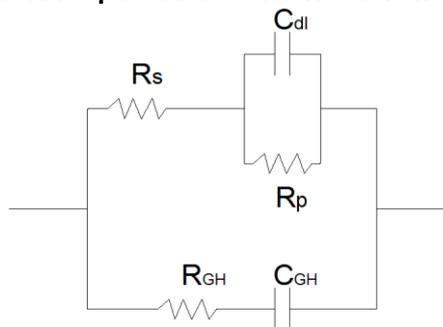
Para la programación del ensayo y la obtención de resultados se usó el programa NOVA 1.10.

Figura 4: Ejemplo de respuesta de intensidad y de tren de pulsos aplicado



Nota: Intensidad (línea continua) y tren de pulsos aplicado (línea discontinua).

Figura 5: Circuito equivalente al que se ajusta la respuesta de corriente del ensayo



La corriente de corrosión, para cada valor de pulso, será la corriente residual que queda por la rama Rp cuando los condensadores estén cargados (figura 5).

Basándonos en el método de Tafel, con el logaritmo del valor absoluto de estas intensidades se representan las rectas anódica y catódica ($\log(i)$ vs ΔV). En el punto de intersección de estas rectas, tendremos el valor de la intensidad de corrosión buscado (para el elemento ensayado).

3. Resultados

3.1. Normalización de corrientes de corrosión. Velocidad de corrosión

En los ensayos de laboratorio la medida más extendida como velocidad de corrosión es la corriente de corrosión normalizada o densidad de corriente (j), ésta se mide en $\mu A/cm^2$ y expresa la carga transferida por unidad de tiempo y superficie.

Lo más común es que la corriente de corrosión obtenida en los ensayos electroquímicos de corrosión se normalice por la superficie total del elemento estudiado (electrodo de trabajo). Atendiendo a esta corriente normalizada se establecen unos valores límite para marcar los grados de corrosión (tabla 2) (Bertolini, Elsener & Pedferri, 2004).

Tabla 2: Grados de corrosión en función la densidad de corriente según Bertolini, Elsener & Pedferri, (2004)

Grado	j_{corr} ($\mu A/cm^2$)
Alto	>1
Moderado	0.5 a 1
Bajo	0.1 a 0.5
Insignificante	<0.1

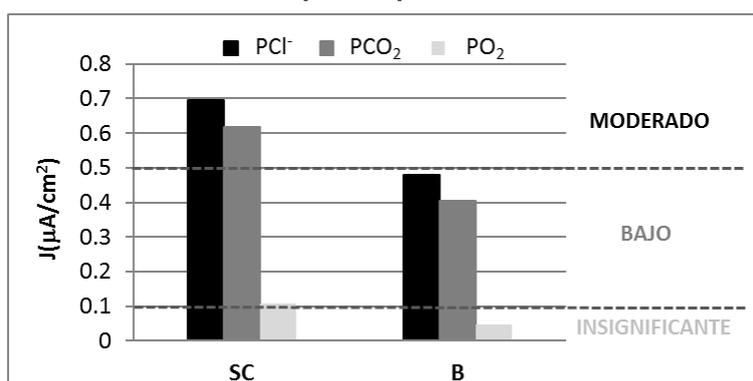
En los casos estudiados, la normalización de las corrientes de corrosión obtenidas en el ensayo de tren de pulsos se realizó dividiendo la corriente respuesta por la superficie total del elemento ensayado.

En el caso de las corrientes de macrocelda inducida medidas se normalizaron dividiendo por la superficie total de sensores. Sobre la normalización de estas corrientes no existe nada en normativa, pues el uso de estas corrientes para la determinación de la corrosión de las estructuras es un aspecto novedoso planteado en Alcañiz et al. (2015), Por tanto, decidimos estudiar la normalización planteada, ya que en una estructura real la superficie de sensores siempre será un dato conocido.

3.2. Análisis efecto de macrocelda

Con el fin de entender cómo influye el efecto de macrocelda en la velocidad de corrosión se estudian los resultados para el periodo a partir del cual las mediciones eran estables (19/12/2016). Entendemos por estable que las reacciones de hidratación del hormigón han cesado o por lo menos su actividad es despreciable (entorno químico del metal más estable) y se ha formado la capa pasiva del acero en aquellas zonas en las que las condiciones son favorables.

Figura 6: Valores promedio de densidades de corriente para el periodo estable



Nota: PCI: Probeta con cloruros. PCO₂: Probeta carbonatada. PO₂: Probeta con distintas relaciones a/c. SC: Valores de densidad de corriente promedio para los sensores embebidos en la zona activa. SCN: Valores de densidad de corriente promedio para los sensores embebidos en la zona pasiva.

Teniendo en cuenta las condiciones de los sensores embebidos en la zona activa de las probetas (sensores SC) encontramos tres situaciones distintas, dependiendo de la probeta en la que se encuentren:

- Probeta con cloruros. Debido a la acidificación localizada del medio, por la presencia de cloruros, se producirán en la superficie del sensor pequeñas zonas en las que el acero perderá su capa pasiva, generándose macroceldas (corrosión por picadura), donde las zonas que se han despasivado actuarán como ánodos (corrosión activa) y las zonas aun pasivas como cátodos.
- Probeta carbonatada. Con el avance del frente de carbonatación se produce la disminución del pH de forma generalizada y esto provoca que la despasivación del acero se produzca uniformemente en la superficie. La corrosión se produce por la generación de microceldas, no tendremos efecto de macrocelda y la corrosión será generalizada.

- Probeta con hormigón de distinta relación agua/cemento. En esta probeta no se ha introducido ningún agente agresivo que produzca la despasivación del acero. En este caso no existirá una corrosión activa (la densidad de corriente es insignificante) ni por generación de microceldas ni por macroceldas. El acero se mantendrá pasivo.

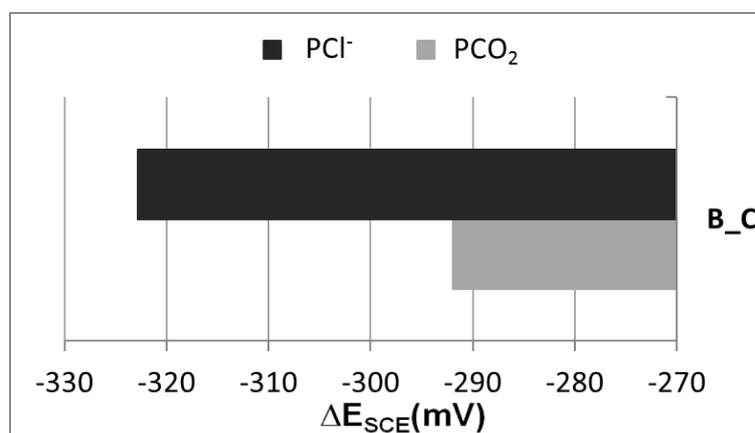
En la figura 6 se muestran las densidades de corriente de corrosión promedio del periodo estable. Comparando los valores promedio de velocidad de corrosión en los elementos SC (figura 6), comprobamos como la mayor velocidad de corrosión se da en los sensores en los que si se han generado macroceldas (PCl^-_{SC}).

En los sensores situados en un ambiente no agresivo la velocidad de corrosión es insignificante (PO_2_{SC}).

En el caso de las barras (B), debería existir efecto de macrocelda en las barras de las tres probetas estudiadas, ya que se encuentran parcialmente embebidas en ambientes distintos. Pero si observamos los resultados de corrientes promedio de la figura 6 vemos como, en la probeta P_{O_2} , la velocidad de corrosión es insignificante. En esta probeta no existen agentes agresivos precursores de la despasivación del acero esto hace que no se produzca una corrosión activa del metal.

En el caso de las probetas P_{Cl^-} y P_{CO_2} se produce la corrosión activa del metal, que está impulsada por el efecto de macropar generado por estar, parte del elemento, embebido en un ambiente agresivo y, la otra parte, en un ambiente que favorece la pasividad del acero. En el ambiente agresivo, la despasivación del acero favorece que estas zonas actúen como los ánodos de las macroceldas. Por otra parte, se observa cómo la corriente de corrosión normalizada es mayor para el caso de la probeta con cloruros donde, por tanto, el efecto de macrocelda es más acusado. Como primera hipótesis, esto se puede deber a que, en la corrosión por cloruros, la picadura, al ser menos extensa, se puede considerar como un ánodo perfecto y sus potenciales tienden a ser más negativos que en el caso de tener un ánodo más extenso que se ve polarizado por el efecto de microcelda. Esto se puede apreciar en el valor promedio de los potenciales para el periodo en el que las medidas comenzaron a ser estables (figura 7). El potencial de la zona activa es más negativo en la probeta con cloruros.

Figura 7: Potenciales de corrosión promedio para el periodo estable de los elementos B



Nota: PCl^- : Probeta con cloruros. PCO_2 : Probeta carbonatada.

3.3. Análisis eficacia de los sensores

En la figura 8 se comparan los valores de densidad de corriente de corrosión promedio de los elementos B con las corrientes de macropar inducido promedio SC-N y SNC-N (figura 3), de las probetas P_Cl⁻ y P_CO₂. No se hace esta comparativa para la probeta P_O₂ pues en ésta las corrientes de macrocelda inducidas son nulas, ya que todas las barras se mantienen pasivas, como ya se ha justificado.

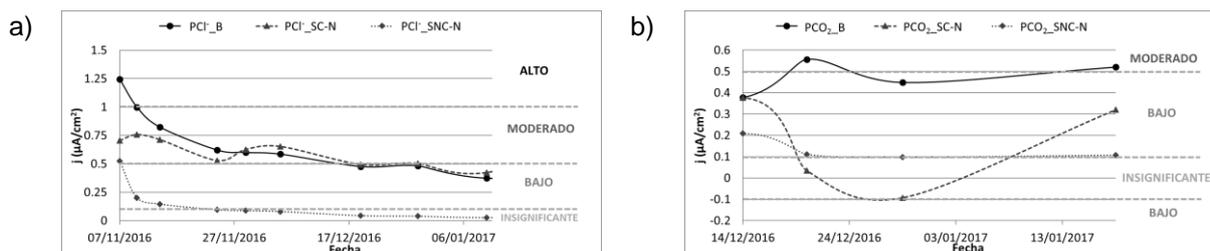
En ambas probetas analizadas, para todo el periodo de estudio la densidad de corriente de corrosión promedio de la rama SC-N es mayor que la densidad de corriente medida en la rama SNC-N (figura 3). Recordemos que SC son los sensores más próximos a la zona potencialmente corrosible de los elementos B.

En la probeta P_CO₂ se dan valores negativos de densidad de corriente, para la rama SC-N. Se debe a que el sentido de circulación de los electrones cambia, a causa del cambio de polaridad de las macroceldas inducidas. Pero, aun así, es en esta rama donde la lectura de corriente fue mayor. Esto nos hace pensar que el sistema de sensores es capaz de adaptarse a los cambios en el entorno y responder de manera más o menos rápida.

Atendiendo a lo anteriormente dicho, la zona de la armadura que se corroe queda identificada por la posición del sensor en cuya rama se lea una intensidad mayor, ya que, al estar más cerca de la zona potencialmente corrosible, la resistencia a la circulación iónica será menor, produciendo que la corriente iónica sea mayor y, por equilibrio de carga, la corriente leída será mayor (recordemos la corriente se define como la circulación de cargas positivas y, por tanto, tendrá sentido inverso a la circulación de los electrones). Esto se cumple incluso para edades tempranas, donde el sistema es aún muy inestable.

Por otra parte, también se apreció como, para el caso del ataque por cloruros, durante todo el periodo, la densidad de corriente de la rama SC-N no solo identifica la zona de la barra corroyéndose si no que, también, nos indica el grado de corrosión de ésta (figura 8 a). En el caso de la probeta P_CO₂, esto se da solo para el final del periodo, cuando el entorno comienza a ser más estable y el CO₂ introducido deja de reaccionar (figura 8 b).

Figura 8: Comparación corrientes de corrosión y corrientes de macrocelda inducida. Valores promedio



Nota: a) Datos probeta contaminada con cloruros. b) Datos probeta carbonatada. LEYENDA: B: Densidad de corriente de corrosión obtenida mediante tren de pulsos de los elementos B. SC-N: Densidad de corriente de macrocelda inducida medida entre los sensores SC y los elementos B. SNC-N: Densidad de corriente de macrocelda inducida medida entre los sensores SNC y los elementos B. Grados de corrosión según (Bertolini, Elsener & Pedeferri, 2004).

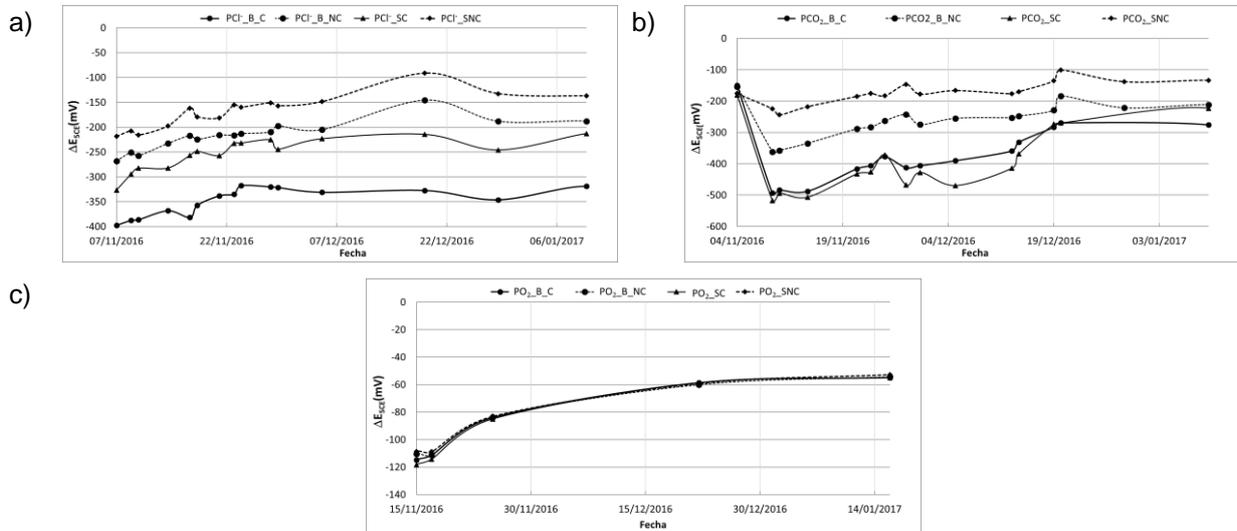
Otra forma de contrastar que la zona identificada mediante las corrientes de macrocelda inducida es acertada es la medición del potencial en los sensores (figura 9) o las velocidades de corrosión obtenidas mediante el ensayo de tren de pulsos (figura 10).

Respecto a los valores de potencial, los sensores de potencial más negativo son los situados en la zona activa, como se puede ver en los valores medidos en las probetas P_Cl⁻ (figura 9 a) y P_CO₂ (figura 9 b).

En la figura 9 c se presentan los valores de potencial de los elementos de la probeta PO_2 , donde podemos comprobar que al no haber introducido ningún agente potenciador de la corrosión y aun variando el hormigón, el entorno químico de las barras es muy similar al tener unos potenciales muy parecidos, lo que provoca que no se generen macropilas con la suficiente fuerza electromotriz para producir una circulación electrónica significativa.

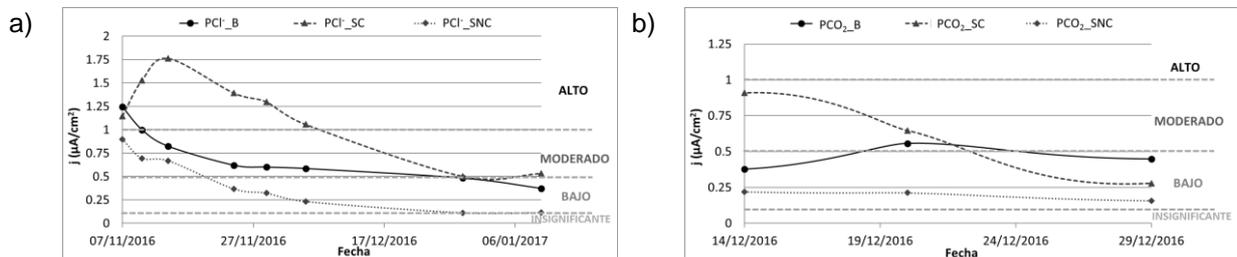
Como ya hemos dicho, las densidades de corrientes de corrosión obtenidas a través del ensayo de tren de pulsos en los elementos sensores, nos informan tanto de la zona potencialmente corrosible como del grado de corrosión. En los sensores SC observamos como este valor es mayor que en los sensores SNC y, además, para el periodo estable siempre marca un grado de corrosión igual o superior al que obtenemos en el elemento B (figura 10).

Figura 9: Valores promedio de los potenciales de corrosión



Nota: a) Datos probeta contaminada con cloruros. b) Datos probeta carbonatada. c) Datos probeta diferente relación a/c. LEYENDA: B_C: Potencial de corrosión promedio de los elementos B situando el calomelanos en la zona activa. B_NC: Potencial de corrosión promedio de los elementos B situando el calomelanos en la zona pasiva. SC: Potencial de corrosión promedio de los sensores SC. SNC: Potencial de corrosión promedio de los elementos SNC.

Figura 10: Valores promedio de densidades de corrosión obtenidas mediante tren de pulsos



Nota: a) Datos probeta contaminada con cloruros. b) Datos probeta carbonatada. LEYENDA: B: Densidad de corriente de corrosión de los elementos B. SC: Densidad de corriente de corrosión de los sensores SC. SNC: Densidad de corriente de corrosión de los sensores SNC.

4. Conclusiones

Las conclusiones extraídas del análisis de resultados serán las siguientes:

- Respecto a las intensidades de macrocelda y microcelda, los procesos de macrocelda incrementan las corrientes de corrosión. Siendo más intenso este efecto con el ataque por cloruros que en el caso de la carbonatación.
- La aireación diferencial, por el uso de dos hormigones con distinta porosidad, no provoca corrientes significativas de corrosión asociables a procesos activos de macrocelda.
- Podemos enunciar como primer resultado que los sensores parecen ser un método muy eficaz para el control de la corrosión en estructuras.
 - El estudio de las corrientes de macropilas inducidas por la conexión de los sensores a la armadura, resulta una herramienta eficaz para determinar el grado de corrosión de la armadura y la localización de la zona potencialmente corrosible.
 - La medición del potencial en los sensores, así como la densidad de corriente obtenida a través de la normalización de las corrientes de corrosión obtenidas con el ensayo de tren de pulsos, nos indicará la zona potencialmente corrosible.

5. Bibliografía

- Alcañiz M., Bataller R., Gandía-Romero J.M, Ramón J.E., Soto J., Valcuende M., Universitat Politècnica de València, “Sensor, red de sensores, método y programa informático para determinar la corrosión en una estructura de hormigón armado”, nºES2545669 (Patente de Invención concedida con Examen Previo) mayo 06,2015.
- Andrade, C., Garcés, P., & Martínez, I. (2008). Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide. *Corrosion Science*, 50(10), 2959–2964. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.07.013>
- Andrade, C., Maribona, I. R., Feliu, S., González, J. A., & Feliu, S. (1992). The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements. *Corrosion Science*, 33(2), 237–249. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90148-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90148-V)
- Andrade, C., Martínez Sierra, I., Alonso, C., & Fullera, J. (2001). Nuevas técnicas avanzadas para la medida in situ de la corrosión en hormigón armado. *Materiales de Construcción*, 51(c), 97–107.
- Bertolini, L., Elsener, B., & Pedferri, P. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=cEmq232h1zcC>
- Gandía-Romero, J. M., Bataller, R., Monzón, P., Campos, I., García-Breijo, E., Valcuende, M., & Soto, J. (2016). Characterization of embeddable potentiometric thick-film sensors for monitoring chloride penetration in concrete. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 222, 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.07.056>
- Gandía Romero, J. M. (2014, December 22). Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/48516>

- Gulikers, W. (1996). Experimental investigations on macro cell corrosion in chloride-contaminated concrete, 41(2), 107–123.
- Hansson, C. M., Poursaee, A., & Laurent, A. (2006). Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 36(11), 2098–2102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.07.005>
- Hornbostel, K., Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2016). Influence of mortar resistivity on the rate-limiting step of chloride-induced macro-cell corrosion of reinforcing steel. *Corrosion Science*, 110, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.011>
- Ji, Y. S., Zhao, W., Zhou, M., Ma, H. R., & Zeng, P. (2013). Corrosion current distribution of macrocell and microcell of steel bar in concrete exposed to chloride environments. *Construction and Building Materials*, 47, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.003>
- Martínez, I., & Andrade, C. (2009). Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.007>
- Nasser, A., Clément, A., Laurens, S., & Castel, A. (2010). Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete. *Corrosion Science*, 52(9), 2878–2890. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.037>
- 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>
- 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. *Sensors*, 9(11), 8391–8398. <https://doi.org/10.3390/s91108391>
- Ramón, J. E., Gandía-Romero, J. M., Valcuende, M., & Bataller, R. (2016). Integrated sensor network for monitoring steel corrosion in concrete structures. *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 1(1), 65. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.5191>

Agradecimientos

A la Beca Predoctoral FPU (Formación de Profesorado Universitario) concedida a Jose Enrique Ramon Zamora (FPU13/00911) y Ana Martínez Ibernón (FPU16/00723) por el Ministerio de Ciencia e Innovación.