

SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS DE LAS LINEAS DE CORRIENTE DEL CORROSIMETRO PARA MEDIDA IN SITU CON ANILLO DE GUARDA MODULADO

C. Andrade¹, J. Sanchez¹, J. Fulla¹, R. Ben-Hamadou¹

¹Centro de Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CISDEM-IETcc-CSIC-UPM). C/ Serrano Galvache, 4. 28033 Madrid, España.

E-mail: andrade@ietcc.csic.es, javiersm@ietcc.csic.es, fulla@ietcc.csic.es

RESUMEN

La corrosión de las armaduras es la principal causa de deterioro de las estructuras de hormigón armado. La medida de su velocidad de corrosión es un parámetro fundamental para poder abordar el estudio de la seguridad estructural ya que la pérdida de sección del acero repercute directamente sobre la capacidad portante de la estructura. Los métodos que se utilizan para medir la velocidad de corrosión in situ pueden usar o no un anillo de guarda para confinar la corriente en un área concreta de la armadura. Este anillo debe modular la corriente para adaptarse a cada corriente que se inyecta con el contraelectrodo. Este es el principio de funcionamiento del corrosímetro Gecor.

En este trabajo se muestran los resultados de la simulación del funcionamiento del equipo de confinamiento de la corriente o “guard ring”. La medida de la velocidad de corrosión se realiza a través del método de la resistencia de polarización. Los resultados indican que las líneas de corriente pueden ser confinadas eficazmente y por tanto que el área a tomar como polarizada es la delimitada por el círculo virtual que pasa por el centro de los dos electrodos de control del campo eléctrico inyectado desde el anillo de guarda.

ABSTRACT

The corrosion of the steel bars is the main reason of deterioration of the reinforce concrete structures. The corrosion rate measurement is a fundamental parameter to be able to address the study of the structural safety since the rebar section loss has an effect on the load bearing capacity of the structure. For a correct determination is necessary to know the size of the polarized area of the bar. The modulated confinement implemented in GECOR in situ corrosimeter is based in measuring the corrosion rate with a guard ring that confines the current to a specific reinforcement area. This guard ring has to be modulated in the current it applies in order to confine that injected by the central counter-electrode to the desired bar surface.

In this work the simulation results of the “guard ring” operation are shown. The corrosion rate measure is carried out by the resistance of polarisation method. The results indicate that the lines of current injected by the central counter are effectively confined and therefore that the area to take as polarised is the delimited by the virtual circle that lies through the centre of the two reference electrodes or “electrical field controllers” placed between the central counter and the guard ring. When these two reference electrodes are not used the electrical current injected by the counter can be not effectively confined.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, Corrosión, medida in situ.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado tienen en general una buena durabilidad pero hay ambientes muy agresivos, como son los de tipo marino, que provocan la corrosión de las armaduras. En estos casos, el óxido que se forma es de carácter expansivo y fisura el recubrimiento. La corrosión supone una disminución de

la sección útil resistente y puede llegar a provocar el colapso de la estructura. Para su cuantificación es necesario conocer la velocidad de corrosión ya que este parámetro es el que permite predecir la evolución del daño en sus diferentes manifestaciones: pérdida de sección, adherencia acero/hormigón y fisuración del recubrimiento [1].

En el laboratorio se puede medir la velocidad de corrosión mediante la técnica de la Resistencia de Polarización, que consiste en la aplicación de un pequeño salto de potencial y el registro de la corriente que pasa. Esta técnica puede ser aplicada con corriente continua o alterna. En estructuras reales su aplicación exige conocer el área de trabajo o “área polarizada” y ello no es posible con los potenciómetros clásicos ya que este área depende del grado de corrosión y humedad del hormigón [2,3]. Para solventar el problema hay dos posibilidades: una medir la distancia que alcanza la corriente o confinarla a un espacio pre-determinado. La primera ha llevado al desarrollo del método de la “atenuación del potencial” [4] y el segundo al uso de un anillo de guarda que se coloca concéntrico con el contra-electrodo para confinar al corriente entre los dos [5,6]. Este método exige el control de la corriente que se aplica desde la guarda para estar seguros que se confina la corriente entre el central y el anillo. Esta necesidad ha dado lugar al método del “confinamiento modulado de la corriente”: Ambos métodos están introducidos en el corrosímetro portátil GECOR 08 [7].

En el presente trabajo se modela numéricamente el confinamiento modulado y se compara su funcionamiento con la no modulación, es decir viendo hasta donde se extiende la corriente cuando se aplica la misma corriente por el contra central y por el anillo que es el modo en el que opera el corrosímetro Galvapulse. Otros dos investigadores han modelado este problema si bien con métodos numéricos y objetivos diferentes [8-10].

2. METODOLOGÍA

Los cálculos teóricos se han realizado empleando el software COMSOL Multiphysics de elementos finitos. En este programa se encuentran integrados la creación de geometrías, el solver y el post-procesado. El COMSOL tiene la posibilidad de acoplar diferentes fenómenos o problemas físicos. En este estudio se ha empleado el módulo AC/DC que permite realizar simulaciones eléctricas y electromagnéticas. Dentro de éste se ha realizado un análisis electrostático, ya que para el estudio de la distribución de la corriente no se ha creído necesario en este paso preliminar incorporar la polarización que sufre la barra durante la medida. La modelización de los campos electrostáticos se realiza mediante el potencial eléctrico V a través de la combinación de la definición del potencial con la ley de Gauss y la ecuación de continuidad:

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

$$J = \sigma E + J^e \quad (2)$$

donde E es el campo eléctrico, J es la densidad de corriente, σ es la conductividad eléctrica y J^e es la densidad de corriente generada externamente.

La solución en condiciones estáticas de ambas ecuaciones es:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J^e) = Q_j \quad (3)$$

donde Q_j es la corriente externa.

La geometría empleada es un bloque de hormigón de 1000mm de lado y 500mm de profundidad con una barra de acero de 10 mm de diámetro y 1000mm de longitud situada a 100 mm de la superficie, es decir, para un recubrimiento de 100 mm. En la parte superior se sitúa los electrodos de medida, el contraelectrodo (58 mm de diámetro externo y 12 mm de diámetro interno) y el anillo de guarda (180 mm de diámetro externo y 140 mm de diámetro interno).

Debido a las condiciones de simetría, únicamente es necesario simular $\frac{1}{4}$ parte de la probeta. Existen dos planos de simetría, uno que corta la barra de forma perpendicular por la parte central de la misma y otro plan perpendicular al anterior y a los electrodos que corta a la barra longitudinalmente.

Por los electrodos se introduce la corriente mientras que la barra de refuerzo se conecta a tierra. Para el control de la corriente que se introduce por el anillo de guarda se dispone de dos electrodos situados entre el contraelectrodo y el anillo de guarda, de tal forma que la diferencia de potencial entre ambos debe de ser cero. En las simulaciones se ha fijado la corriente que se introduce por el contraelectrodo central, y se ha variado la corriente del anillo de guarda hasta alcanzar una diferencia de potencial cercana a cero entre los electrodos de control. La resistividad del hormigón es de $50 \Omega\text{m}$, mientras que la del acero es de $10^{-7} \Omega\text{m}$.

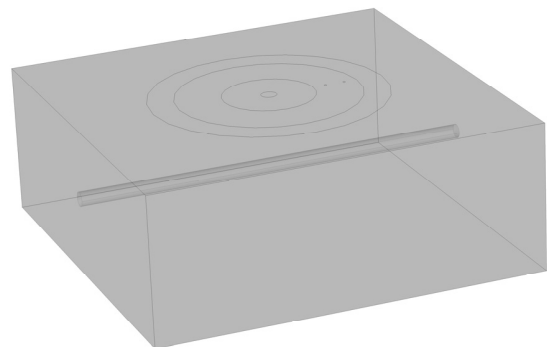


Figura 1. Esquema. Bloque de hormigón con una barra de acero y los electrodos (contraelectrodo y anillo de guarda) en la parte superior.

3. RESULTADOS

De acuerdo a lo mencionado en la metodología, en la siguiente figura se muestra el resultado obtenido cuando la diferencia entre los electrodos de control es cero. En dicha figura se muestran los campos de potencial y las

líneas de corriente, que son perpendiculares a dichos campos de acuerdo a la ley de Gauss. Las líneas de corriente que salen tanto del contraelectrodo como del electrodo de guarda llegan a la barra que se encuentra conectada a tierra en uno de sus extremos. De esta forma, el potencial de la barra siempre va a ser 0 V y la corriente va entrando a lo largo de toda la superficie lateral que se encuentra en contacto con el hormigón. Según las condiciones impuestas de aislamiento en las caras externas, toda la corriente que se introduce en los electrodos sale a través de la barra.

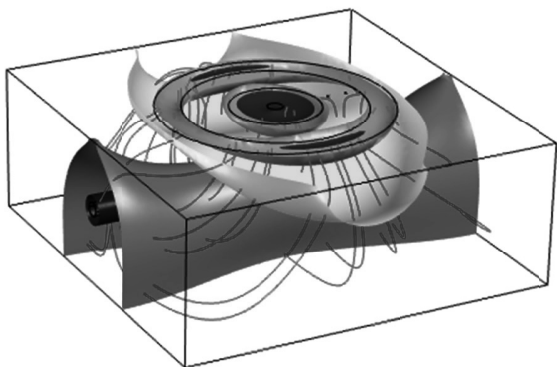


Figura 2. Campos equipotenciales y líneas de corriente.

Para mostrar el efecto del confinamiento, en primer lugar se muestran los resultados para el caso en el que se emplea un anillo de guarda pero sin modular el confinamiento de la corriente (figura 3) que es como opera el corrosímetro Galvapulse si bien este aparato usa otros tamaños de central y anillo. Para ver el comportamiento se ha introducido la misma intensidad por el anillo de guarda que por el contraelectrodo. En la figura 4 se muestra la intensidad acumulada que circula a partir del centro de la barra. Debido a las condiciones de simetría la otra mitad se comporta igual. Se ha leído la intensidad que circula por la barra en secciones a distintas distancias con respecto al centro de la barra.

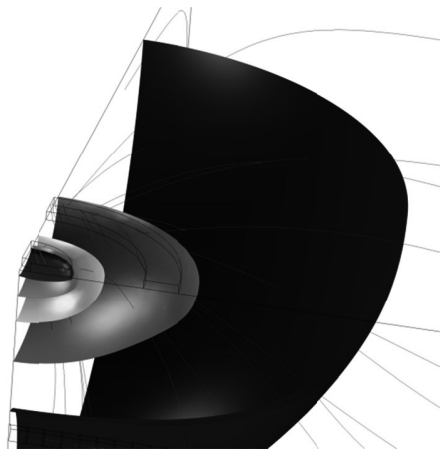


Figura 3. Campos equipotenciales y líneas de corriente para el caso de anillo de guarda sin confinamiento modulado.

La intensidad que circula por una sección es igual a la intensidad que circula por la sección anterior más la intensidad que se ha incorporado por la superficie lateral de la barra.

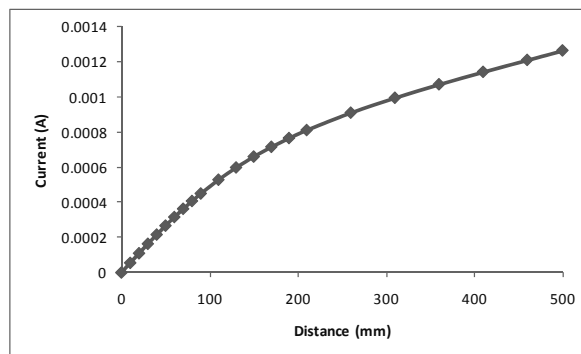


Figura 4. Corriente que circula por la barra sin confinamiento modulado.

En la figura 5 se muestra la polarización de la barra tanto por la parte que se encuentra enfrentada a los electrodos como la parte opuesta (la cara inferior en los esquemas). Como se puede observar en la figura, la polarización varía a lo largo de la barra y es diferente en la parte superior e inferior.

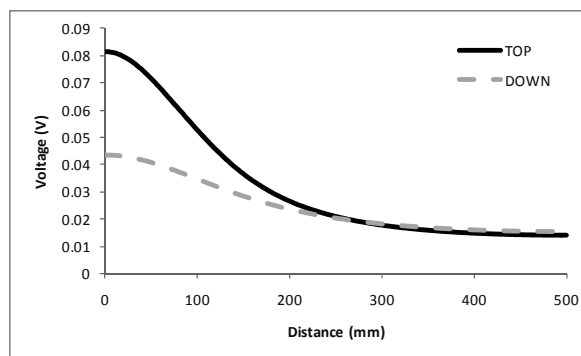


Figura 5. Polarización de la barra de acero sin confinamiento modulado.

En la figura 6 se ha marcado la distancia alcanzada por la corriente del central cuando el anillo inyecta la misma corriente, que en la figura es $I_{\text{contra}} = 6.14 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, la cual alcanza una longitud de polarización de aproximadamente $135 \cdot 2 \text{ mm}$ (según las condiciones de simetría), según se muestra en la siguiente figura, es decir, se polariza 135 mm a cada lado desde el centro de la barra, mucho más allá que la distancia delimitada por el anillo de guarda. Además, se puede observar que en el área que está debajo del contraelectrodo central, la polarización varía a largo de la barra, polarizándose más el centro que el exterior. Por tanto el corrosímetro Galvapulse no confina adecuadamente la corriente y al utilizar como superficie para los cálculos, la del contra central, aporta valores de la I_{corr} muy superiores al real ya que utiliza un área mucho más pequeña que la realmente polarizada.

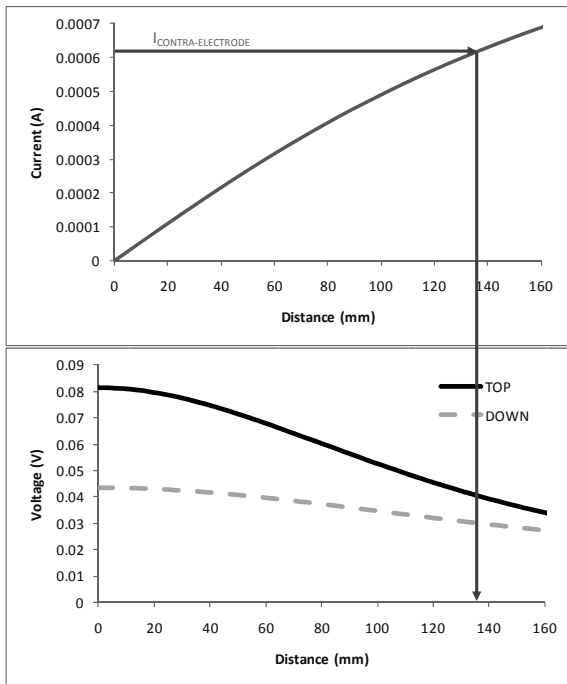


Figura 6. Polarización inducida por el contra electrodo sin confinamiento modulado.

Sin embargo, el corrosímetro Gecor actúa a través de dos electrodos de referencia situados entre el contra electrodo central y el anillo de guarda (figura 7), confinando la corriente debajo del círculo virtual que pasa entre ambos electrodos de referencia, mediante la aplicación desde el anillo de tanta corriente como sea necesario para conseguirlo. Para ello se ajustan las intensidades para que la diferencia de potencial entre estos dos electrodos de referencia sea cero, obteniéndose:

$$I_{\text{contra}} = 1.64 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_{\text{guarda}} = 3.96 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

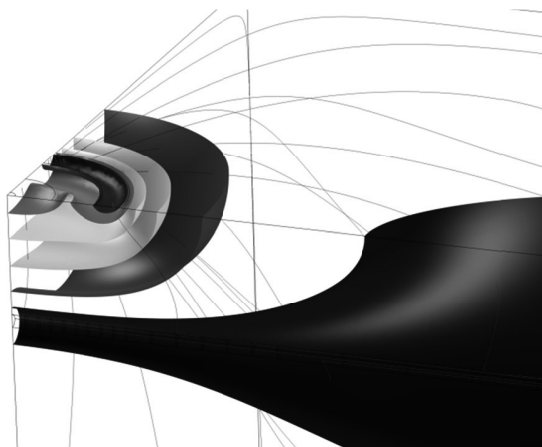


Figura 7. Campos equipotenciales y líneas de corriente para el caso de anillo de guarda sin confinamiento modulado.

Como en el caso anterior, en la figura 8 se muestra la corriente que circula por la barra en diferentes secciones respecto al centro de la misma. Y en la figura 9 se muestra la polarización que se induce en la barra por el lado superior y por el lado opuesto a los electrodos.

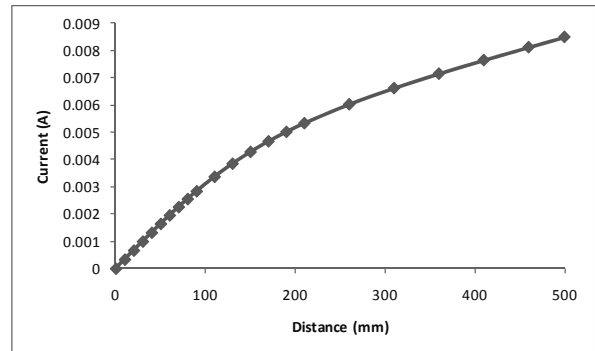


Figura 8. Corriente que circula por la barra con confinamiento modulado.

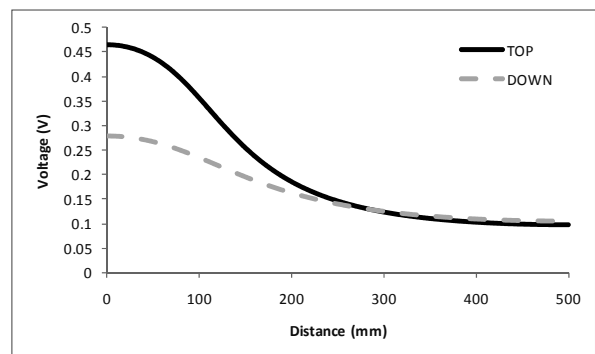


Figura 9. Polarización de la barra de acero con confinamiento modulado.

En la figura 10 se puede observar que cuando se modula la corriente introducida por el contraelectrodo:

- i) la distancia de influencia del contraelectrodo es de $\sim 51 \cdot 2$ mm, sensiblemente menor que en los casos anteriores, y coincidente con el radio del círculo virtual, es decir, confinado la corriente hasta debajo de los dos electrodos de referencia,
- ii) la polarización de la barra es uniforme en esta área, tanto por la parte superior como por la inferior de la barra.

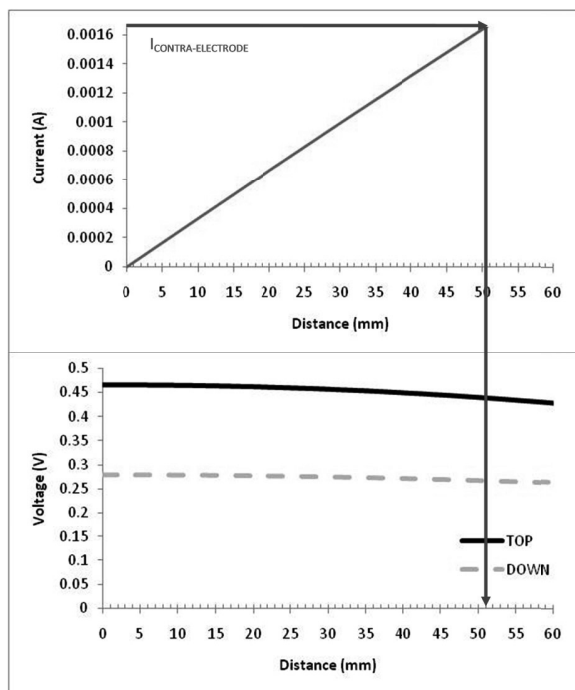


Figura 10. Polarización inducida por el contra electrodo con confinamiento modulado.

4. DISCUSIÓN

Para determinar la velocidad de corrosión en estructuras reales es necesario o calcular el área de armadura que es realmente polarizada o confinar la corriente en una zona predeterminada. Este confinamiento se realiza colocando un anillo de guarda alrededor del contra central. El confinamiento modulado consiste en aplicar una corriente con el anillo de guarda que obligue a la corriente del central a quedar confinada en el círculo virtual que pasa por el centro de la distancia entre los dos electrodos de referencia situados entre el contra y la guarda.

Como puede deducirse de los ejercicios realizados sobre lo que se dispersa la corriente cuando no hay anillo de guarda, la distancia depende de la resistividad del hormigón, es decir, de su contenido en humedad. Por ello no es posible aplicar siempre la misma proporción de corriente “central/anillo” sino que hay que modular el anillo para cada corriente que se aplique desde el central.

El cálculo realizado muestra que este confinamiento modulado es claramente eficaz y la distancia que alcanza la corriente (~51 mm en el ejemplo de la figura 10) es casi igual que la teórica de 52,5 mm. Sin embargo si no existen estos dos electrodos y se aplica la misma corriente por el anillo de guarda que por el central, entonces no hay un buen confinamiento y la corriente llega hasta los 135 mm en la figura 6, lo que significa que se polariza mucha más superficie de barra que la que está debajo del círculo virtual. Al usar un

valor del área menor que la polarizada el valor de la R_p saldrá menor y por tanto, la I_{corr} mayor. El error puede ser de uno a dos órdenes de magnitud lo que hace erróneas las medidas sin confinamiento modulado.

Por otra parte, se ha explorado como se distribuye la polarización en la zona polarizada. En este trabajo se muestra que el confinamiento modulado produce una polarización uniforme de la barra, prácticamente constante en toda la longitud de influencia del contraelectrodo (figuras 7 y 10). Sin embargo, si no se modula dicho confinamiento, se produce una diferencia de polarización entre la parte central de la barra y la parte externa que puede llegar al 50% (figuras 3 y 6).

5. CONCLUSIONES

Para medir la velocidad de corrosión en estructuras reales es necesario utilizar el confinamiento modulado de la corriente para ajustar la distancia que alcanza la corriente al área predeterminada. Para ello es necesario usar electrodos de control del campo eléctrico y modular la corriente inyectada por el anillo de guarda. Si no se colocan estos electrodos y no se modula el anillo, la corriente puede llegar a áreas muy superiores, lo que lleva a graves errores en la medida de la velocidad de corrosión que resulta superior a la verdadera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación concedida en los proyectos BIA2010-18863, y el CONSOLIDER-SEDUREC.

REFERENCIAS

- [1] Andrade, C. and I. Martinez, *Use of indices to assess the performance of existing and repaired concrete structures*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(9): p. 3012-3019.
- [2] Feliu, S., J.A. Gonzalez, and C. Andrade, *Electrochemical methods for on-site determinations of corrosion rates of rebars*, in *Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures*, N.S. Berke, et al., Editors. 1996. p. 107-118.
- [3] Andrade, C., et al., *On-site measurement of the corrosion rate*. Recent Advances in Bridge Engineering - Evaluation, Management and Repair, ed. J.R. Casas, F.W. Klaiber, and A.R. Mari. 1996. 352-366.
- [4] Feliu, S., J.A. Gonzalez, and C. Andrade, *Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures*. Journal of Applied Electrochemistry, 1996. **26**(3): p. 305-309.

- [5] Feliu, S., et al., *possibilities of the guard ring for electrical signal confinement in the polarization measurements of reinforcements*. Corrosion, 1990. **46**(12): p. 1015-1020.
- [6] Feliu, S., et al., *errors introduced by the guard ring device in the on-site measurement of rebar corrosion rates*. Corrosion of Reinforcement in Concrete, ed. C.L. Page, K.W.J. Treadaway, and P.B. Bamforth. 1990. 293-302.
- [7] <http://ndtjames-old.com/catalog/corrosionTesting/gecor8.html>
- [8] Kranc, S.C. and A.A. Sagues, *Polarization Current Distribution and Electrochemical Impedance Response of Reinforced-Concrete When Using Guard Ring Electrodes*. Electrochimica Acta, 1993. **38**(14): p. 2055-2061.
- [9] Wojtas, H., *Determination of corrosion rate of reinforcement with a modulated guard ring electrode; analysis of errors due to lateral current distribution*. Corrosion Science, 2004. **46**(7): p. 1621-1632.
- [10] Wojtas, H., *Determination of polarization resistance of reinforcement with a sensorized guard ring: Analysis of errors*. Corrosion, 2004. **60**(4): p. 414-420.