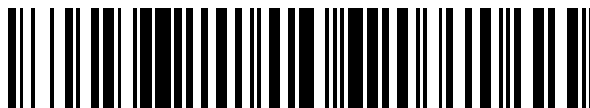


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 917 622**

21 Número de solicitud: 202130009

51 Int. Cl.:

G01N 17/02 (2006.01)

G01N 17/04 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

11.01.2021

43 Fecha de publicación de la solicitud:

11.07.2022

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

11.10.2022

Fecha de concesión:

08.02.2023

45 Fecha de publicación de la concesión:

15.02.2023

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (100.0%)**

**C/ Serrano, nº 117
28006 Madrid (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**MARTÍNEZ SIERRA, Isabel Mª y
RAMÓN ZAMORA, José Enrique**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **MÉTODO Y SENSOR DE MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO**

57 Resumen:

Método de medida de velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado con una fase de preparación y una fase de medida que comprenden: aplicar un pulso de corriente de 1 segundo entre la armadura y dos contraelectrodos, interno y externo; verificar que ΔV_{ss} en dos electrodos interiores es opuesto; verificar que K_{XCE} y K_{CE} están en un rango admitido; aplicar pulsos cortos, duplicando I_{CE} hasta una polarización mínima de 5 mV; aumentar I_{CE} para determinar un I_1 para una polarización próxima a 20 mV; aplicar durante 10 segundos I_1 entre la armadura y el contraelectrodo interno; interrumpir la corriente 200 microsegundos; determinar la polarización efectiva (E_{POL}) y optimizar el valor de I_{CE} para $10 \leq E_{POL} \leq 20$ mV, incrementando o reduciendo I_{CE} un 5%; determinar E_{POL} repetidamente ajustando I_{CE} , para obtener un I_2 de polarización óptima; aplicar I_2 , interrumpir la corriente y determinar el valor definitivo de E_{POL} .

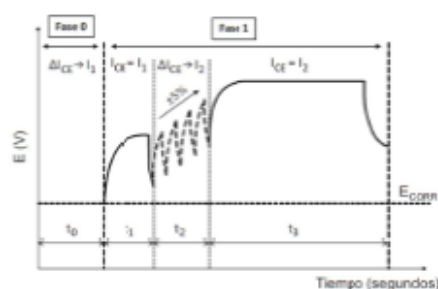


FIG. 3

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 917 622 B2

DESCRIPCIÓN

MÉTODO Y SENSOR DE MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO

5

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un método y un sensor de medida de la velocidad de corrosión en hormigón armado que permite conocer dicha velocidad de forma precisa aplicando con fiabilidad el método de la resistencia a la polarización in situ, y evitando una polarización excesiva e irreversible de las armaduras.

Un objeto de la presente invención es el método de medida de la velocidad de corrosión que permite un correcto control y regulación de la corriente aplicada en el método de la resistencia a la polarización.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El hormigón armado es uno de los materiales más utilizados a la hora de construir estructuras por sus buenas prestaciones en cuestión de durabilidad y esfuerzos mecánicos. Sin embargo, la corrosión de las armaduras es una de las causas principales que merman la esperanza de vida de las estructuras de hormigón armado.

Con el fin de atajar esta problemática, el Código Estructural obliga a incluir en el proyecto un plan de inspección y mantenimiento que asegure que el nivel de prestaciones de la estructura no disminuya durante su vida útil por debajo de unos mínimos. En esta estrategia de mantenimiento deben incluirse inspecciones técnicas periódicas para evaluar el estado de la estructura y detectar con antelación cualquier riesgo de patología.

Sin duda, una de las estrategias de inspección de mayor interés es la realización de mapeos de velocidad de corrosión de las armaduras, dado que este parámetro permite la cuantificación del proceso corrosivo de forma no destructiva. Para realizar esta tarea se recurre al uso de corrosímetros portátiles, basados en la aplicación de técnicas electroquímicas.

Uno de los métodos más utilizados para la cuantificación de la velocidad de corrosión in situ es el basado en un sistema de medida por pulso galvanostático mediante confinamiento sensorizado de la señal aplicada.

- 5 Este dispositivo se basa en el método de la resistencia a la polarización lineal, R_p , propuesto por Stern y Geary. En este caso, se utiliza un único pulso de corriente (ΔI) para tratar de provocar una polarización (ΔV) baja (10-20 mV) a la armadura en torno a su potencial de corrosión (E_{CORR}). De esta forma, el valor de R_p se obtiene del cociente

$$R_p = \frac{E_{POL}}{\Delta I}$$

- 10 donde E_{POL} es la polarización efectiva registrada en la respuesta potencial-tiempo del sistema acero-hormigón, es decir, el potencial de la armadura una vez descontado el efecto de la caída óhmica (ΔE_Ω) de la máxima polarización alcanzada (E_{MAX}):

$$\Delta E_\Omega = \Delta I \times R_\Omega$$

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_\Omega$$

- 15 Siendo R_Ω la resistencia eléctrica del hormigón.

- La Figura 1 muestra un ejemplo de la respuesta potencial-tiempo de un sistema acero-hormigón cuando se aplica una corriente de polarización durante un tiempo predeterminado y se corta dicha corriente, produciéndose la caída óhmica y la
20 disminución del voltaje de polarización efectiva.

- La Figura 2 muestra un sistema de confinamiento sensorizado del estado del arte, el cual comprende un contraelectrodo anular interno y un contraelectrodo anular externo. El objetivo del sistema de confinamiento es delimitar el campo eléctrico generado entre
25 la armadura y el contraelectrodo anular interno al aplicar un pulso de corriente I_{CE} . Esto se consigue aplicando una contracorriente I_{XCE} entre la armadura y un contraelectrodo externo anular. El valor de I_{XCE} se regula durante la medida para que el límite del área confinada se sitúe entre el contraelectrodo externo e interno. Esta operación de ajuste se realiza mediante la medida de una diferencia de potencial (ΔV_{SS}) entre dos electrodos
30 de Cu/Cu₂SO₄ ubicados entre ambos contraelectrodos, teniendo en cuenta que el confinamiento se considera óptimo cuando $\Delta V_{SS} \approx 0$ mV.

La velocidad de corrosión, expresada como densidad de corrosión (i_{CORR}), resulta de aplicar:

$$i_{CORR} = \frac{B}{R_p \times S}$$

La constante B puede adoptar valores, según bibliografía, entre 13 y 52 mV según se trate de estructuras con armaduras activas o pasivas, respectivamente, aunque en sistemas desconocidos se considera un valor promedio de 0,026 V. Por otro lado, S es el área de acero sobre la que se efectúa la medida, cuyo valor se corresponde con la superficie lateral de armadura situada bajo el sistema de confinamiento, en un área proyectada de diámetro igual al diámetro de la circunferencia que pasa por la mediatriz entre los electrodos Cu/Cu₂SO₄ para el control de V_{ss} de la Figura 2.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La invención se refiere a un método de medida dinámico (DIN) o de polarización controlada. La invención se basa, por un lado, en la aplicación de pulsos galvanostáticos modificados, ajustando de manera dinámica la corriente aplicada por un contraelectrodo interno para el desarrollo de la medida con control real de la polarización, de modo que, la polarización de la armadura embebida en el interior de una estructura se produce en unos niveles adecuados, tanto para aplicar con fiabilidad el método de la resistencia a la polarización in situ, como para evitar una polarización excesiva e irreversible de las armaduras.

Por otro lado, se incluye un sistema de control adicional de la corriente aplicada en un contraelectrodo externo para evitar las situaciones de no confinamiento recurrentes que acontecen con la utilización de los métodos del estado de la técnica.

En el método de la invención, la medida de la densidad de corrosión (i_{CORR}) se basa en el método de la resistencia a la polarización lineal, el cual sólo es aplicable de forma fiable si la polarización efectiva (E_{POL}) de la armadura se sitúa entre 10 y 20 mV. Una polarización demasiado elevada podría causar daños irreversibles en la armadura embebida, mientras que una polarización menor conduce a errores considerables en el valor de la densidad de corrosión calculada. En consecuencia, el valor de I_{CE} debe adecuarse según el tipo de sistema acero-hormigón estudiado.

Por ello, el método de la invención se desarrolla como una mejora de los métodos de medida del estado de la técnica, en particular, el método definido en la patente

ES2024268 (en lo sucesivo método EST) para la regulación y control del valor de I_{CE} , con el fin de garantizar una polarización adecuada de la armadura embebida en la estructura.

- 5 El método propuesto, referido en lo sucesivo como método DIN, se aplica en estructuras de hormigón armado, para evaluar el estado de la armadura embebida. El método de la invención comprende una fase de preparación y una fase de medida.

10 En la fase de preparación, se comprueba la respuesta del sensor y se establecen los parámetros de partida para la siguiente fase de medida. La fase de preparación comprende las etapas de aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo interno (I_{CE}) y, a continuación, aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo externo (I_{XCE}).

15 Seguidamente, se mide en cada caso el valor de diferencia de potencial (ΔV_{SS}) entre unos electrodos, preferiblemente de Cu_2SO_4 , situados a ambos lados de una línea media entre los contraelectrodos interno y externo, y se verifica que su signo es opuesto, es decir que ΔV_{SS_CE} (medido al aplicar I_{CE}) es igual a $-\Delta V_{SS_XCE}$ (medido al aplicar I_{XCE}).

20 También, se verifica que los factores K_{XCE} y K_{CE} se encuentran dentro de un rango de valores admisible, el cual se obtiene mediante calibraciones previas. K_{XCE} y K_{CE} quedan definidos como:

$$K_{XCE} = \frac{\Delta V_{SS_XCE}}{I_{CE}}$$

$$K_{CE} = \frac{\Delta V_{SS_CE}}{I_{CE}}$$

25 A continuación, se aplican un conjunto de pulsos cortos en los que se va duplicando sucesivamente la corriente I_{CE} hasta conseguir una polarización efectiva (E_{POL}) entre la armadura y un electrodo de referencia situado en el centro de los contraelectrodos interno y externo de al menos 5 mV.

30 Entonces, la corriente resultante (I_{CE}) se aumenta proporcionalmente para determinar la corriente óptima que debe aplicarse (I_1) para conseguir una polarización E_{POL} próxima a 20 mV.

En la fase de medida, se realiza la medida de corrosión, incluyendo además una etapa de regulación de la corriente aplicada para asegurar una adecuada polarización E_{POL} de la armadura.

- 5 La fase de medida comprende las etapas de: aplicar una corriente $I_{CE} = I_1$ durante 10 segundos. Entonces, se interrumpe la corriente durante 200 microsegundos y se determina la polarización efectiva (E_{POL}). Para ello, se define E_{POL} como la polarización efectiva registrada en la respuesta potencial-tiempo del sistema acero-hormigón, es decir, el potencial aplicado a la armadura una vez descontado el efecto de la caída
- 10 óhmica (ΔE_{Ω}) de la máxima polarización alcanzada (E_{MAX}) entre la armadura y el electrodo de referencia:

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

- 15 A continuación, se realiza una optimización del valor de I_{CE} para conseguir que $10 \leq E_{POL} \leq 20$ mV. Para ello, el valor de I_{CE} se incrementa (si $E_{POL} < 10$ mV) o reduce si ($E_{POL} > 20$ mV) en un 5%.

- 20 Cada segundo, se determina de nuevo E_{POL} mediante el proceso descrito anteriormente y se vuelve a ajustar el valor de I_{CE} . Este proceso se realiza de forma repetida durante un periodo de 15 segundos, el cual se considera lo suficientemente largo para conseguir un valor de corriente (I_2) adecuado para que $10 \leq E_{POL} \leq 20$ mV.

- 25 Tras dicho periodo de optimización de la corriente, se mantiene $I_{CE} = I_2$ durante el resto del tiempo de polarización, momento en el que finalmente se interrumpe el pulso y se obtiene el valor definitivo de E_{POL} .

- 30 Durante todo el proceso de medida el valor de I_{XCE} se va variando para garantizar que $\Delta V_{SS} \approx 0$ mV. Para ello, durante la optimización de la corriente, la I_{XCE} se incrementa o disminuye en el mismo porcentaje que I_{CE} . Además, para evitar situaciones de confinamiento inadecuado se impone en todo momento que $I_{XCE} \geq I_{CE}$.

A continuación, se calcula la resistencia a la polarización (R_p) mediante la expresión:

$$R_p = \frac{E_{POL}}{I_2}$$

- 35 y seguidamente se calcula la densidad de corrosión (i_{CORR}) como:

$$i_{CORR} = \frac{0.026}{(R_p \times S)} \times 10^6$$

Donde S es el área de acero sobre la que se efectúa la medida, cuyo valor se corresponde con la superficie lateral de armadura situada bajo el sistema de confinamiento, en un área proyectada de diámetro igual al de la circunferencia que pasa por la mediatriz entre los electrodos Cu/Cu₂SO₄ para el control de V_{SS} de la Figura 2.

También se puede calcular la resistencia óhmica (R_Ω) entre el contraelectrodo interno y la armadura:

$$R_\Omega = \frac{(E_{MAX} - E_{POL})}{I_2}$$

El método DIN incorpora como novedad respecto al anterior método EST, un control del balance de corrientes que garantiza que $I_{XCE} \geq I_{CE}$. El anterior método EST no limitaba este hecho, lo que producía un elevado porcentaje de medidas erróneas debido al incorrecto confinamiento que se produce al permitir un descenso incontrolado en el valor de I_{XCE} .

Se propone así un método fiable y no destructivo para la medida de la velocidad de corrosión in situ en hormigón armado. Su principal ventaja reside en la inclusión de un protocolo de regulación y control de la corriente aplicada. De esta forma, la polarización de la armadura se produce en unos niveles adecuados, tanto para aplicar con fiabilidad el método de la resistencia a la polarización, como para evitar una polarización excesiva e irreversible de las armaduras.

El método DIN presenta ventajas tanto para la inspección periódica como para la monitorización en continuo del estado de las estructuras.

La invención también se refiere a un sensor para la medida simultánea de la velocidad de corrosión de la armadura y la resistividad eléctrica del hormigón.

Un ejemplo de realización de un sensor para medida de la velocidad de corrosión comprende: un electrodo de referencia central y dos electrodos conectados a un aparato de medida; y dos contraelectrodos, un contraelectrodo interno y un contraelectrodo externo, conectados a fuentes de alimentación de corriente.

El aparato de medida comprende una fuente de tensión continua, controlada mediante un convertidor D/A, con conversores de tensión/corriente, que permiten rangos crecientes de intensidad continua de polarización, alimentados por un juego de baterías recargables mediante alimentación exterior. La unidad de procesamiento controla los convertidores D/A que a su vez dan lugar a las fuentes de tensión controlada y a los circuitos potencioestáticos que se conectan a través de un conector para el galvanostato y un conector para el potencioestado.

Asimismo, comprende una unidad de procesamiento configurada para llevar a cabo las fases y etapas del método de la invención. La unidad de procesamiento puede estar conectada a un display y una unidad de entrada de datos.

El sensor descrito comprende electrodos de material no polarizable, preferiblemente de titanio o acero inoxidable, en lugar de electrodos de $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{SO}_4$, los cuales se describen en la patente ES2024268. El sensor descrito en ES2024268 está diseñado para la inspección in situ de estructuras, es decir, para ser implementado por un operario de forma periódica y puntual sobre la superficie de hormigón de los distintos puntos de la estructura a evaluar. Así, se realizan las tareas de mantenimiento del sensor antes de cada inspección con total garantía, especialmente la revisión de los dos electrodos de $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{SO}_4$ empleados para la medida y control de ΔV_{SS} .

Los electrodos de titanio o acero inoxidable, por su parte, son más económicos, más duraderos y más fiables debido a que no requieren de mantenimiento. Al usar electrodos de titanio o acero inoxidable, el sensor de la invención puede ser implementado de forma fiable para la monitorización en continuo y a largo plazo de estructuras, permitiendo la instalación permanente del sensor en superficie e incluso embebido en estructuras de nueva ejecución. Esto permitiría optimizar las operaciones de inspección y control de estructuras.

Asimismo, el sensor de la invención puede usarse al mismo tiempo para determinar la resistividad del hormigón por el método de disco-barra infinita. La resistividad del hormigón es un parámetro de gran interés a la hora de interpretar los parámetros de corrosión registrados por el sensor.

Para ello, tras aplicar la fase de medida de corrosión descrita anteriormente, se realizaría una medida de la resistencia eléctrica entre el contraelectrodo interior del sensor y la armadura. El valor de la resistividad (ρ) se obtiene aplicando la fórmula:

$$\rho = K \times R$$

siendo K una constante cuyo valor depende del recubrimiento de hormigón, del diámetro de la barra y del diámetro del contraelectrodo interno.

El sensor descrito en ES2024268 hacía necesario un sensor adicional para determinar la resistividad. El sensor de la invención supone, por tanto, una simplificación tecnológica que hace más eficiente la monitorización de estructuras.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Respuesta potencial-tiempo de un sistema acero-hormigón al que se le aplica un pulso galvanostático anódico. En la interrupción final de la corriente se determina la caída óhmica (ΔE_{Ω}) y la polarización efectiva (E_{POL}).

Figura 2. Esquema del sensor del estado del arte para medir in situ la velocidad de corrosión de las armaduras: a) Vista inferior donde se representa el electrodo de referencia (RE), el contraelectrodo externo (XCE), el contraelectrodo interno (CE), los electrodos S1 y S2 para el control del área confinada a través de la medida ΔV_{SS} y la línea LM que define el área de polarización efectiva durante la medida. b) Vista en sección dónde se representa el área de polarización efectiva conseguida durante la medida mediante al sistema de confinamiento.

Figura 3.- Esquema del método galvanostático de polarización controlada (método DIN) de la invención. Se utiliza un gráfico esquemático de la respuesta potencial-tiempo

registrada en la medida para representar la secuencia de los distintos procesos implicados.

Figura 4.- Comparativa entre el método dinámico (DIN) que se reivindica y el método estándar (EST) del estado del arte: Corriente aplicada (I_{CE}) y polarización efectiva (E_{POL}) en armaduras activas (A) y pasivas (P).

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un método de medida de la velocidad de corrosión en hormigón armado.

La Figura 1 muestra un ejemplo de la respuesta potencial en función del tiempo de una estructura de hormigón armado al que se le aplica un pulso galvanostático anódico, para provocar una polarización baja, tras lo cual se interrumpe la corriente. En ese momento, se determina la caída óhmica (ΔE_{Ω}) y la polarización efectiva (E_{POL}) de la armadura. El valor de E_{POL} se determina descontando ΔE_{Ω} de la máxima polarización alcanzada (E_{MAX}):

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

La Figura 2 muestra una vista inferior y en sección del sensor del estado del arte que permite medir in situ la velocidad de corrosión de las armaduras. El sensor del estado de la técnica comprende un electrodo de referencia central (RE), dos electrodos de titanio (3, 4) y dos contraelectrodos (1, 2) en forma de anillo, un contraelectrodo interno (1) y un contraelectrodo externo (2). Los contraelectrodos (1, 2) están colocados concéntricamente. Los electrodos (3, 4) están colocados en lados opuestos de una línea media (5) entre ambos contraelectrodos (1, 2).

La Figura 3 muestra un gráfico esquemático de la respuesta potencial en función del tiempo del método galvanostático de polarización controlada (método DIN) de la invención. El método mostrado en la Figura 3 comprende las fases de preparación y medida.

La fase de preparación comprende las etapas de:

- aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo interno (1) (I_{CE}), que se corresponde con el tiempo t_0 de la Figura 3;
 - simultáneamente registrar la diferencia de potencial (ΔV_{SS_CE}) entre dos electrodos (3, 4) (S1 y S2), situados a ambos lados de una línea media (5) entre los contraelectrodos interno (1) y externo (2);
 - aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo externo (2) (I_{XCE});
 - simultáneamente registrar la diferencia de potencial (ΔV_{SS_XCE}) entre dos electrodos (3, 4) (S1 y S2), situados a ambos lados de una línea media (5) entre los contraelectrodos interno (1) y externo (2);
 - verificar que el valor de diferencia de potencial (ΔV_{SS}) entre dos electrodos (3, 4) (S1 y S2), situados a ambos lados de una línea media (5) entre los contraelectrodos interno (1) y externo (2), es opuesto, es decir que $\Delta V_{SS_CE} \approx -\Delta V_{SS_XCE}$;
 - verificar que los factores de confinamiento K_{XCE} y K_{CE} se encuentran dentro de un rango de valores admitido, obtenido mediante calibraciones previas; donde:
- $$K_{XCE} = \frac{\Delta V_{SS_XCE}}{I_{CE}}$$
- $$K_{CE} = \frac{\Delta V_{SS_CE}}{I_{CE}}$$
- aplicar un conjunto de pulsos cortos, duplicando sucesivamente la corriente I_{CE} hasta conseguir una polarización E_{POL} entre la armadura y el electrodo de referencia situado en el centro de los contraelectrodos interno y externo de 5 mV;
 - aumentar proporcionalmente la corriente resultante (I_{CE}) para determinar la corriente óptima que debe aplicarse (I_1) para conseguir una polarización próxima a 20 mV, que se corresponde con el tiempo t_1 de la Figura 3;

La fase de medida comprende las etapas de:

- aplicar una corriente entre la armadura y el contraelectrodo interno (1) (I_{CE}) de valor I_1 durante 10 segundos;
- interrumpir la corriente durante 200 microsegundos;

- determinar la polarización efectiva (E_{POL}), determinando la máxima polarización alcanzada entre la armadura y el electrodo de referencia (E_{MAX}) y descontándole el efecto de la caída óhmica (ΔE_{Ω}):

5

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

10

- optimizar el valor de I_{CE} para conseguir un valor óptimo de E_{POL} , incrementando el valor de I_{CE} un 5% si $E_{POL} < 10$ mV o reduciéndolo un 5% si $E_{POL} > 20$ mV;
- determinar, durante un periodo de 15 segundos, E_{POL} repetidamente cada un segundo, y volver a ajustar en cada repetición el valor de I_{CE} , obteniendo un valor de corriente (I_2) adecuado para conseguir una polarización óptima;
- aplicar una corriente entre la armadura y el contraelectrodo interno (1) (I_{CE}) de valor I_2 durante un tiempo de polarización, que se corresponde con el tiempo t_2 de la Figura 3,

15

- interrumpir la corriente;
- determinar el valor definitivo de la polarización efectiva (E_{POL}), determinando la máxima polarización alcanzada en la armadura (E_{MAX}) y descontándole el efecto de la caída óhmica (ΔE_{Ω}), que se corresponde con el tiempo t_3 de la Figura 3, donde:

20

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

En todo el proceso, el valor de I_{XCE} se va variando para garantizar que $\Delta V_{SS} \approx 0$ mV, incrementando o disminuye su valor en el mismo porcentaje que I_{CE} .

25

El método de la invención también comprende la etapa de calcular la resistencia óhmica (R_{Ω}) entre el contraelectrodo interno (1) y la armadura, mediante la fórmula:

$$R_{\Omega} = (E_{MAX} - E_{POL}) / I_2$$

30

También de calcular la resistencia a la polarización (R_P), mediante la fórmula:

$$R_P = E_{POL} / I_2$$

Y calcular la densidad de corrosión (i_{CORR}), mediante la fórmula:

$$i_{CORR} = 10^6 \times 0.026 / (R_P \times S)$$

35

La Figura 4 muestra una comparativa entre el método dinámico (DIN) de la invención y el método estándar (EST) descrito en el estado del arte.

5 La Figura 4 muestra la corriente aplicada (I_{CE}) y la polarización efectiva (E_{POL}) en armaduras activas (A) y pasivas (P).

Para validar el método de la invención se realizaron una serie de medidas sobre diferentes armaduras en estado activo y en estado pasivo. La Figura 4 compara los valores de la corriente aplicada (I_{CE}) y la polarización efectiva provocada (E_{POL}) con el método de la invención (DIN) frente a los obtenidos con el método descrito en ES2024268 (EST) o método de polarización no-controlada.

15 Se observa cómo con el método EST solamente se consiguen valores de E_{POL} próximos a 20 mV en las muestras activas. En las muestras pasivas, el método EST no consigue disminuir suficientemente el valor de I_{CE} , por lo que se produce una alta polarización de las armaduras, las cuales deben permanecer tras la medida un largo periodo en reposo para retornar a su valor inicial de potencial (E_{CORR}). Esto supondría que la medida de corrosión en armaduras pasivas sería semi-destructiva con el método EST.

20 Por el contrario, con el método de la invención o método DIN la polarización se mantiene en todos los casos próxima a los 20 mV, para lo cual en las muestras pasivas el valor de I_{CE} se consigue reducir considerablemente respecto a las muestras activas.

25 Por tanto, con el método DIN se elimina cualquier riesgo de perturbar las armaduras en la medida de corrosión, por lo que puede considerarse un método verdaderamente no-destructivo, que además evita errores en la medida que se producen de manera habitual con el método EST.

REIVINDICACIONES

1. Método de medida de la velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado, que comprende una armadura embebida en su interior, que comprende una fase de preparación y una fase de medida, donde la fase de preparación comprende las etapas de:
 - aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo interno (1) (I_{CE}), con forma anular;
 - simultáneamente registrar la diferencia de potencial (ΔV_{SS_CE}) entre dos electrodos (3) situados, respectivamente, entre el contraelectrodo interno (1) y una línea media (5) entre los contraelectrodos interno (1) y externo (2) y entre el contraelectrodo externo (2) y la línea media (5);
 - aplicar un pulso de corriente de aproximadamente 1 segundo entre la armadura y un contraelectrodo externo (2) (I_{XCE}), con forma anular y situado de forma coaxial al contraelectrodo interno (1) (I_{CE});
 - simultáneamente registrar la diferencia de potencial (ΔV_{SS_XCE}) entre dos electrodos (3, 4) situados, respectivamente, entre el contraelectrodo interno (1) y una línea media (5) entre los contraelectrodos interno (1) y externo (2) y entre el contraelectrodo externo (2) y la línea media (5)
 - verificar que $\Delta V_{SS_CE} \approx -\Delta V_{SS_XCE}$;
 - verificar que los factores de confinamiento K_{XCE} y K_{CE} se encuentran dentro de un rango de valores admitido, obtenido mediante calibraciones previas; donde:

$$K_{XCE} = \frac{\Delta V_{SS_XCE}}{I_{CE}}$$

$$K_{CE} = \frac{\Delta V_{SS_CE}}{I_{CE}}$$
 - aplicar un conjunto de pulsos cortos, duplicando sucesivamente la corriente I_{CE} hasta conseguir una polarización E_{POL} entre la armadura y un electrodo de referencia, situado en el centro de los contraelectrodos interno y externo, de 5 mV;
 - aumentar proporcionalmente la corriente resultante (I_{CE}) para determinar la corriente óptima que debe aplicarse (I_1) para conseguir una polarización E_{POL} próxima a 20 mV;

y la fase de medida comprende las etapas de:

- aplicar una corriente entre la armadura y el contraelectrodo interno (1) (I_{CE}) de valor I_1 durante 10 segundos;
- interrumpir la corriente durante 200 microsegundos;
- determinar la polarización efectiva (E_{POL}), determinando la máxima polarización alcanzada entre la armadura y el electrodo de referencia (E_{MAX}) debido a la corriente aplicada I_{CE} y descontándole el efecto de la caída óhmica (ΔE_{Ω}):

5

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

10

- optimizar el valor de I_{CE} para conseguir un valor óptimo de E_{POL} , incrementando el valor de I_{CE} un 5% si $E_{POL} < 10$ mV o reduciéndolo un 5% si $E_{POL} > 20$ mV;
- determinar, durante un periodo de 15 segundos, E_{POL} repetidamente cada un segundo, y volver a ajustar en cada repetición el valor de I_{CE} , obteniendo un valor de corriente (I_2) adecuado para conseguir una polarización E_{POL} óptima;
- aplicar una corriente entre la armadura y el contraelectrodo interno (1) (I_{CE}) de valor I_2 durante un tiempo de polarización,
- interrumpir la corriente;
- determinar el valor definitivo de la polarización efectiva (E_{POL}), determinando la máxima polarización alcanzada en la armadura (E_{MAX}) y descontándole el efecto de la caída óhmica (ΔE_{Ω}):

15

20

$$E_{POL} = E_{MAX} - \Delta E_{\Omega}$$

- calcular la resistencia a la polarización (R_P), mediante la fórmula:

25

$$R_P = E_{POL} / I_2$$

- calcular la densidad de corrosión (i_{CORR}), mediante la fórmula:

$$i_{CORR} = 10^6 \times 0.026 / (R_P \times S)$$

donde S es el área de acero sobre la que se efectúa la medida.

30

y donde el valor de I_{XCE} se va variando para garantizar que $\Delta V_{SS} \approx 0$ mV, incrementando o disminuyendo su valor en el mismo porcentaje que I_{CE} .

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, que además comprende la etapa de calcular la resistencia óhmica (R_{Ω}), mediante la fórmula:

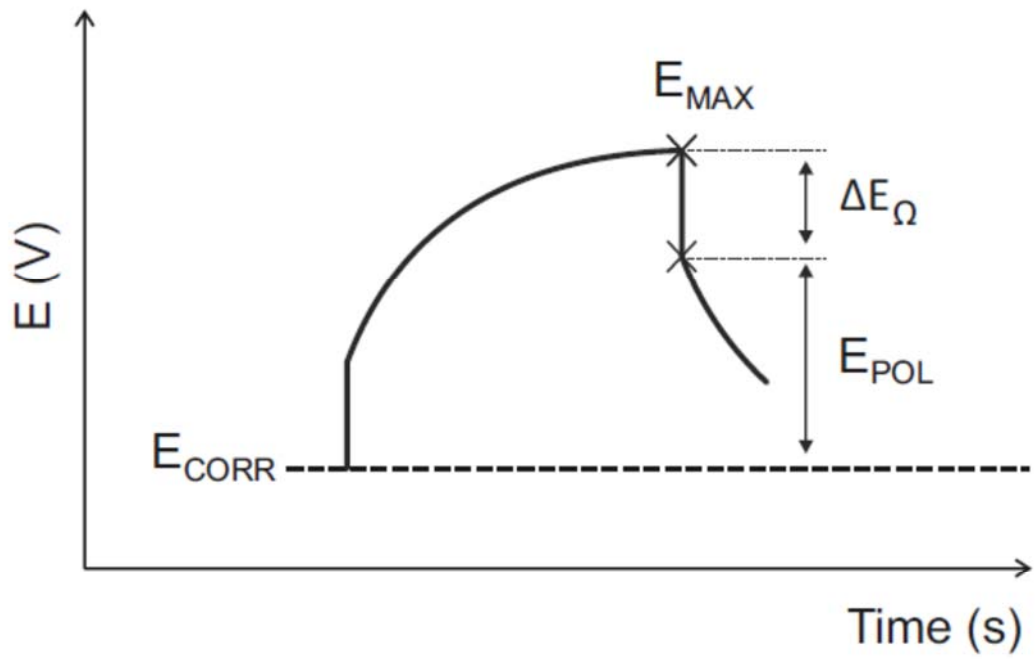
35

$$R_{\Omega} = (E_{MAX} - E_{POL}) / I_2$$

- 5 3. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende una fase de medida de resistividad del hormigón, tras aplicar la fase de medida de corrosión, la cual comprende las etapas de realizar una medida de resistencia eléctrica entre el contraelectrodo interior (1) y la armadura y calcular el valor de resistividad (ρ) mediante la fórmula:

$$\rho = K \times R$$

10 siendo K una constante cuyo valor depende del recubrimiento de hormigón, del diámetro de la barra y del diámetro del contraelectrodo interno (1).

**FIG. 1**

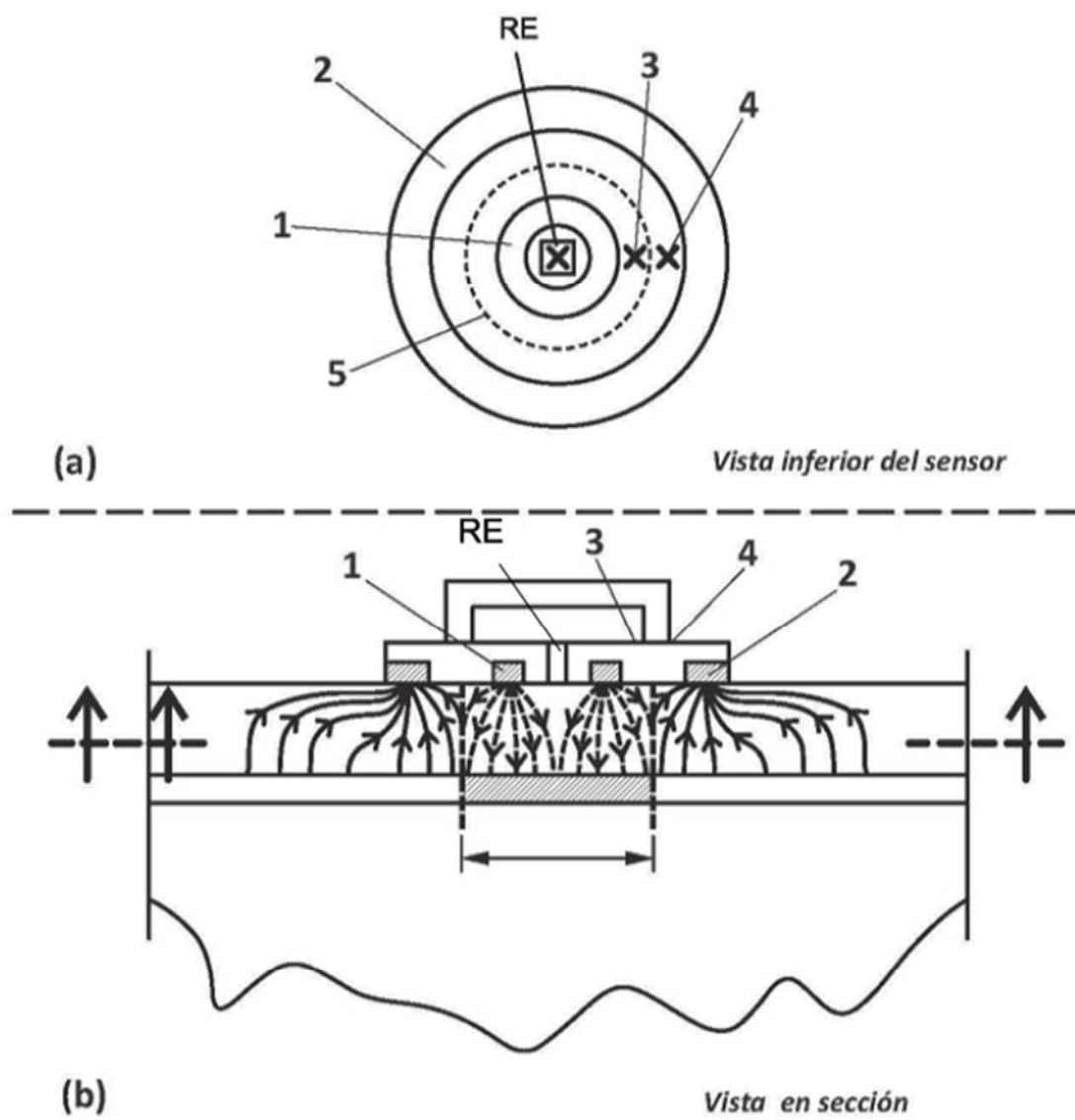


FIG. 2

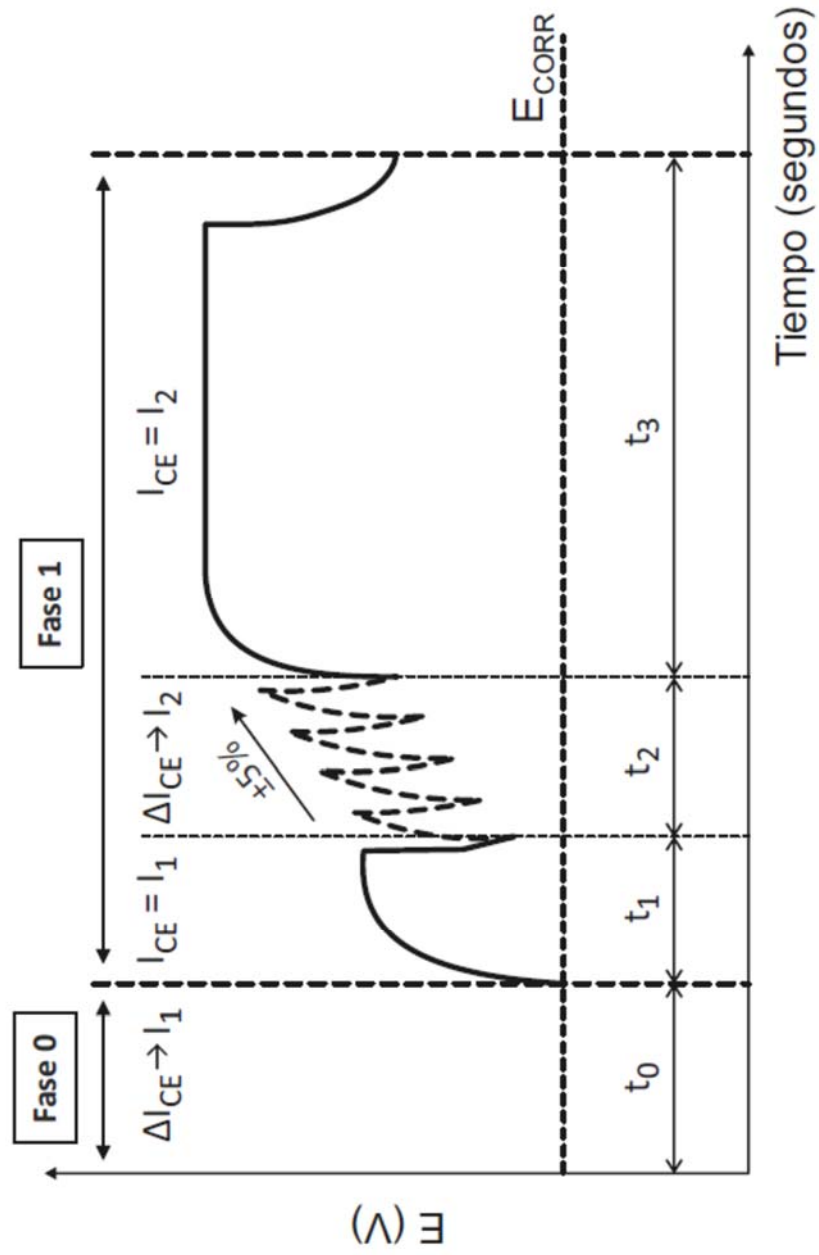


FIG. 3

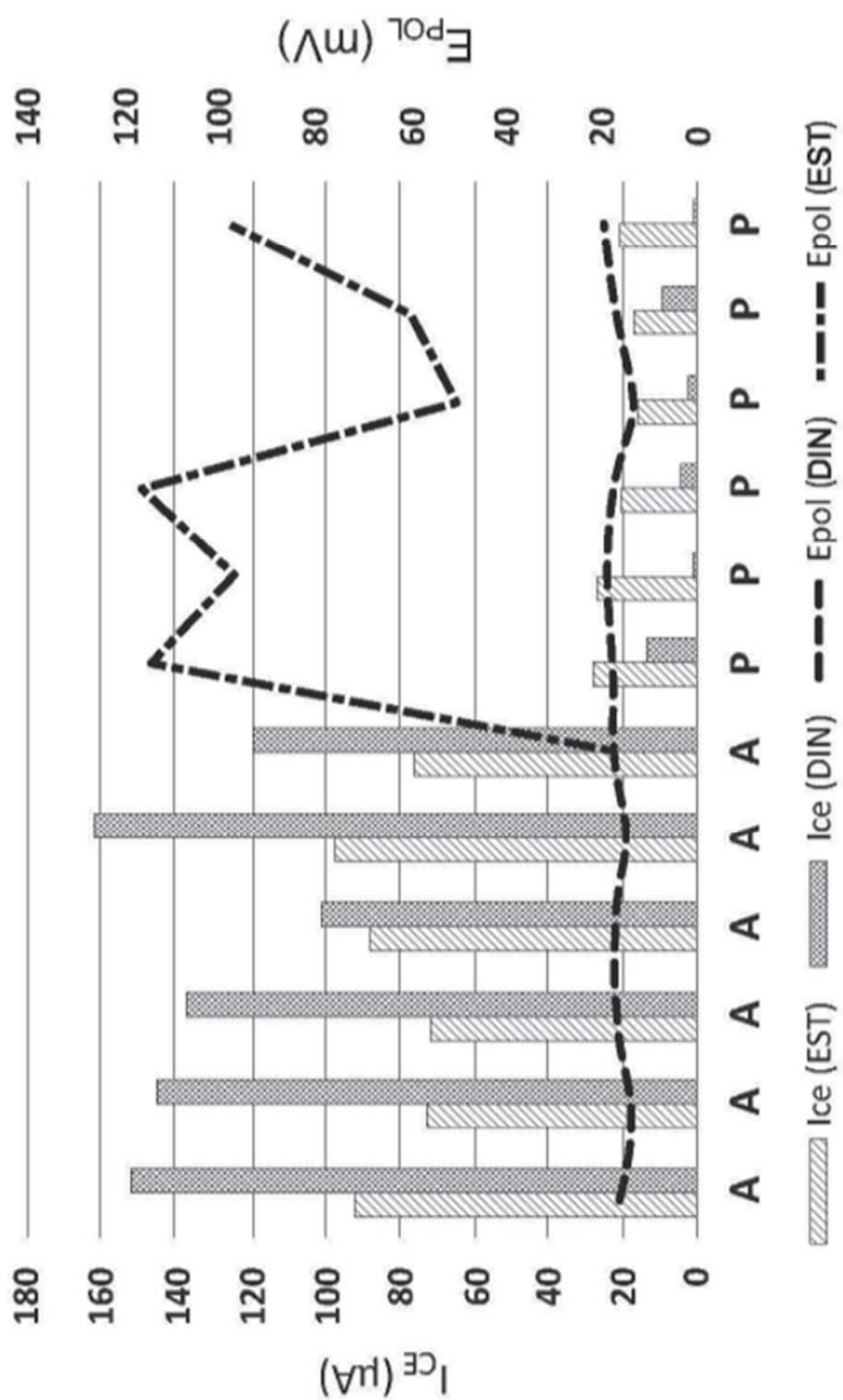


FIG. 4