

Evaluación experimental de una técnica con polarización controlada para la medición in situ de la velocidad de corrosión en hormigón armado.

J. E. Ramón^{1*} , I. Martínez¹ , A. Castillo¹ ,
J. R. Lliso-Ferrando^{2, 3} , A. Martínez-Ibernón^{2, 3} 

*Autor de Contacto: jose.ramon@ietcc.csic.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1042>

Recibido: 04/03/2026 | Correcciones recibidas: 10/04/2026 | Aceptado: 11/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

RESUMEN

Este trabajo presenta la evaluación experimental de una nueva metodología para la evaluación in situ de la corrosión en estructuras de hormigón armado. La técnica se basa en el control dinámico de la corriente aplicada para asegurar una polarización adecuada. Se realizaron ensayos en laboratorio con distintos tipos de hormigón y condiciones de exposición. Los resultados muestran un mejor control de la polarización respecto a generaciones anteriores de corrosímetros por corriente confinada, con valores de velocidad de corrosión comparables a técnicas de referencia como la Resistencia a la Polarización Lineal y sistemas multiparámetro embebidos. La originalidad radica en asegurar la polarización adecuada independientemente del estado de corrosión mediante una aproximación no invasiva, con potencial como herramienta eficaz de diagnóstico.

Palabras clave: hormigón armado; corrosión; técnicas no destructivas; inspección in situ; durabilidad.

Citar como: Ramón, J. E., Martínez, I., Castillo, A., Lliso-Ferrando, J. R., Martínez-Ibernón, A. (2026), “Evaluación experimental de una técnica con polarización controlada para la medición in situ de la velocidad de corrosión en hormigón armado.”, Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 260 – 267, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1042>

¹ Departamento de Construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Madrid, España.

² Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM), Universitat Politècnica de València, Universitat de València, Valencia, España.

³ Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

Contribución de cada autor

En este trabajo, J.E. Ramón e I. Martínez contribuyeron a la idea original, con una participación del 50% cada uno. El desarrollo de la metodología fue llevado a cabo por J.E. Ramón (30%), A. Castillo (20%), J.R. Lliso-Ferrando (30%) y A. Martínez-Ibernón (20%). La experimentación y recolección de datos fueron realizadas principalmente por J.E. Ramón (80%), con la participación de A. Castillo (20%). La redacción del manuscrito fue realizada por J.E. Ramón (80%) e I. Martínez (20%). Todos los autores participaron en la discusión e interpretación de resultados y en la aprobación de la versión final del manuscrito.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2026.

Experimental assessment of a controlled-polarization technique for the in-situ measurement of corrosion rate in reinforced concrete.

ABSTRACT

This work presents the experimental evaluation of a novel methodology for the in situ assessment of corrosion in reinforced concrete structures. The technique is based on dynamic control of the applied current to maintain appropriate polarization conditions. Laboratory tests were conducted on specimens with different concrete types and exposure conditions. The results show improved polarization control compared to previous generations of confined current corrosion meters, with corrosion rate values comparable to reference techniques such as Linear Polarization Resistance and embedded multiparametric systems. The originality lies in ensuring appropriate polarization regardless of corrosion state through a non-invasive approach, demonstrating strong potential as an effective tool for corrosion diagnosis.

Keywords: reinforced concrete; corrosion; non-destructive techniques; in-situ inspection; durability

Avaliação experimental de uma técnica com polarização controlada para a medição in situ da taxa de corrosão em concreto armado.

RESUMO

Este trabalho apresenta a avaliação experimental de uma nova metodologia para a avaliação in situ da corrosão em estruturas de concreto armado. A técnica baseia-se no controle dinâmico da corrente aplicada para manter condições de polarização adequadas. Ensaios laboratoriais foram realizados com diferentes tipos de concreto e condições de exposição. Os resultados mostram um melhor controle da polarização em relação a gerações anteriores de corrosímetros por corrente confinada, com valores de taxa de corrosão comparáveis aos obtidos por técnicas de referência, como a Resistência à Polarização Linear e sistemas multiparamétricos embutidos. A originalidade reside em assegurar a polarização adequada independentemente do estado de corrosão por meio de uma abordagem não invasiva, demonstrando elevado potencial como ferramenta eficaz de diagnóstico da corrosão.

Palavras-chave: concreto armado; corrosão; técnicas não destrutivas; inspeção in situ; durabilidade.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales patologías de las estructuras de hormigón armado (EHA) es la corrosión de las armaduras, que compromete su durabilidad y vida útil (Sun et al., 2010). La inspección de este fenómeno es clave para anticipar daños y optimizar los costes de mantenimiento. Por ello, a lo largo de los años, se han desarrollado diversas técnicas no destructivas (NDT), destacando la medida in situ de la velocidad de corrosión (V_{CORR}), expresada como densidad de corriente (i_{CORR}), que permite estimar la vida útil mediante modelos recogidos en el Código Estructural (Ministerio de Fomento, 2021) o el Eurocódigo 2 (CEN, 2005).

Aunque se han logrado avances tecnológicos aplicables a nuevas construcciones (Duffó y Farina, 2009; Alcañiz et al., 2016; Ramón, 2018), las soluciones orientadas a estructuras existentes siguen siendo limitadas. Entre las más utilizadas se encuentran los sistemas basados en corriente galvanostática confinada (CGC), si bien presentan limitaciones operativas. En un estudio reciente con más de 1800 mediciones en campo (Ramón et al., 2021), se observó una elevada tasa de errores por polarización fuera de los rangos adecuados (polarización efectiva $\approx 5\text{--}30\text{ mV}$)¹, lo que compromete la fiabilidad de la medida de V_{CORR} mediante el método de resistencia a la polarización lineal.

En este contexto, el equipo responsable de este trabajo desarrolló y patentó un nuevo método (Martínez y Ramón, 2021) basado en el control dinámico de la corriente aplicada, con el objetivo de superar las citadas limitaciones. En el marco de los proyectos SMART (PID2020-119744RB-C22) y SEGHOSENS (CPP2023-010657), esta metodología ha sido implementada en un equipo portátil orientado a la inspección in situ del estado de corrosión en estructuras de hormigón armado. El sistema permite obtener valores de velocidad de corrosión (V_{CORR}), potencial de corrosión y resistividad del hormigón. Este trabajo presenta una primera evaluación experimental del desempeño de dicha metodología frente a técnicas de referencia, con el objetivo de valorar su viabilidad como herramienta de diagnóstico en aplicaciones de campo.

2. PROCEDIMIENTO

En este trabajo se analizan algunos de los primeros resultados obtenidos con el método de medida de corrosión por corriente confinada dinámicamente controlada (en adelante, método DYN), previamente patentado (Martínez y Ramón, 2021). Este método ha sido implementado en un dispositivo portátil diseñado para la inspección in situ del estado de corrosión en elementos de hormigón armado. La configuración de electrodos empleada en la sonda portátil utilizada en este estudio se corresponde con la descrita en la citada patente.

La principal novedad del método respecto al originalmente desarrollado por Feliu et al. (Feliu et al., 1992), basado en corriente galvanostática confinada mediante anillo de guarda (en adelante, método EST), reside en la incorporación de un protocolo automatizado de control de la corriente de polarización que permite mantener la polarización de la armadura dentro del régimen lineal de perturbación, condición necesaria para la aplicabilidad del método de resistencia a la polarización lineal (LPR) (Stern y Geary, 1957).

Para la validación del método, los resultados obtenidos se comparan con los proporcionados por el método EST y por técnicas de referencia basadas en medidas electroquímicas mediante electrodos embebidos, fabricados con el mismo material o análogo al de la propia armadura del elemento. En este caso, se ha empleado el sistema INESSCOM (Alcañiz et al., 2016; Ramón, 2018), en el que la

¹ La polarización efectiva (E_{POL}) corresponde al incremento neto de potencial inducido sobre el acero durante el ensayo de polarización, una vez compensada la caída de potencial debida a la resistencia eléctrica del hormigón y del sistema de medida (IR-drop).

medida de la velocidad de corrosión se basa en una metodología electroquímica alternativa al método LPR, basada en la extrapolación de Tafel a partir de pulsos potencioestáticos. Sobre los electrodos embebidos de INESSCOM también se realizaron mediciones mediante el método de resistencia a la polarización lineal (LPR), según la norma ASTM G59-97 (ASTM International, 2020).

El método DYN se aplicó en vigas de hormigón armado (25×18×75 cm), con armadura longitudinal 4φ10 mm y 8 estribos φ8 mm. Se fabricaron dos vigas por tipo de hormigón C30 y C80 (fck = 30 MPa y 80 MPa según EN 206), ambos con cemento CEM I 42.5R. El C30 (330 kg de cemento; a/c = 0,60) alcanzó una resistencia media a 28 días de 34 MPa, mientras que el C80 (500 kg de cemento; a/c = 0,34) registró 88 MPa. Previamente al hormigonado, se incorporaron los elementos correspondientes a la celda de medida del sistema INESSCOM, utilizada también para las mediciones mediante el método LPR. Dicha celda incluyó dos electrodos de acero al carbono (φ10 mm, 13 cm longitud) colocados en la zona central de cada viga, empleando como contraelectrodo la propia armadura y un electrodo de referencia análogo al del sensor DYN.

Las vigas se curaron durante 28 días (20 °C, HR >95%) y posteriormente fueron sometidas a un proceso de carga-descarga a flexión para inducir fisuración residual (~0,2 mm de ancho). Transcurridas 48 horas, las vigas fueron parcialmente sumergidas en una disolución de agua de mar simulada (35 g/l NaCl). Las Figuras 1-a y 1-b muestran ejemplos de los elementos evaluados. Las mediciones de corrosión se realizaron semanalmente durante el primer mes y medio, y quincenalmente después. Se utilizaron los equipos electrónicos específicos de los dispositivos DYN e INESSCOM. En el caso del método DYN, el equipo ajusta de forma automática la corriente aplicada durante la medición, controlando en tiempo real el potencial de polarización efectivo (E_{POL}). Este ajuste dinámico permite situar E_{POL} dentro del rango ideal (5–30 mV) y verificarlo al finalizar cada medida mediante el valor registrado. La metodología de control y cálculo del método DYN se describe con detalle en la patente ES202130009 (Martínez y Ramón, 2021).

La técnica LPR consistió en un barrido potenciodinámico de ±20 mV respecto al potencial de corrosión (E_{CORR}), a 0,167 mV/segundo, empleando un potencioestado PGSTAT 204.

Adicionalmente, se realizaron medidas con el método DYN y con el método EST, empleando el mismo dispositivo portátil (Figura 1-c). Estas mediciones comparativas se realizaron en dos losas de 50×50×10 cm con armadura φ8 mm y una dosificación comparable a la de las vigas C30. Una de las losas fue contaminada con un 4% de cloruros (respecto al peso de cemento). Tras 28 días de curado (20 °C, HR >95%), se mantuvieron 28 días adicionales en condiciones de laboratorio, realizándose seis mediciones por método en cada losa.

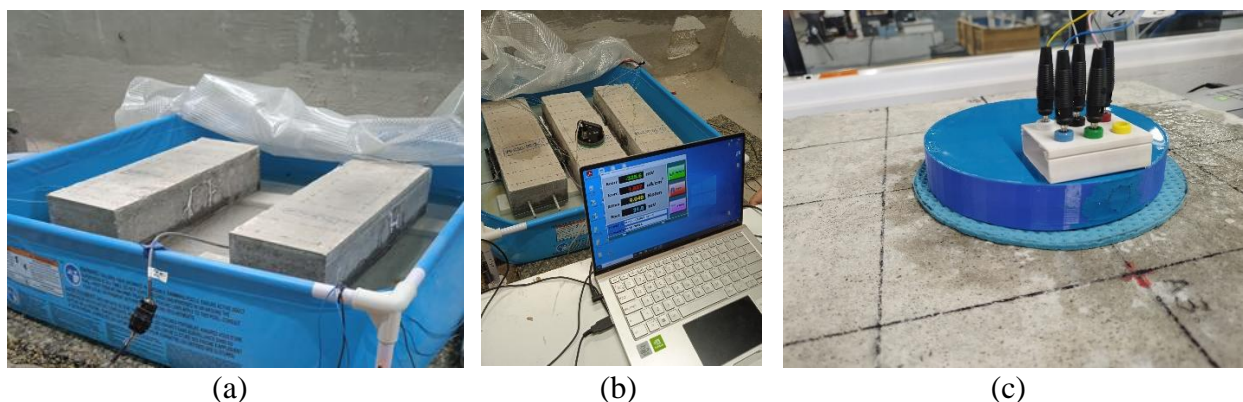


Figura 1. (a) Ubicación de parte de las vigas en piscina de agua salada tras la fisuración; (b) realización de mediciones electroquímicas en las vigas; (c) aplicación de los métodos DYN y EST mediante el dispositivo portátil de inspección desarrollado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta una comparativa entre los resultados obtenidos mediante el método DYN y el método EST en mediciones puntuales realizadas sobre las losas de hormigón, una con armadura en estado pasivo ($i_{CORR} < 0,1 \mu A/cm^2$) y otra con armadura en estado de corrosión activa ($i_{CORR} > 1 \mu A/cm^2$).

En las situaciones de corrosión activa, el método EST apenas alcanza la polarización efectiva mínima deseada ($E_{POL} = 5 \text{ mV}$), mientras que en las armaduras pasivas se produce una sobrepolarización significativa. En cambio, el método DYN mantiene la polarización dentro del rango ideal ($E_{POL} = 5\text{--}30 \text{ mV}$) en todos los casos, gracias al ajuste dinámico de la corriente aplicada (I_{AP}). Este ajuste se traduce en un incremento de I_{AP} en las armaduras activas y una notable reducción en las pasivas, en comparación con el método EST. Como consecuencia, los valores de i_{CORR} obtenidos mediante el método EST tienden a ser más elevados que los registrados con el método DYN.

Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de mantener la polarización de la armadura dentro del régimen lineal de perturbación, condición necesaria para la aplicabilidad del método de resistencia a la polarización lineal. En el caso del método EST, la sobrepolarización observada, especialmente en armaduras pasivas, puede alejar la medida de dicho régimen, introduciendo desviaciones en la estimación de i_{CORR} . Por el contrario, el método DYN mantiene la polarización dentro de rangos adecuados en todo tipo de condiciones, favoreciendo una respuesta más consistente. Asimismo, una menor perturbación electroquímica se asocia, en principio, a tiempos de recuperación más reducidos hasta el retorno al potencial de corrosión inicial, lo que contribuye a optimizar los tiempos de inspección.

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la velocidad de corrosión (i_{CORR}) en las vigas, registrada durante más de 150 días tras su inmersión en disolución salina, empleando los distintos métodos. Durante los primeros 20 días se aprecia cierta dispersión en los resultados, posiblemente atribuible a las diferencias en la disposición de los electrodos: el dispositivo DYN utiliza electrodos superficiales, mientras que el sistema INESSCOM y el método LPR se basan en electrodos embebidos.

Los sistemas basados en sensores embebidos permiten, en general, una definición más precisa del área de polarización, reduciendo una posible fuente de incertidumbre asociada a técnicas basadas en anillo de guarda. Sin embargo, su principal limitación radica en los procesos necesarios para su instalación, que en estructuras existentes implican actuaciones sobre el elemento, como la perforación del recubrimiento o la modificación local de la armadura (Figueira, 2017), no siempre viables en la práctica. En contraste, las técnicas basadas en sondas superficiales, como los métodos EST y DYN, evitan esta limitación y permiten realizar evaluaciones sin alterar el elemento.

Superado ese periodo inicial, se observa una buena correspondencia entre los métodos, permitiendo distinguir con claridad la evolución de las vigas fabricadas con hormigón C30 y C80. Aunque en las vigas C80 es esperable una matriz más densa y compacta que en las C30, las menores velocidades de corrosión podrían estar relacionadas con una menor cantidad de fisuras inducidas durante el proceso de carga, dada la mayor resistencia del hormigón. Al final del periodo de estudio, los valores de i_{CORR} en las vigas C80 se sitúan entre aproximadamente $0,6$ y $0,9 \mu A/cm^2$, dentro del rango asociado a corrosión moderada ($0,5\text{--}1 \mu A/cm^2$). Las vigas C30 muestran, prácticamente desde el inicio del seguimiento, velocidades de corrosión elevadas ($> 1 \mu A/cm^2$), de forma consistente en los tres métodos empleados.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el método DYN permite obtener medidas consistentes en un amplio rango de estados de corrosión, manteniendo condiciones de polarización adecuadas y ofreciendo resultados comparables a los de técnicas de referencia basadas en sensores embebidos. Todo ello, unido al carácter no invasivo de la sonda empleada, refuerza su potencial

como herramienta de inspección in situ, especialmente en estructuras existentes, donde la instalación de sensores embebidos puede no resultar siempre viable.

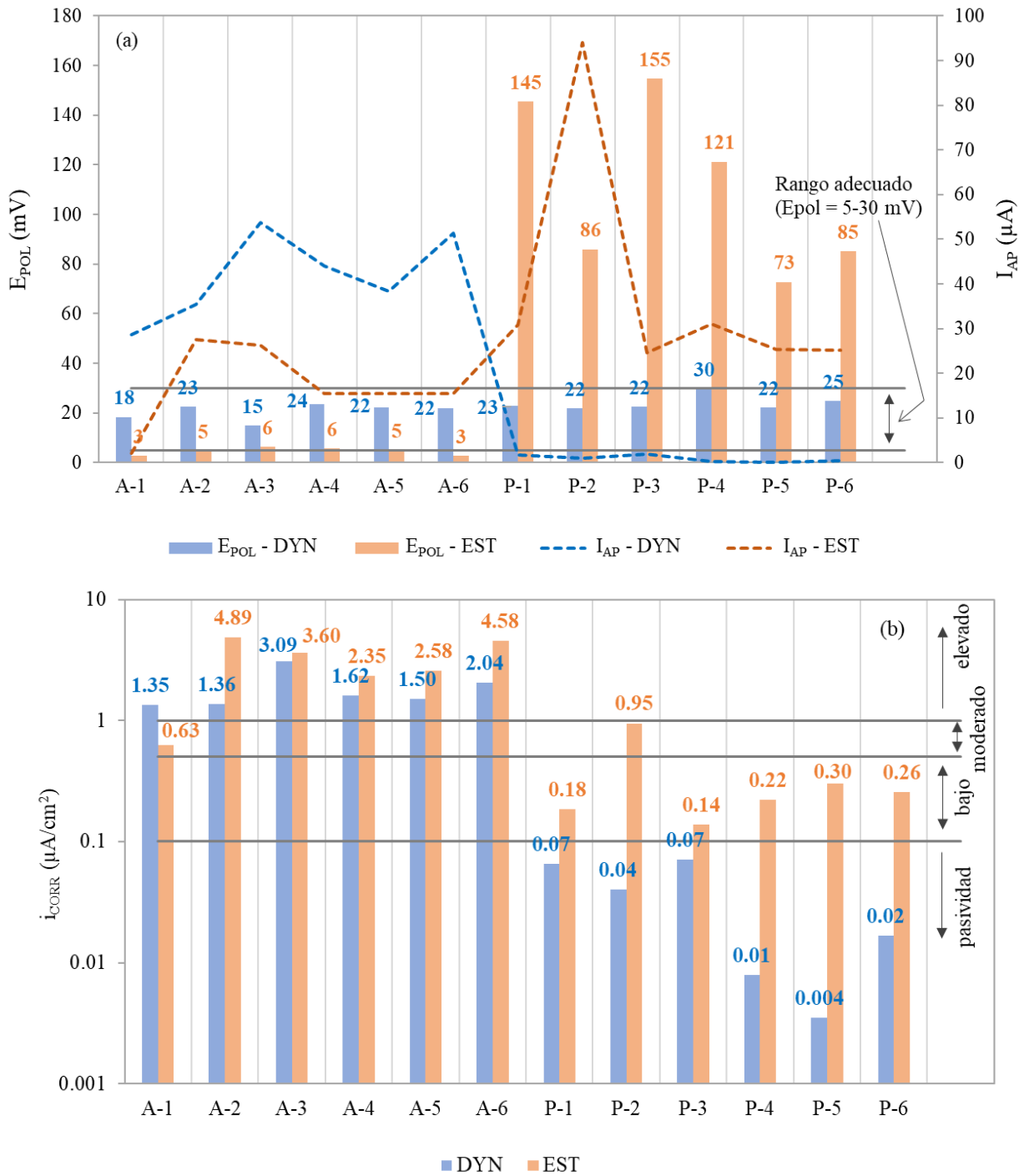


Figura 2. Comparativa entre medidas realizadas con el método DYN y el método EST en armaduras activas (A) y pasivas (P) de dos losas de hormigón: (a) valor de la corriente aplicada (I_{AP}) y polarización de la armadura (E_{POL}); y (b) velocidad de corrosión (i_{CORR}) obtenida, indicando los niveles de corrosión asociados a este parámetro según la norma UNE 112072:2011 (AENOR, 2011).

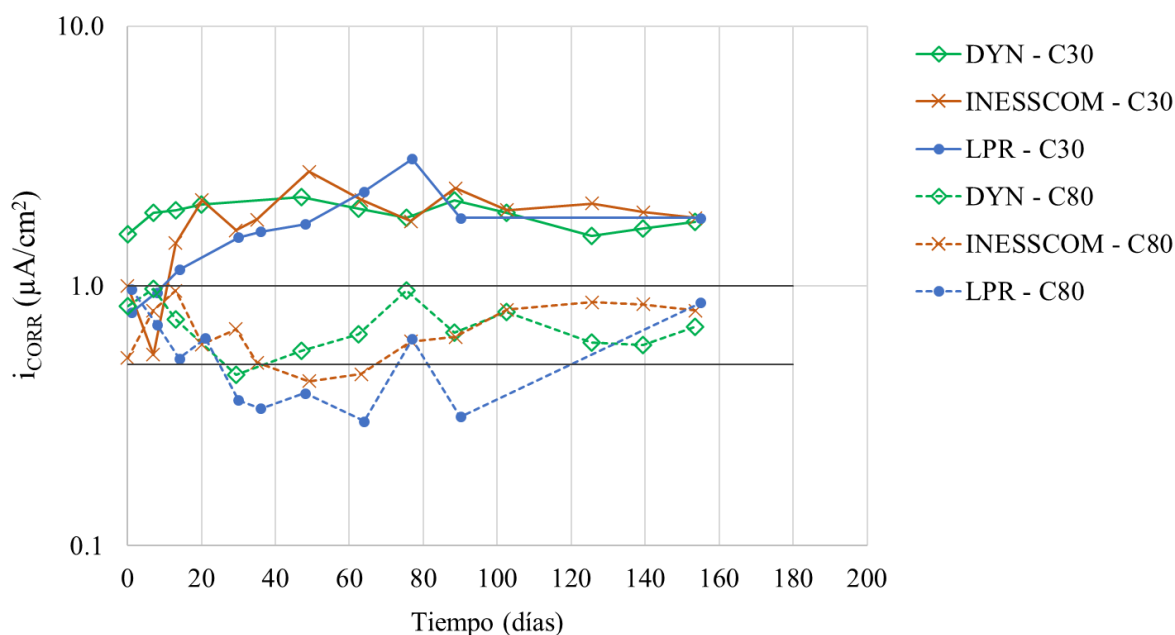


Figura 3. Seguimiento de la velocidad de corrosión (i_{CORR}) de las vigas con los diferentes métodos. Se muestran los resultados promedio por tipo de hormigón y técnica de medida. A la derecha se indica el nivel de corrosión asociado a este parámetro según la norma UNE 112072:2011 (AENOR, 2011).

4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado un nuevo método para la inspección de la corrosión en estructuras de hormigón armado, basado en un protocolo de control dinámico de la corriente galvanostática confinada. La sonda empleada permite evaluar directamente la armadura sin necesidad de electrodos embebidos, lo que reduce la invasividad del procedimiento y facilita una inspección rápida y operativamente eficiente. Los resultados experimentales muestran mejoras significativas respecto a generaciones previas de sistemas de corriente galvanostática confinada, especialmente en condiciones límite, donde la nueva técnica permitió mantener la polarización dentro del rango óptimo, garantizando la aplicabilidad del método de resistencia a la polarización lineal. Asimismo, los valores de velocidad de corrosión obtenidos fueron comparables a los registrados con metodologías de referencia, permitiendo discriminar distintos niveles de corrosión en elementos fisurados. Estas evidencias sitúan esta metodología como una solución con alto potencial para el diagnóstico estructural, especialmente en estructuras existentes, si bien su validación en estructuras condiciones reales será clave para consolidar su aplicabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de los proyectos PID2020-119744RB-C21 y PID2020-119744RB-C22. Asimismo, se ha recibido financiación de la Agencia Estatal de Investigación a través del plan de ayudas a proyectos de colaboración público-privada (proyecto CPP2023-010657). Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y la Universitat Politècnica de València. Asimismo, se desea expresar un especial agradecimiento a Ana Labanda, Isaías Benjamín y Luis Córdoba, técnicos de laboratorio del IETcc-CSIC, por su valiosa colaboración en el trabajo experimental.

6. REFERENCIAS

- AENOR. (2011). *UNE 112072:2011 Laboratory measurement of corrosion speed using the polarization resistance technique*.
- Alcañiz, M., Bataller, R., Gandía-Romero, J.M., Ramón, J.E., Soto, J., Valcuende, M., inventors; Universitat Politècnica de València (2016). “*Sensor, red de sensores, método y programa informático para determinar la corrosión en una estructura de hormigón armado*”, No. ES2545669. <http://hdl.handle.net/20.500.12251/2755>
- ASTM International. (2020). *ASTM G59–97: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. <https://doi.org/10.1520/G0059-97R20>
- CEN, European Committee for Standardization. (2005). *EN 1992–1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures—part 1-1: general rules and rules for buildings*. Brussels.
- Duffó, G. S., Farina, S. B. (2009). *Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials, 23(8):2746-2751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.001>
- Feliu, S., Gonzalez, J.A., Feliu, V., Feliu, S., Escudero, L., et al. inventors; Geotecnia y Cimientos Geocisa SA. Geocisa, CSIC Consejo Superior Investigaciones Científicas. (1992). “*Método de medida electroquímica de la velocidad de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón, sensores y aparato para la puesta en práctica de dicho método*”, No. ES2024268.
- Figueira, R. B. (2017), *Electrochemical sensors for monitoring the corrosion conditions of reinforced concrete structures: A review*. Applied Sciences, 7(11), 1157. <https://doi.org/10.3390/app7111157>
- Martínez, I., Ramón, J.E., inventors; CSIC Consejo Superior Investigaciones Científicas. (2021). “*Método y sensor de medida de la velocidad de corrosión en hormigón armado*”, No. ES202130009. <http://hdl.handle.net/10261/309761>
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2021). “*Código Estructural*”, Boletín Oficial del Estado no. 190. Madrid, España.
- Ramón, J.E. (2018). “*Sistema de Sensores Embebidos para Monitorizar la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones*”, PhD Thesis, Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/111823>
- Ramón, J.E., Castillo, Á., Martínez, I. (2021), *On-site corrosion monitoring experience in concrete structures: potential improvements on the current-controlled polarization resistance method*. Materiales de Construcción. 71(344): e265-e265. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11221>
- Stern, M., Geary, A. L. (1957). *Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves*. Journal of the electrochemical society, 104(1), 56-63. <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
- Sun, M., Staszewski, W.J., Swamy, R.N. (2010), *Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures*. Advances in civil engineering. 2010(1):724962. <https://doi.org/10.1155/2010/724962>