

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

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

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

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

Recebido: 04/03/2026 | Correções recebidas: 10/04/2026 | Aceito: 11/04/2026 | Publicado: 15/05/2026

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para avaliação in situ da corrosão em estruturas de concreto armado. A técnica baseia-se no controle dinâmico da corrente aplicada para assegurar condições adequadas de polarização. Foram realizados ensaios em laboratório com diferentes tipos de concreto e condições de exposição. Os resultados mostram melhor controle da polarização em relação às gerações anteriores de corrossímetros por corrente confinada, com valores de velocidade de corrosão comparáveis aos de 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, com potencial elevado como ferramenta eficaz de diagnóstico.

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

Citar como: Ramón, J. E., Martínez, I., Castillo, A., Lliso-Ferrando, J. R., Martínez-Ibernón, A. (2026), "Avaliação experimental de uma técnica com polarização controlada para a medição in situ da velocidade de corrosão em concreto 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

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, J.E. Ramón e I. Martínez contribuíram para a ideia original, com participação de 50% cada um. O desenvolvimento da metodologia foi realizado por J.E. Ramón (30%), A. Castillo (20%), J.R. Lliso-Ferrando (30%) e A. Martínez-Ibernón (20%). A experimentação e a coleta de dados foram realizadas principalmente por J.E. Ramón (80%), com a participação de A. Castillo (20%). A redação do manuscrito foi realizada por J.E. Ramón (80%) e I. Martínez (20%). Todos os autores participaram da discussão e interpretação dos resultados e da aprovação da versão final do manuscrito.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-01 1717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais manifestações patológicas das estruturas de concreto armado (ECA) é a corrosão das armaduras, que compromete sua durabilidade e vida útil (Sun et al., 2010). A inspeção desse fenômeno é fundamental para antecipar danos e otimizar os custos de manutenção. Por isso, ao longo dos anos, foram desenvolvidas diversas técnicas não destrutivas (NDT), com destaque para a medição in situ da velocidade de corrosão (V_{CORR}), expressa como densidade de corrente (i_{CORR}), que permite estimar a vida útil por meio de modelos previstos no Código Estrutural (Ministerio de Fomento, 2021) ou no Eurocódigo 2 (CEN, 2005).

Embora tenham sido alcançados avanços tecnológicos aplicáveis a novas construções (Duffó e Farina, 2009; Alcañiz et al., 2016; Ramón, 2018), as soluções voltadas a estruturas existentes ainda são limitadas. Entre as mais utilizadas encontram-se os sistemas baseados em corrente galvanostática confinada (CGC), embora apresentem limitações operacionais. Em um estudo recente com mais de 1800 medições em campo (Ramón et al., 2021), observou-se elevada taxa de erros por polarização fora dos intervalos adequados (polarização efetiva $\approx 5-30$ mV), o que compromete a confiabilidade da medição da V_{CORR} pelo método de resistência à polarização linear.¹

Nesse contexto, a equipe responsável por este trabalho desenvolveu e patenteou um novo método (Martínez e Ramón, 2021), baseado no controle dinâmico da corrente aplicada, com o objetivo de superar as limitações citadas. No âmbito dos projetos SMART (PID2020-119744RB-C22) e SEGHOSENS (CPP2023-010657), essa metodologia foi implementada em um equipamento portátil voltado à inspeção in situ do estado de corrosão em estruturas de concreto armado. O sistema permite obter valores de velocidade de corrosão (V_{CORR}), potencial de corrosão e resistividade do concreto. Este trabalho apresenta uma primeira avaliação experimental do desempenho dessa metodologia frente a técnicas de referência, com o objetivo de avaliar sua viabilidade como ferramenta de diagnóstico em aplicações de campo.

2. PROCEDIMENTO

Neste trabalho são analisados alguns dos primeiros resultados obtidos com o método de medição da corrosão por corrente confinada dinamicamente controlada (doravante, método DYN), previamente patentado (Martínez e Ramón, 2021). Esse método foi implementado em um dispositivo portátil projetado para a inspeção in situ do estado de corrosão em elementos de concreto armado. A configuração dos eletrodos empregada na sonda portátil utilizada neste estudo corresponde à descrita na referida patente.

A principal novidade do método em relação ao originalmente desenvolvido por Feliu et al. (Feliu et al., 1992), baseado em corrente galvanostática confinada por meio de anel de guarda (doravante, método EST), reside na incorporação de um protocolo automatizado de controle da corrente de polarização, que permite manter a polarização da armadura dentro do regime linear de perturbação, condição necessária para a aplicabilidade do método de resistência à polarização linear (LPR) (Stern e Geary, 1957).

Para a validação do método, os resultados obtidos são comparados com os fornecidos pelo método EST e por técnicas de referência baseadas em medições eletroquímicas por meio de eletrodos embutidos, fabricados com o mesmo material ou com material análogo ao da própria armadura do elemento. Neste caso, foi empregado o sistema INESSCOM (Alcañiz et al., 2016; Ramón, 2018),

¹ A polarização efetiva (E_{POL}) corresponde ao incremento líquido de potencial induzido no aço durante o ensaio de polarização, após compensada a queda de potencial devida à resistência elétrica do concreto e do sistema de medição (IR-drop).

no qual a medição da velocidade de corrosão se baseia em uma metodologia eletroquímica alternativa ao método LPR, fundamentada na extrapolação de Tafel a partir de pulsos potencioestáticos. Sobre os eletrodos embutidos do INESSCOM também foram realizadas medições pelo método de resistência à polarização linear (LPR), conforme a norma ASTM G59-97 (ASTM International, 2020).

O método DYN foi aplicado em vigas de concreto armado ($25 \times 18 \times 75$ cm), com armadura longitudinal $4\phi 10$ mm e 8 estribos $\phi 8$ mm. Foram fabricadas duas vigas por tipo de concreto, C30 e C80 ($f_{ck} = 30$ MPa e 80 MPa, segundo a EN 206), ambas com cimento CEM I 42.5R. O C30 (330 kg de cimento; $a/c = 0,60$) alcançou resistência média aos 28 dias de 34 MPa, enquanto o C80 (500 kg de cimento; $a/c = 0,34$) registrou 88 MPa. Antes da concretagem, foram incorporados os elementos correspondentes à célula de medição do sistema INESSCOM, também utilizada para as medições pelo método LPR. Essa célula incluiu dois eletrodos de aço-carbono ($\phi 10$ mm, 13 cm de comprimento) posicionados na zona central de cada viga, utilizando como contraeletrodo a própria armadura e um eletrodo de referência análogo ao do sensor DYN.

As vigas foram curadas durante 28 dias ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, UR > 95%) e, posteriormente, submetidas a um processo de carga-descarga à flexão para induzir fissuração residual ($\sim 0,2$ mm de abertura). Decorridas 48 horas, as vigas foram parcialmente submersas em solução de água do mar simulada (35 g/L de NaCl). As Figuras 1-a e 1-b mostram exemplos dos elementos avaliados.

As medições de corrosão foram realizadas semanalmente durante o primeiro mês e meio e, posteriormente, quinzenalmente. Foram utilizados os equipamentos eletrônicos específicos dos dispositivos DYN e INESSCOM. No caso do método DYN, o equipamento ajusta automaticamente a corrente aplicada durante a medição, controlando em tempo real o potencial de polarização efetivo (EPOL). Esse ajuste dinâmico permite posicionar EPOL dentro do intervalo ideal (5-30 mV) e verificá-lo ao final de cada medição por meio do valor registrado. A metodologia de controle e cálculo do método DYN é descrita em detalhe na patente ES202130009 (Martínez e Ramón, 2021).

A técnica LPR consistiu em uma varredura potenciodinâmica de ± 20 mV em relação ao potencial de corrosão (ECORR), a $0,167$ mV/s, utilizando um potenciostato PGSTAT 204.

Adicionalmente, foram realizadas medições com o método DYN e com o método EST, utilizando o mesmo dispositivo portátil (Figura 1-c). Essas medições comparativas foram realizadas em duas lajes de $50 \times 50 \times 10$ cm com armadura $\phi 8$ mm e dosagem comparável à das vigas C30. Uma das lajes foi contaminada com 4 % de cloretos (em relação à massa de cimento). Após 28 dias de cura ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, UR > 95%), as lajes foram mantidas por mais 28 dias em condições de laboratório, realizando-se seis medições por método em cada laje.

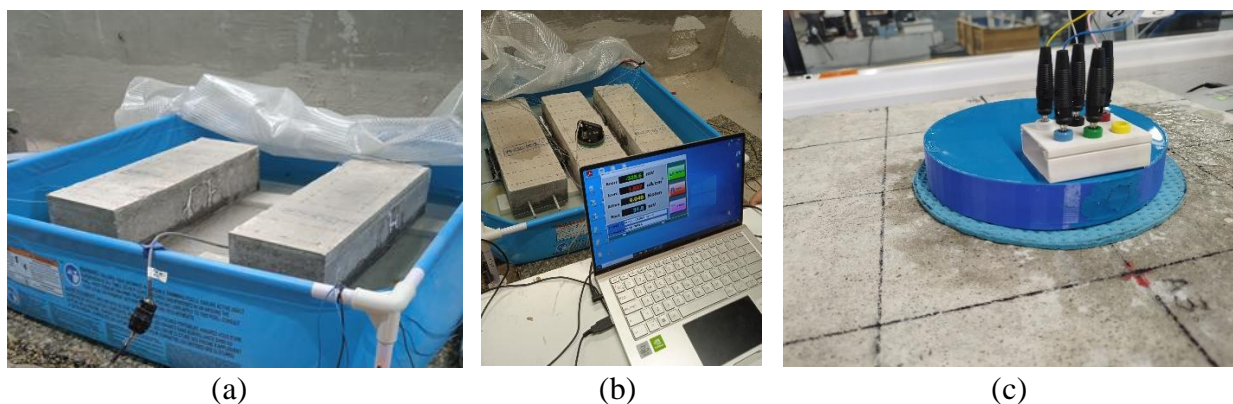


Figura 1. (a) Localização de parte das vigas em piscina de água salgada após a fissuração; (b) realização de medições eletroquímicas nas vigas; (c) aplicação dos métodos DYN e EST por meio do dispositivo portátil de inspeção desenvolvido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos DYN e EST em medições pontuais realizadas sobre as lajes de concreto, uma com armadura em estado passivo ($i_{CORR} < 0,1 \mu A/cm^2$) e outra com armadura em estado de corrosão ativa ($i_{CORR} > 1 \mu A/cm^2$).

Nas situações de corrosão ativa, o método EST apenas alcança a polarização efetiva mínima desejada (EPOL = 5 mV), enquanto nas armaduras passivas ocorre sobrepolarização significativa. Por outro lado, o método DYN mantém a polarização dentro do intervalo ideal (EPOL = 5–30 mV) em todos os casos, graças ao ajuste dinâmico da corrente aplicada (IAP). Esse ajuste se traduz em aumento de IAP nas armaduras ativas e redução notável nas passivas, em comparação com o método EST. Como consequência, os valores de i_{CORR} obtidos pelo método EST tendem a ser mais elevados do que os registrados com o método DYN.

Esses resultados evidenciam a importância de manter a polarização da armadura dentro do regime linear de perturbação, condição necessária para a aplicabilidade do método de resistência à polarização linear. No caso do método EST, a sobrepolarização observada, especialmente em armaduras passivas, pode afastar a medição desse regime, introduzindo desvios na estimativa de i_{CORR} . Em contrapartida, o método DYN mantém a polarização dentro de intervalos adequados em todos os tipos de condição, favorecendo uma resposta mais consistente. Além disso, uma menor perturbação eletroquímica está associada, em princípio, a tempos de recuperação mais reduzidos até o retorno ao potencial de corrosão inicial, contribuindo para otimizar os tempos de inspeção. A Figura 3 mostra a evolução temporal da velocidade de corrosão (i_{CORR}) nas vigas, registrada durante mais de 150 dias após sua imersão em solução salina, empregando os diferentes métodos. Durante os primeiros 20 dias observa-se certa dispersão nos resultados, possivelmente atribuível às diferenças na disposição dos eletrodos: o dispositivo DYN utiliza eletrodos superficiais, enquanto o sistema INESSCOM e o método LPR se baseiam em eletrodos embutidos.

Os sistemas baseados em sensores embutidos permitem, em geral, uma definição mais precisa da área de polarização, reduzindo uma possível fonte de incerteza associada a técnicas baseadas em anel de guarda. No entanto, sua principal limitação está nos processos necessários para sua instalação, que, em estruturas existentes, implicam intervenções no elemento, como a perfuração do revestimento ou a modificação local da armadura (Figueira, 2017), nem sempre viáveis na prática. Em contraste, as técnicas baseadas em sondas superficiais, como os métodos EST e DYN, evitam essa limitação e permitem realizar avaliações sem alterar o elemento.

Superado esse período inicial, observa-se boa correspondência entre os métodos, permitindo distinguir com clareza a evolução das vigas fabricadas com concreto C30 e C80. Embora nas vigas C80 seja esperada uma matriz mais densa e compacta do que nas C30, as menores velocidades de corrosão podem estar relacionadas com uma menor quantidade de fissuras induzidas durante o processo de carregamento, devido à maior resistência do concreto. Ao final do período de estudo, os valores de i_{CORR} nas vigas C80 situam-se aproximadamente entre 0,6 e 0,9 $\mu A/cm^2$, dentro do intervalo associado à corrosão moderada (0,5–1 $\mu A/cm^2$). As vigas C30 apresentam, praticamente desde o início do monitoramento, velocidades de corrosão elevadas ($> 1 \mu A/cm^2$), de forma consistente nos três métodos empregados.

Em conjunto, os resultados obtidos evidenciam que o método DYN permite obter medições consistentes em uma ampla faixa de estados de corrosão, mantendo condições adequadas de polarização e oferecendo resultados comparáveis aos de técnicas de referência baseadas em sensores embutidos. Tudo isso, associado ao caráter não invasivo da sonda empregada, reforça seu potencial como ferramenta de inspeção *in situ*, especialmente em estruturas existentes, nas quais a instalação de sensores embutidos pode nem sempre ser viável.

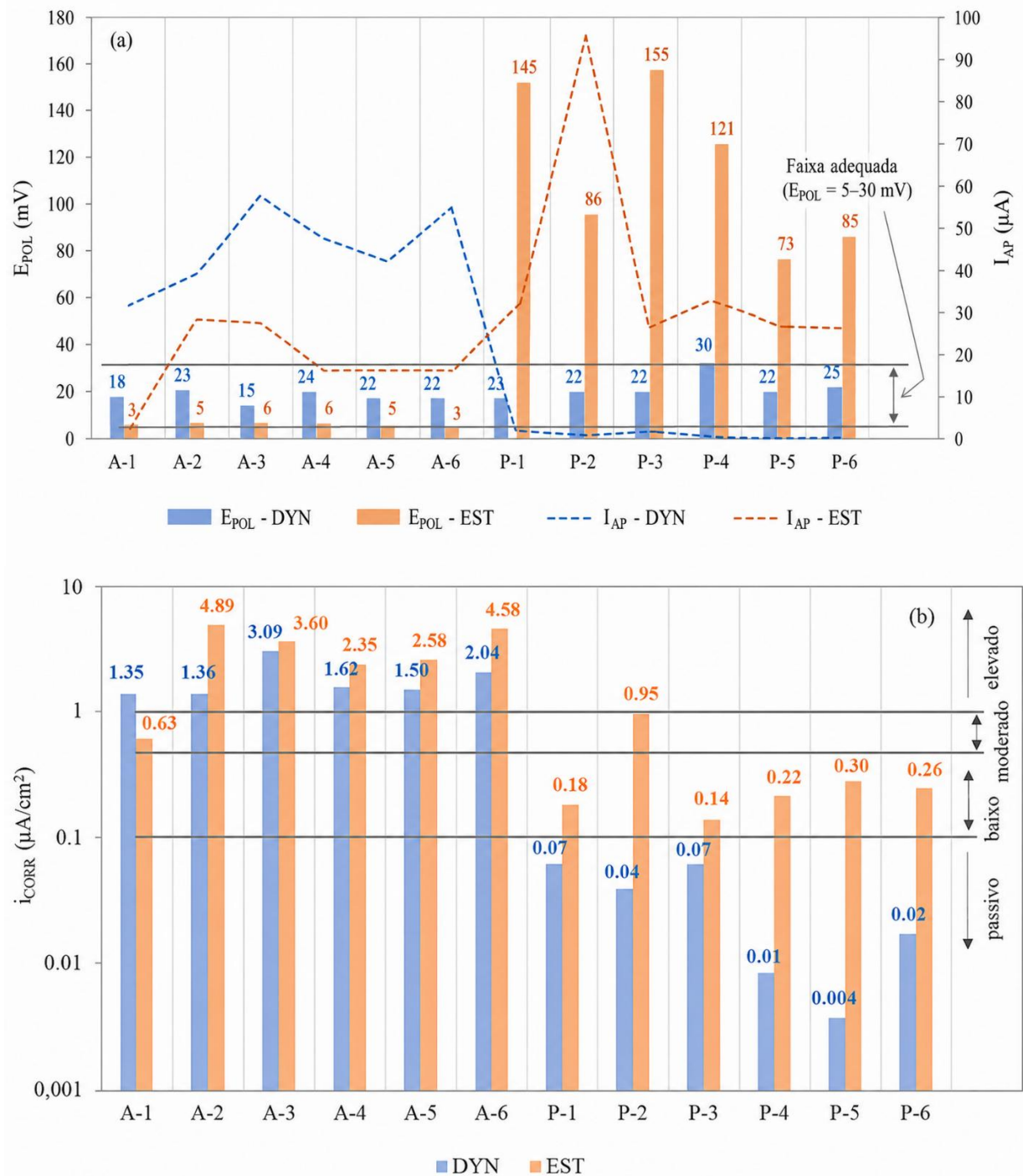


Figura 2. Comparação entre medições realizadas com os métodos DYN e EST em armaduras ativas (A) e passivas (P) de duas lajes de concreto: (a) valor da corrente aplicada (I_{AP}) e polarização da armadura (E_{POL}); e (b) velocidade de corrosão (i_{CORR}) obtida, indicando os níveis de corrosão associados a esse parâmetro segundo a norma UNE 112072:2011 (AENOR, 2011).

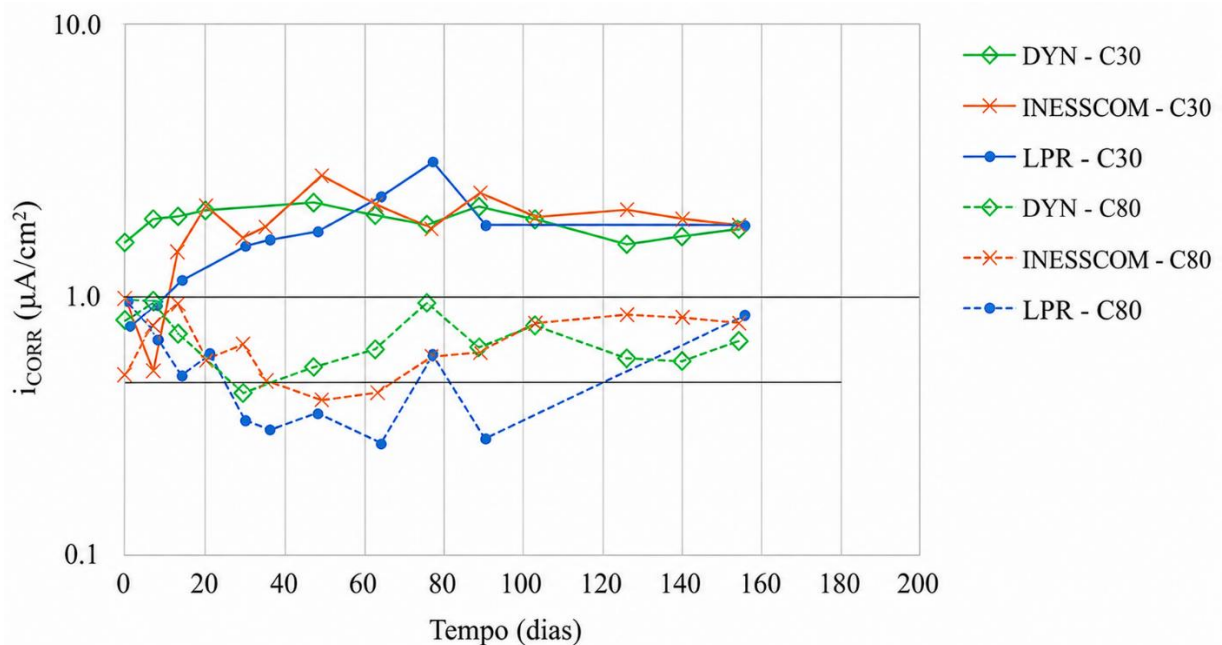


Figura 3. Monitoramento da velocidade de corrosão (i_{CORR}) das vigas com os diferentes métodos. São apresentados os resultados médios por tipo de concreto e técnica de medição. À direita, indica-se o nível de corrosão associado a esse parâmetro segundo a norma UNE 112072:2011 (AENOR, 2011).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo método para a inspeção da corrosão em estruturas de concreto armado, baseado em um protocolo de controle dinâmico da corrente galvanostática confinada. A sonda empregada permite avaliar diretamente a armadura sem necessidade de eletrodos embutidos, reduzindo a invasividade do procedimento e facilitando uma inspeção rápida e operacionalmente eficiente. Os resultados experimentais mostram melhorias significativas em relação às gerações anteriores de sistemas de corrente galvanostática confinada, especialmente em condições limite, nas quais a nova técnica permitiu manter a polarização dentro do intervalo ótimo, garantindo a aplicabilidade do método de resistência à polarização linear. Além disso, os valores de velocidade de corrosão obtidos foram comparáveis aos registrados com metodologias de referência, permitindo discriminar diferentes níveis de corrosão em elementos fissurados. Essas evidências posicionam essa metodologia como uma solução com alto potencial para o diagnóstico estrutural, especialmente em estruturas existentes, embora sua validação em condições reais de serviço seja fundamental para consolidar sua aplicabilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pelo Ministério da Ciência e Inovação da Espanha por meio dos projetos PID2020-119744RB-C21 e PID2020-119744RB-C22. Além disso, recebeu financiamento da Agência Estatal de Pesquisa por meio do plano de auxílios a projetos de colaboração público-privada (projeto CPP2023-010657). Os autores agradecem o apoio proporcionado pelo Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja e pela Universitat Politècnica de València. Também expressam agradecimento especial a Ana Labanda, Isaías Benjamín e Luis Córdoba, técnicos de laboratório do IETcc-CSIC, por sua valiosa colaboração no trabalho experimental.

6. REFERÊNCIAS

- 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>