

Monitorización de la corrosión en continuo de estructuras de hormigón armado: casos de estudio, resultados y análisis de los datos obtenidos.

Monitoring corrosion in reinforced concrete structures: case studies, results, analysis and outputs

Nuria Rebolledo Ramos^a, Julio Torres Martín^b, Antonio Silva Toledo^c y

Javier Sánchez Montero^d

^a Ingeniero Químico. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Investigador, nuriare@ietcc.csic.es

^b Dr. Ingeniero de Materiales. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Investigador, juliotorres@ietcc.csic.es

^c Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Técnico, a.silva@ietcc.csic.es

^d Dr. Ingeniero Químico. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Científico, javier.sanchez@csic.es

RESUMEN

Se calcula que el 70% de las estructuras de hormigón armado sufrirán un grado significativo de deterioro durante su vida útil, siendo la corrosión de sus armaduras la principal causa. Normas como el Eurocódigo 2 recomiendan la aplicación de estrategias de mantenimiento predictivo para los sistemas de infraestructuras. La monitorización de los parámetros de durabilidad elimina las incertidumbres sobre el comportamiento de la corrosión y permitir un mantenimiento predictivo. Este trabajo presenta los resultados de monitorización de la corrosión sobre diversas estructuras de hormigón armado situadas en diferentes clases de exposición y el cálculo en tiempo real de la pérdida de sección de la armadura, parámetro clave en el establecimiento de los estados límite de durabilidad.

ABSTRACT

It is estimated that 70% of reinforced concrete structures will undergo a significant degree of deterioration during their service life, with corrosion of their reinforcement being the primary cause. Standards such as Eurocode 2 recommend the application of predictive maintenance strategies for infrastructure systems. The monitoring of durability parameters eliminates uncertainties about corrosion behaviour and allows predictive maintenance. This paper presents the results of corrosion monitoring on several reinforced concrete structures located in different exposure classes and the real-time calculation of the loss of reinforcement section, a key parameter in the establishment of durability limit states.

PALABRAS CLAVE: durabilidad, mantenimiento de estructuras, monitorización, corrosión, vida útil.

KEYWORDS: durability, structural maintenance, corrosion monitoring, service life.

1. Introducción

Uno de los principales deterioros de las estructuras de hormigón armado son los problemas de corrosión de sus armaduras, que reducen significativamente la vida útil para la que fueron diseñadas [1-3], provocando la necesidad de llevar a cabo costosos trabajos de reparación [4-6]. Las consecuencias de la corrosión son extensamente conocidos: fisuración, desprendimiento del recubrimiento de hormigón, pérdida de sección transversal de las armaduras, que puedan dar lugar al colapso de la propia estructura [7-11]. En el caso de armaduras activas o pretensadas este deterioro es más determinante, lo que hace fundamental conocer el inicio de la corrosión para evitar corrosión bajo tensión o fragilización por hidrogeno [7, 12-18].

Aun aplicando la normativa vigente, a menudo no es posible alcanzar la vida útil prevista para estructuras de hormigón armado debido a diversos factores [19-22]. En la actualidad no se dispone de herramientas para evaluar con precisión cómo evolucionan este tipo de deterioros en estructuras reales, lo que dificulta un mantenimiento adecuado, basado actualmente en inspecciones visuales poco precisas. Aunque la normativa exige un mantenimiento predictivo, la falta de herramientas de evaluación adecuadas dificulta su aplicación en la práctica. El mantenimiento predictivo sólo puede lograrse mediante un sistema de monitorización continua y una medición precisa de los parámetros de durabilidad [23-25].

En el caso de estructuras expuestas al medio ambiente, puede producirse corrosión debido a procesos de carbonatación, presencia de iones cloruro en zonas costeras o debido al uso de sales de deshielo cloruro. Esta corrosión puede causar daños en el hormigón tales como

la fisuración, el desprendimiento del hormigón de recubrimiento debido al aumento de volumen de los óxidos procedentes del propio armado y a la reducción de la sección transversal de la armadura dando lugar a una pérdida de rendimiento mecánico en el acero. La corrosión inducida por cloruros puede ser particularmente peligrosa en elementos pretensados debido al potencial de picaduras, que pueden conducir a la localización de daños y fallos localizados. A medida que el ataque ambiental se vuelve más agresivo con el tiempo, ya sea debido al contenido de cloruros o a la carbonatación, la capacidad de los elementos corroídos de hormigón armado u hormigón pretensado disminuye gradualmente. Esto puede dar lugar a fallos inesperados debidos a una resistencia insuficiente a flexión, cortante o anclaje [9,11,21].

Para garantizar la durabilidad de las estructuras, es esencial calibrar y actualizar los modelos de durabilidad con información precisa y correctamente medida sobre el estado real de la estructura. Por lo tanto, es necesario aumentar los esfuerzos de mantenimiento y realizar evaluaciones predictivas para anticipar o detectar la corrosión de las armaduras activas y pasivas. La estrategia para gestionar la vida útil de la estructura y planificar el mantenimiento pasa por integrar los métodos tradicionales de inspección con nuevas herramientas inteligentes de gestión. Además, deben incorporarse y analizarse los resultados de la monitorización en tiempo real para poder pasar de la reparación reactiva al diagnóstico proactivo. Esta transición influirá en el coste, alcance y eficiencia de las reparaciones necesarias [19,26,27]. Para incorporar herramientas de inteligencia artificial al mantenimiento de infraestructuras, es necesario disponer de bases de datos de mediciones

precisas. A continuación, estas mediciones pueden integrarse en modelos de elementos finitos o en gemelos digitales para evaluar el estado de la estructura en tiempo real (véase la Figura 1). Esta evaluación puede realizarse tanto en estructuras nuevas como en estructuras existentes o reparadas, lo que a su vez permitiría evaluar la durabilidad y la eficacia de la propia reparación.

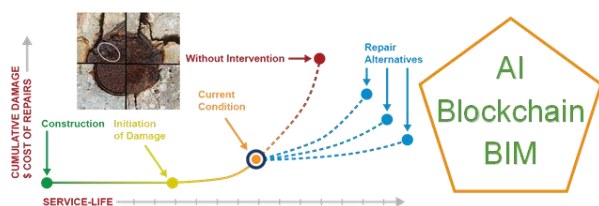


Figura 1. Diagrama de vida útil de estructuras de hormigón. Mantenimiento predictivo.

Actualmente, las técnicas electroquímicas son las más adecuadas para el seguimiento del proceso de corrosión de estructuras de hormigón reales. Existen diversos estudios y recomendaciones que definen la metodología a seguir para una correcta medición [26-30]. La medida del potencial de corrosión (E_{corr}) ayuda a identificar las zonas con probabilidad de corrosión. Se trata de un parámetro cualitativo. Del mismo modo, la resistividad eléctrica permite clasificar las zonas en función del contenido de humedad, la porosidad del hormigón y la microestructura del hormigón [31,32]. Entre las técnicas electroquímicas, sólo las mediciones de la resistencia a la polarización (R_p) pueden cuantificar la velocidad de corrosión (I_{corr}) [26]. Mediante la ley de Faraday, la velocidad de corrosión puede transformarse en una pérdida de sección de la armadura. Para calcularla con precisión, es necesario disponer de suficientes mediciones a lo largo del tiempo. Por consiguiente, la monitorización de las estructuras representa el método óptimo para adquirir un conocimiento preciso de su estado.

2. Metodología

En el campo de la investigación sobre la corrosión del hormigón armado, se emplean con frecuencia los ensayos de polarización potenciodinámica como método rápido para determinar la velocidad de corrosión. A través de estos ensayos se pueden obtener parámetros como el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión. La densidad de corriente puede medirse mediante un potencióstato que mediante la ecuación de Butler-Volmer puede relacionarse con la densidad de corriente de corrosión. A continuación, se calcula la velocidad de corrosión utilizando la pendiente de la curva de potencial eléctrico-intensidad de corriente, menos la caída de resistencia, que se tomó como R_p [26, 29, 30]. Empleando la ecuación de Stern-Geary se determina, finalmente, la velocidad de corrosión, i_{corr} .

Para obtener mediciones precisas de la corrosión in situ, es esencial tener un control adecuado de la zona que se está midiendo [33]. Además, es necesario estimar la caída óhmica durante las mediciones, como se hace en las mediciones de laboratorio. Las metodologías empleadas pueden clasificarse en dos grupos distintos: las que necesitan un contacto directo con la armadura y las que no.

El método de confinamiento de corriente modulada utiliza un anillo de guarda durante la medición [34]. Para garantizar mediciones precisas, es necesario implementar un sistema que controle que la corriente permanezca confinada entre el contraelectrodo central y el anillo de guarda.

Los métodos sin contacto se basan en el método Wenner para la medición de la resistividad [32,35]. Estos métodos tienen la ventaja de que no es necesario realizar una conexión con la armadura; sin embargo, no es posible obtener el potencial de corrosión de la armadura. En este método, la corriente es aplicada por los electrodos externos y el cambio

de potencial se mide mediante los dos electrodos de referencia internos [36].

Este trabajo presenta un nuevo método de medición denominado MONITORIZA, que mide con precisión el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión, la resistividad del hormigón de recubrimiento y la temperatura. Los sensores utilizados en este método se basan en desarrollos anteriores con más de 25 años de investigación [23,38]. Las mediciones se programan cada 2 h y los resultados se analizan automáticamente. El procedimiento está verificado tanto en laboratorio como mediante mediciones in situ. Está legalmente registrado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

3. Estructuras y clases de exposición

En la Figura 2 se muestra la localización de las estructuras que se están monitorizando actualmente. Las estructuras que se han monitorizado se pueden clasificar en función de su edad en estructuras nuevas, estructuras existentes o estructuras reparadas. A su vez, se puede diferenciar entre monitorización de la armadura corrugada o el acero pretensado. Desde el punto de vista de la normativa, como por ejemplo EN 206 o Eurocódigos, se pueden clasificar las estructuras en función de la clase de exposición o ambiente en el que se encuentran.

En la Tabla 1 se resumen las estructuras que se muestran y sus características.



Figura 2. Localización de las estructuras monitorizadas en España.

Tabla 1. Estructura y clase de exposición de acuerdo con la norma EN 206.

Clase de exposición	Definición de ambiente	Edad y tipo de estructura
XC1	Carbonatación. Seco o permanentemente húmedo	+ 50 años. Tanque de agua
XC3	Carbonatación. Humedad moderada	+ 30 años. Aparcamiento reparado
XC4	Carbonatación. Ciclos de humedad/secado	+ 5 años. Viga expuesta ambiente Madrid
XD2	Cloruros no marinos. Húmedo, rara vez seco.	+ 5 años. Piscina
XD3	Cloruros no marinos. Ciclos de humedad/secado	+ 1 año. Puente.
XS2	Cloruros marinos. Permanentemente sumergido en agua de mar	+ 2 años. Losa edificio.

4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de velocidad de corrosión, I_{corr} , obtenidos en las estructuras monitorizadas en función de la clase de exposición.

La monitorización de la velocidad de corrosión permite estimar en tiempo real la pérdida de sección de la armadura mediante el cálculo de la profundidad de corrosión, P_{corr} [23,38], que está relacionada con la pérdida de radio a través de la ley de Faraday (ver ecuación 1). Esto permite calcular la pérdida de sección de la armadura en una estructura en tiempo real mediante la integración de la curva de velocidad de corrosión. La adquisición de este parámetro puede integrarse en el modelo de comportamiento mecánico de forma puntual o continua (gemelo digital), permitiendo así la evaluación automática de la seguridad de la estructura.

$$P_{corr}(t) = \int_{t=0}^t (\alpha i_{corr}(\tau) M_{Fe} / (n d F)) d\tau \quad (1)$$

donde, α es el factor de picadura, M_{Fe} es la masa atómica del hierro, n es el número de

electrones para las reacciones anódicas, d es la densidad de masa del acero y F es la constante de Faraday.

4.1 Estructuras en clase de exposición de carbonatación, XC

En la Figura 3 se muestra la evolución de la velocidad de corrosión en una estructura construida hace más de 50 años. Los resultados han sido obtenidos mediante la monitorización de diferentes elementos tales como, pilares, vigas y bóvedas. La Figura 4 muestra un histograma resumen de los resultados de velocidad de corrosión obtenidos en la estructura. Las figuras delimitan los límites entre el estado pasivo y activo para una I_{corr} comprendida entre 0.1 - $0.2 \mu A/cm^2$. Se puede observar que solo unos pocos valores están por encima de este valor crítico.

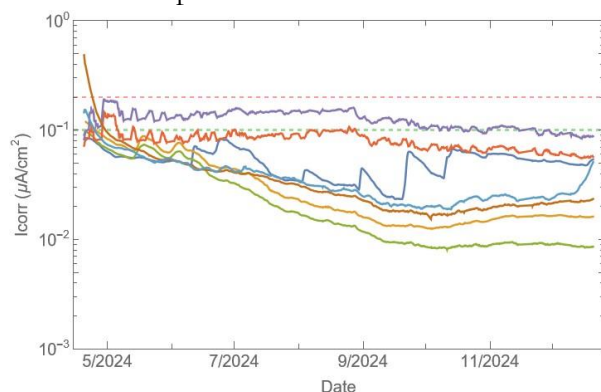


Figura 3. Monitorización de la corrosión de una estructura en ambiente de carbonatación.

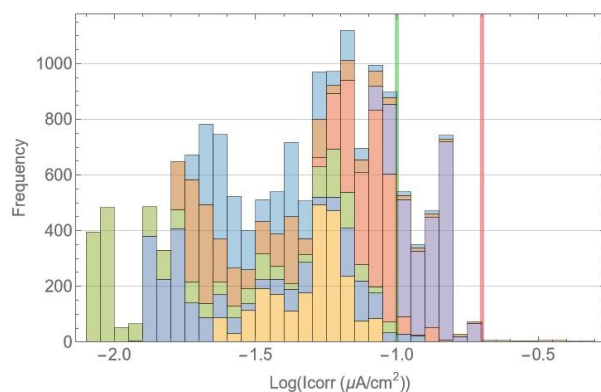


Figura 4. Histograma resumen obtenido durante la monitorización de la corrosión. XC.

La Figura 5 muestra la profundidad de corrosión alcanzada por las armaduras durante el periodo de seguimiento. Se han analizado los datos obtenidos durante aproximadamente 250

días de registro y se puede estimar que la pérdida anual de radio en las armaduras se sitúa entre $4,3$ y $0,9 \mu A/año$. Estos valores facilitan la planificación de actuaciones o medidas de protección previas a la consecución del estado límite de durabilidad.

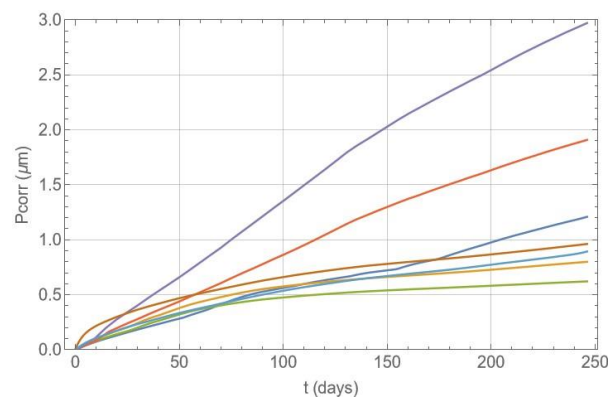


Figura 5. Pérdida de sección armadura por corrosión. Ambiente carbonatación.

4.2 Estructuras en clase de exposición de cloruros de origen no marino, XD3

La Figura 6 muestra la evolución de la corrosión de una viga contaminada previamente por cloruros procedentes de sales y expuesta al clima de Madrid [38]. Se puede observar la fuerte influencia del clima en la variación de la velocidad de corrosión. Se estima que la pérdida de diámetro de la de la armadura es de aproximadamente $7 \mu m/año$ (véase la Figura 7).

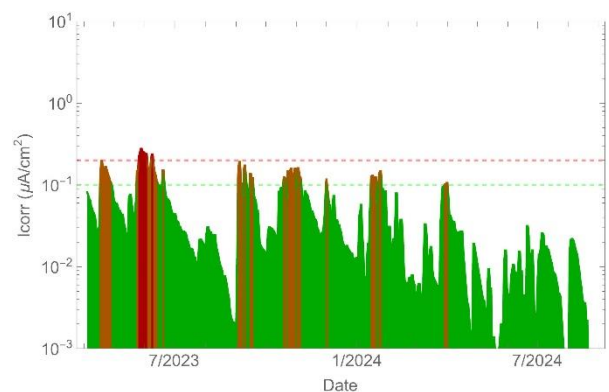


Figura 6. Monitorización de la corrosión de una estructura en ambiente de cloruros de origen no marino.

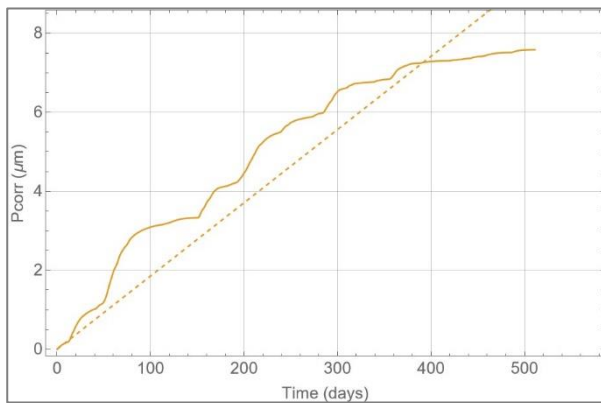


Figura 7. Pérdida de sección armadura por corrosión. Ambiente XD3.

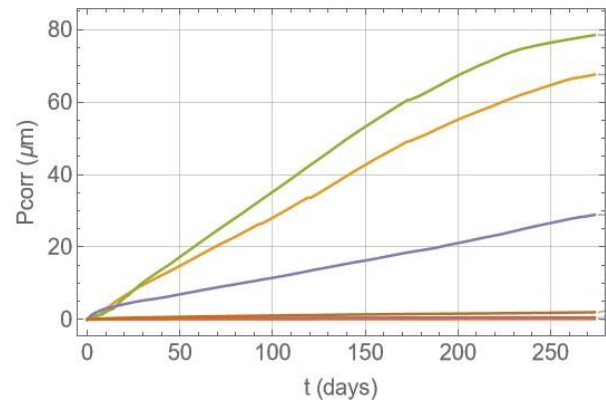


Figura 9. Pérdida de sección armadura por corrosión. Ambiente XD2.

4.3 Estructuras en clase de exposición de cloruros de origen marino, permanentemente sumergido, XD2

En este caso, se muestra la evolución de la velocidad de dos paredes que forman parte de una piscina (ver Figura 8). A pesar de encontrarse en el mismo entorno, se observan dos diferentes efectos: un grupo presenta índices de corrosión inferiores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y el otro grupo presenta índices cercanos o superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este fenómeno puede atribuirse a la eficacia o insuficiencia del sistema de impermeabilización de la piscina. Se ha observado que la presencia de estos valores de velocidad de corrosión extremadamente elevados en determinadas zonas ha provocado la pérdida de más de $100 \mu\text{m}$ de diámetro en las armaduras anualmente (véase la Figura 9)

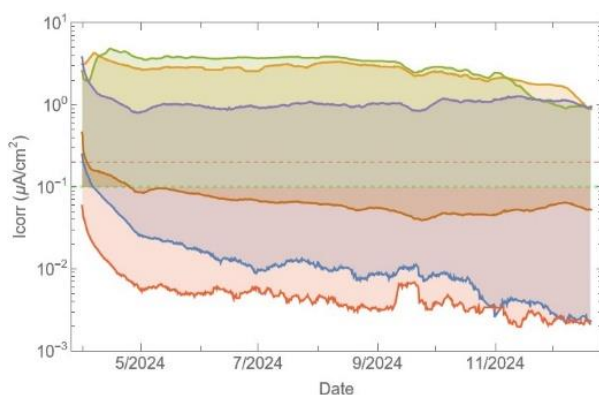


Figura 8. Monitorización de la corrosión de una estructura en ambiente de carbonatación.

4. Conclusiones

Este estudio presenta los resultados de la velocidad de corrosión de estructuras de hormigón armado situadas en diversos entornos o clases de exposición. Uno de los parámetros calculados es la pérdida de sección de la armadura. Este parámetro es fundamental para determinar el estado límite de durabilidad y para alimentar un hipotético gemelo digital de la estructura. La metodología esbozada permite el mantenimiento predictivo de las estructuras y la evaluación de la eficacia de los sistemas de reparación.

Referencias

- J. Xia, T. Li, J.-X. Fang, W. Jin, Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete, *Constr Build Mater* 228 (2019) 116745. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116745](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116745).
- [2] B. Hou, X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zheng, W. Xu, D. Lu, F. Ma, The cost of corrosion in China, *Npj Mater Degrad* 1 (2017) 4. <https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2>.
- [3] L. Schueremans, D. Van Gemert, S. Giessler, Chloride penetration in RC-structures in marine environment – Long term assessment

- of a preventive hydrophobic treatment, *Constr Build Mater* 21 (2007) 1238–1249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.006>.
- [4] D. V Val, M.G. Stewart, Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments, *Structural Safety* 25 (2003) 343–362. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(03\)00014-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(03)00014-6).
- [5] W. Zhu, R. François, Q. Fang, D. Zhang, Influence of long-term chloride diffusion in concrete and the resulting corrosion of reinforcement on the serviceability of RC beams, *Cem Concr Compos* 71 (2016) 144–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.003>.
- [6] J. Wei, C.-G. Wang, X. Wei, X. Mu, X.-Y. He, J.-H. Dong, W. Ke, Corrosion evolution of steel reinforced concrete under simulated tidal and immersion zones of marine environment, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 32 (2019) 900–912.
- [7] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, Corrosion-induced brittle failure in reinforcing steel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 92 (2017) 229–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.08.006>.
- [8] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, Fracture surface mobility mechanism in high-strength steel wires, *Eng Fract Mech* 186 (2017) 410–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.11.003>.
- [9] L. Franceschini, F. Vecchi, F. Tondolo, B. Belletti, J. Sánchez Montero, Mechanical behaviour of corroded strands under chloride attack: A new constitutive law, *Constr Build Mater* 316 (2022) 125872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125872>.
- [10] F. Vecchi, L. Franceschini, F. Tondolo, B. Belletti, J. Sánchez Montero, P. Minetola, Corrosion morphology of prestressing steel strands in naturally corroded PC beams, *Constr Build Mater* 296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123720>.
- [11] L. Franceschini, F. Vecchi, F. Tondolo, B. Belletti, J.S. Montero, P. Minetola, Variability in Section Loss and Maximum Pit Depth of Corroded Prestressing Wires BT - Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures, in: C. Pellegrino, F. Faleschini, M.A. Zanini, J.C. Matos, J.R. Casas, A. Strauss (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2022: pp. 491–498.
- [12] R.N. Parkins, M. Elices, V. Sanchez-Galvez, L. Caballero, Environment sensitive cracking of pre-stressing steels, *Corros Sci* 22 (1982) 379–405. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWS-48JJKXT-7C/2/28f5ce51259cd7594a8d73aca62a83d9>.
- [13] L. Franceschini, B. Belletti, F. Tondolo, J. Sanchez Montero, A simplified stress-strain relationship for the mechanical behavior of corroded prestressing strands: The SCPS-model, *Structural Concrete* 24 (2023) 189–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.202200170>.
- [14] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, Stress Corrosion Cracking of High Strength Steels, 2007.
- [15] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, P.L. De Andres, Hydrogen in α -iron: Stress and diffusion, *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys* 78 (2008). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.014113>.
- [16] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, C.

- Alonso, Stress corrosion cracking mechanism of pre-stressing steels in bicarbonate solutions, *Corros Sci* 49 (2007) 4069–4080. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.025>.
- [17] J. Sanchez, J. Fulla, C. Andrade, Fracture toughness variation induced by stress corrosion cracking of prestressing steels, *Materials and Corrosion* 59 (2008) 139–143. <https://doi.org/10.1002/maco.200804171>.
- [18] J. Sanchez, C. Andrade, J. Fulla, Reasons for crack arrest in stress corrosion cracking tests - Crack propagation rate in high-strength steels, *Corrosion* 65 (2009) 368–375. <https://doi.org/10.5006/1.3319142>.
- [19] J.E. Torres Martín, N. Rebolledo Ramos, S. Chinchón-Payá, I. Helices Arcila, A. Silva Toledo, J. Sánchez Montero, M. Llorente Sanjuán, S. Agulló Soto, F. Otero García, L. de Haan, Durability of a reinforced concrete structure exposed to marine environment at the Málaga dock, *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022) e01582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01582>.
- [20] P.S. Gómez, J.S. Montero, J.E.T. Martín, S. Chinchón-Payá, N.R. Ramos, Decreased useful life in air chamber reinforced concrete elements under sanitary floors by carbonation corrosion., *Case Studies in Construction Materials* (2023) e02390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02390>.
- [21] F. Vecchi, B. Belletti, L. Franceschini, C. Andrade, J. Rodríguez, S.J. Montero, Flexural Tests on Prestressed Beams Exposed to Natural Chloride Action, in: *Fib (Ed.), December 0, Pro-ceedings of the fib CACRCS DAYS 2020, 2021: pp. 205–212*.
- [22] B. Belletti, J. Rodríguez, C. Andrade, L. Franceschini, J. Sánchez Montero, F. Vecchi, Experimental tests on shear capacity of naturally corroded prestressed beams, *Structural Concrete* 21 (2020). <https://doi.org/10.1002/suco.202000205>.
- [23] N. Rebolledo, J. Torres, S. Chinchón-Payá, J. Sánchez, S. de Gregorio, M. Ordóñez, I. López, M. Ordoñez, I. López, M. Ordóñez, Monitoring in a reinforced concrete structure for storing low and intermediate level radioactive waste. Lessons learnt after 25 years, *Nuclear Engineering and Technology* 55 (2023) 1199–1209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.net.2022.12.004>.
- [24] J. Sanchez, C. Andrade, J. Fulla, Hydrothermal monitoring using embedded sensors of the actual roof system of the Prado Museum, *Constr Build Mater* 24 (2010) 2579–2589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.018>.
- [25] C. Andrade, I. Martinez, M. Castellote, P. Zuloaga, Some principles of service life calculation of reinforcements and in situ corrosion monitoring by sensors in the radioactive waste contain-ers of El Cabril disposal (Spain), *Journal of Nuclear Materials* 358 (2006) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.06.015>.
- [26] Ø. Vennesland, M. Raupach, C. Andrade, Recommendation of Rilem TC 154-EMC: “Electro-chemical techniques for measuring corrosion in concrete”—measurements with embedded probes, *Mater Struct* 40 (2007) 745–758. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>.
- [27] R.B. Polder, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. RILEM TC-154 technical recommendation, *Constr Build Mater* 15 (2000) 125–131. <http://www.sciencedirect.com/science/artic>

le/B6V2G-4286KV5-

7/2/373e9554913a648c69438de61aa4a6c2.

- [28] U. Angst, F. Moro, M. Geiker, S. Kessler, H. Beushausen, C. Andrade, J. Lahdensivu, A. Köliö, K. Imamoto, S. von Greve-Dierfeld, M. Serdar, Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC, RILEM Technical Letters 5 (2020) 85–100. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>.
- [29] E. Garcia, J. Torres, N. Rebolledo, R. Arrabal, J. Sanchez, Corrosion of Steel Rebars in Anoxic Environments. Part I: Electrochemical Measurements, Materials 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14102491>.
- [30] E. Garcia, J. Torres, N. Rebolledo, R. Arrabal, J. Sanchez, Corrosion of Steel Rebars in Anoxic Environments. Part II: Pit Growth Rate and Mechanical Strength, Materials 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14102547>.
- [31] J. Warkus, M. Raupach, J. Gulikers, Numerical modelling of corrosion – Theoretical back-grounds –, Materials and Corrosion 57 (2006) 614–617. <https://doi.org/10.1002/maco.200603992>.
- [32] J. Sanchez, C. Andrade, J. Torres, N. Rebolledo, J. Fullea, Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements, Mater Struct 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0884-7>.
- [33] C. Andrade, J. Sanchez, J. Fullea, N. Rebolledo, F. Tavares, On-site corrosion rate measurements: 3D simulation and representative values, Materials and Corrosion 63 (2012) 1154–1164. <https://doi.org/10.1002/maco.201206775>.
- [34] S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade, I. Rymaribona, Errors introduced by the guarding device in the on-site measurement of rebar corrosion rates, 1990.
- [35] A.J. Garzon, J. Sanchez, C. Andrade, N. Rebolledo, E. Menéndez, J. Fullea, Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars, Cem Concr Compos 53 (2014) 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>.
- [36] M. Keddad, X.R. Nóvoa, B. Puga, V. Vivier, Impedance based method for non-contact determination of the corrosion rate in buried metallic structures, European Journal of Environmental and Civil Engineering 15 (2011) 1097–1103. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9695296>.
- [37] C. Andrade, J. Sanchez, I. Martínez, N. Rebolledo, Analogue circuit of the inductive polarization resistance, Electrochim Acta 56 (2011) 1874–1880. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.09.057>.
- [38] N. Rebolledo, J.E. Torres, A. Silva, J. Sánchez, Monitoring of Reinforced Concrete Corrosion: Active and Passive Bars Exposed to Climate, Applied Sciences 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14114665>. *Un material innovador, ligero y moldeable, Hormigón y Acero*. 64 (268): 47–74.