

MONITORIZACIÓN DE CORROSIÓN PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

J. Torres Martín, J. Sánchez Montero, N. Rebolledo Ramos, A. Silva Toledo

Instituto Eduardo Torroja - CSIC, Madrid, España

RESUMEN

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado es una preocupación importante según en el ambiente en el que se encuentre, no solo para las estructuras de nueva construcción, sino para aquellas que tienen cierta edad, siendo la corrosión del refuerzo una de las principales causas de su reducción y que conllevan un alto gasto de mantenimiento durante toda su vida útil.

Para garantizar la precisión de los modelos de deterioro, es necesario calibrarlos o validarlos con mediciones directas en las estructuras, supervisando específicamente los parámetros relacionados con la durabilidad. La heterogeneidad de las estructuras y la dispersión de los parámetros considerados en los modelos hacen que esta calibración o validación sea esencial.

Para permitir el mantenimiento predictivo de las estructuras, es esencial supervisar los parámetros relacionados con su durabilidad. Este artículo presenta los resultados iniciales de la supervisión de variables medibles relacionadas con la corrosión, entre ellas, la velocidad de corrosión que cuantifica la pérdida de sección del refuerzo, en una estructura construida en el puerto de Alicante, en un terreno ganado al mar. Entre los elementos monitorizados está la losa del parking que está soterrada y a la que afecta de manera directa el agua de mar, los muros perimetrales y pilares. La evolución de las medidas registradas puede ayudar a predecir cuándo la estructura necesitará mantenimiento, mucho antes de que se observen signos inequívocos de deterioro. Éste paso es necesario hacia la digitalización de las estructuras o el desarrollo de gemelos digitales que incorporen el efecto de la corrosión en la evolución de las estructuras.

PALABRAS CLAVE: monitorización, corrosión, durabilidad, vida útil, mantenimiento predictivo, sostenibilidad.

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 conocidas: 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. En el Código estructural se define en su artículo 5 como “el período de tiempo, a partir de la fecha en la que finaliza su ejecución, durante el que debe mantenerse el cumplimiento de las exigencias. Durante ese período requerirá una conservación normal, que no implique intervenciones extraordinarias no previstas en el plan de mantenimiento”, además en su artículo 11 proporciona *“una estrategia de durabilidad”* que debe de seguirse para el cumplimiento de la vida útil de proyecto y debido a diversos factores, como la importancia de la puesta en obra, la mala elección de dosificaciones o materiales, la vida útil se ve afectada [19-23]. 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 y espaciadas en el tiempo. Aunque la normativa exige una estrategia para el mantenimiento predictivo, definido en su artículo 24 como *“el conjunto de actividades necesarias para que el nivel de prestaciones para el que ha sido proyectada, ..., no disminuya durante su vida útil de proyecto por debajo de un cierto umbral, vinculado a las características de resistencia mecánica, durabilidad, funcionalidad y, en su caso, estéticas”* [19], 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 [24-26].

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. 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 [9,11,22].

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 [20,27,28]. 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 y así poder redefinir su vida útil (véase la Figura 1), posibilitando mejorar las bases de datos sobre comportamiento de estructuras en diferentes ambientes. 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.

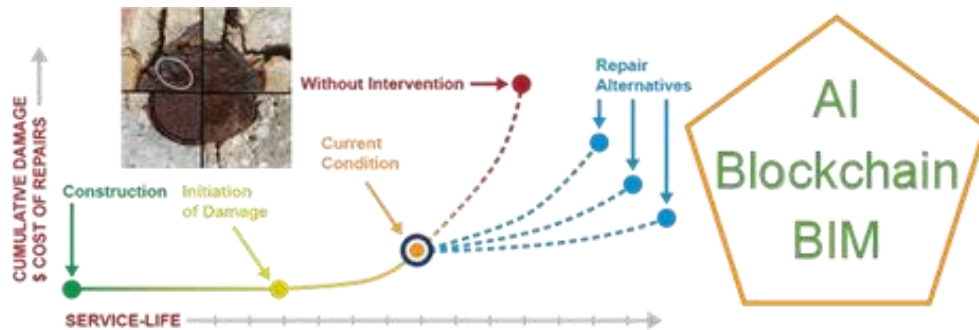


Figura 1. Diagrama de vida útil de estructuras de hormigón. Mantenimiento predictivo.

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 [27-31]. 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 [32,33]. Entre las técnicas electroquímicas, sólo las mediciones de la resistencia a la polarización (R_p) pueden cuantificar la velocidad de corrosión (I_{corr}) [27]. 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.

En este artículo se muestra el potencial que tiene la monitorización de la corrosión, para el mantenimiento predictivo, de una estructura que se encuentra en un ambiente XS, donde sus diferentes elementos tienen una exposición distinta (XS1-XS3) y, por tanto, su evolución en el tiempo y su mantenimiento será diferente.

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 y a partir de esta 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 [27, 30, 31]. 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 [34]. 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 [35]. 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 [33,36]. 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 [37].

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 [24,39]. 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 y se encuentra registrado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

2.1. Estructura

La estructura monitorizada de nueva construcción se encuentra en el puerto en un terreno ganado al mar. Consta de una planta sótano que funciona como parking, con una losa corrida de hormigón armado (de 0.4 m de espesor) que se encuentra en contacto directo con el nivel freático en zona de influencia marina. Muros perimetrales semienterrados en el terreno también de hormigón armado (de 0.3 m de espesor) y dos plantas sobre rasante.

Debido al ambiente agresivo en el que se encuentra, el hormigón de proyecto utilizado para cimentación, pilotaje, muros y piezas contra terreno fue un HA-35/B/20/IIIb+Qc, cumpliendo con la normativa vigente. Adicionalmente, en losa y muros, se ha utilizado un producto adicional para la mejora del hormigón frente a la entrada de agresivos y de vida útil.

2.2. Clases de exposición

Desde el punto de vista de la normativa, como, por ejemplo, el Código estructural en su artículo 27 [19], el código técnico de la construcción, EN 206 o Eurocódigos, se pueden clasificar las estructuras en función de la clase de exposición o ambiente en el que se encuentran. En este caso, distintos elementos que conforman la estructura, están en ambientes agresivos diferentes, el resumen de éstos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de ambientes agresivos según elementos de la estructura.

	Losa cimentación	Muros semienterrados	Pilares	forjado
Ambiente exposición (EHE-08)	IIIb+Qc	IIIb+Qc	IIIa	IIIa
Ambiente exposición (Código Estructural)	XS2-XA3	XS2-XA3	XS1	XS1

2.3. Sistema de monitorización

Teniendo en cuenta la tipología de elementos, ambiente de exposición y posible tipo de degradación futura, se realizó la selección de las zonas críticas de la estructura y se determinaron las zonas de colocación de los sensores de la monitorización para el seguimiento de la corrosión en la estructura. Se seleccionaron los siguientes elementos: la losa, los muros (teniendo en cuenta las orientaciones y condiciones de exposición, enterrados y aéreos) y los pilares. En total 18 puntos para la medida de velocidad de corrosión y potencial de corrosión.

El sistema diseñado para esta estructura está basado en sensores electroquímicos capaces de medir simultáneamente potencial de corrosión (E_{corr}) y velocidad de corrosión (I_{corr}). Ambos parámetros están relacionados directamente con los procesos de corrosión de los armados embebidos en elementos de hormigón. La velocidad de corrosión cuantifica con precisión la pérdida de sección en los armados embebidos en el hormigón debido a procesos de corrosión por presencia de iones cloruros o fenómenos de carbonatación en el hormigón de estudio.

Una vez colocados en la armadura montada (véase Figura 2), se hormigona y se lleva el cableado de cada uno de ellos a un armario donde está colocado el sistema de medida, registro y envío.

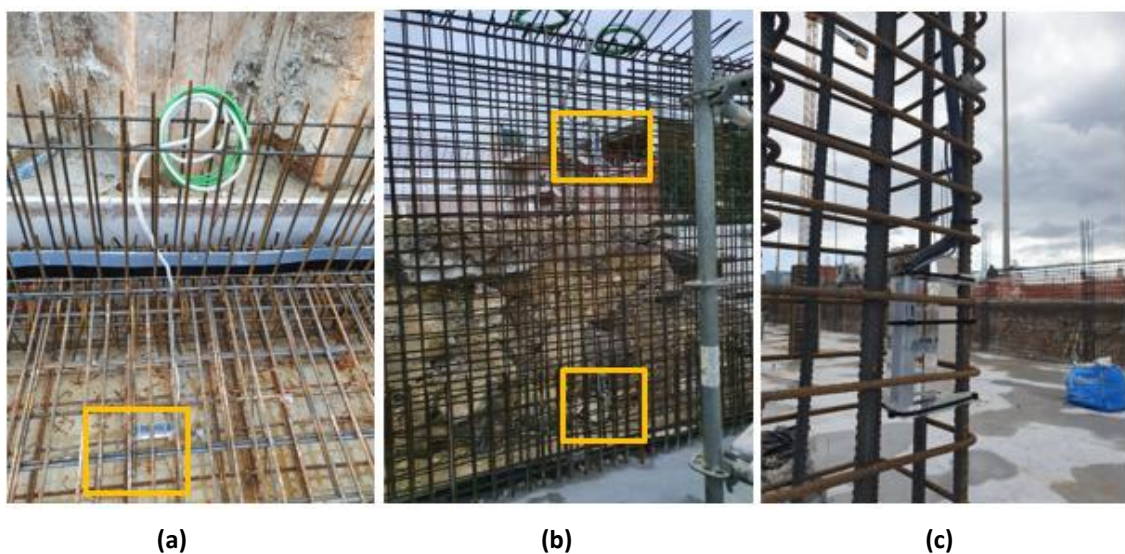


Figura 1. Colocación de sensores: (a) Losa. (b) Muro. (c) Pilar.

Los datos generados y recibidos de forma periódica durante las medidas se analizan de forma automática con herramientas de análisis matemático desarrolladas en el propio Grupo y, si sobrepasan algún límite durante un determinado periodo, saltan alarmas, previamente definidas con el petionario, que se visualizan directamente en una aplicación móvil generada para la estructura (Véase Figura 3).

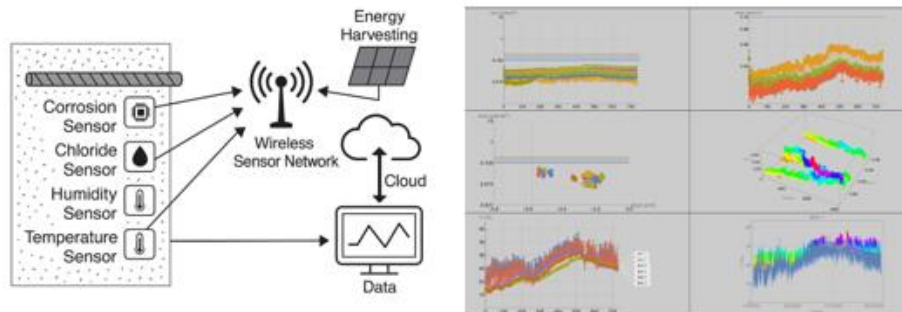


Figura 3. Ejemplo de recogida, envío y visualización de datos en aplicación móvil configurada.

En este sentido, se lleva a cabo un seguimiento de la evolución de la estructura con la posibilidad de realizar un informe trimestral, anual, bianual..., el cual conlleva la explicación del comportamiento y discusión de posibles acciones futuras para el mantenimiento predictivo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados de velocidad de corrosión, I_{corr} , obtenidos en la estructura monitorizada en función de la clase de exposición y tipo de elemento.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la velocidad de corrosión en la estructura construida en 2022 durante el tiempo de monitorización. Los resultados registrados han sido obtenidos de los diferentes elementos, pilares, losa y muros.

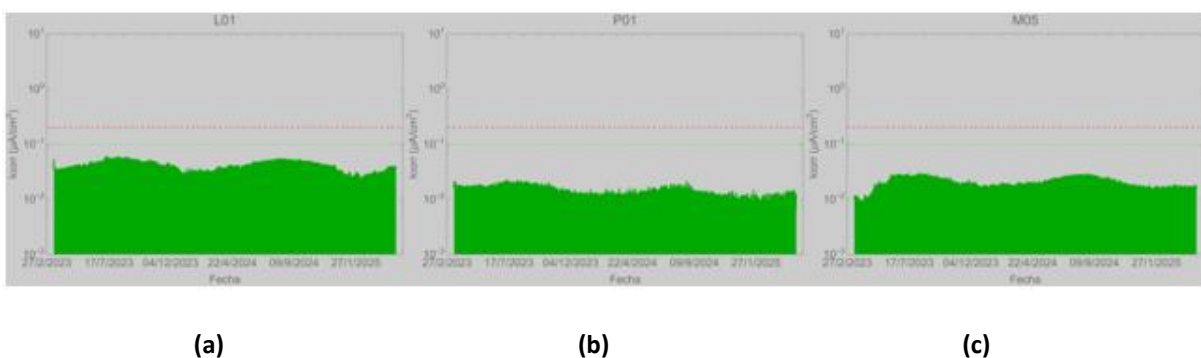


Figura 4. Velocidad de corrosión en elementos de la estructura monitorizada desde 2022: **(a)** Losa. **(b)** Pilar. **(c)** Muro.

Como se observa, se aprecian diferencias de velocidad de corrosión según el elemento y por tanto su ambiente de exposición, aunque todos los elementos tienen valores de corrosión despreciables, no hay que olvidar que es una obra de nueva construcción, el pilar es el que mejor comportamiento tiene en el tiempo, debido a que su ambiente es menos agresivo que el del muro y la losa, que tienen mayor

velocidad de corrosión. Para comparar la evolución de los elementos monitorizados de manera fácil, se realizan figuras de seguimiento como las mostradas en la Figura 5 (en la parte izquierda y la relación entre i_{corr} y E_{corr} en la parte derecha), donde se observa que la losa (naranja) está teniendo una evolución más rápida de corrosión que los muros y los pilares (azul y verde respectivamente) y, por tanto, es la que debe de ser tomada en cuenta de manera especial en el plan de mantenimiento de la estructura.

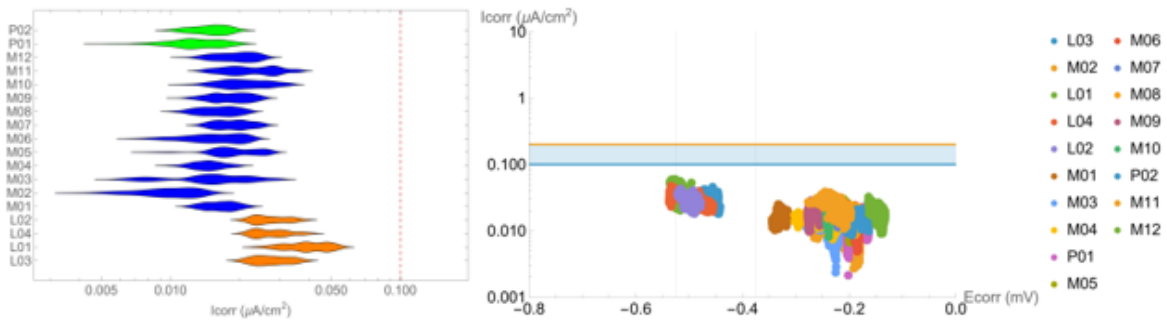


Figura 5. Evolución de velocidad de corrosión y del potencial de corrosión según elementos.

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} [24,39], 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.

En la Tabla 2 se resume la pérdida de sección media del refuerzo que han tenido los elementos monitorizados durante los 4 años expuestos al ambiente de trabajo. Como se observa la pérdida es despreciable, pero se establece un comportamiento diferente entre la losa de cimentación y muros y pilares.

Tabla 2. Resumen de pérdida de sección media de refuerzo de los elementos monitorizados en 4 años.

	Losa cimentación	Muros semienterrados	Pilares
Pérdida de sección (μm)	1.25	0.88	0.65

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede hacer un plan de mantenimiento predictivo a medida para la estructura, que tenga en cuenta los elementos que comenzarán a tener corrosión más importante y, que, por tanto, necesitan un mantenimiento exhaustivo frente a los demás, consiguiendo un ahorro importante y un aumento de vida útil.

El sistema de monitorización permite distinguir entre las fases que contempla la vida útil de una estructura de hormigón debida a la corrosión del refuerzo, de esta manera se observa que la estructura a día de hoy se mantiene en la fase de iniciación, pero se podrá controlar el momento del cambio en el que pase a la fase de propagación, y ver si esta fase tiene una cinética acelerada mucho antes de que pueda generar daños importantes en la estructura. Este adelanto es clave para un buen mantenimiento que alargue la vida de la estructura y la haga más sostenible.

4. CONCLUSIONES

Este estudio presenta los resultados de la velocidad de corrosión de los diferentes elementos de la estructura situada en ambientes XS1 y XS2+XA3. La evolución del comportamiento encontrado en estos 4 años de vida ayuda a clasificar las zonas de la estructura, que serán más sensibles a someterse a un plan de mantenimiento exhaustivo frente a las demás, en este caso la losa de cimentación que está expuesta al nivel freático marino se diferencia claramente de las demás.

La pérdida de sección de la armadura es el parámetro 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 o de mejora de comportamiento que pueden aplicarse según la normativa para el aumento de la vida útil de la estructura.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Xia, T. Li, J.-X. Fang, W. Jin, Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete, *Construction and Building Materials* 228 (2019) 116745. <https://doi.org/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 Materials Degradation* (2017) 4. <https://doi.org/10.1038/s41529017-0005-2>.
- [3] L. Schueremans, D. Van Gemert, S. Giessler, Chloride penetration in RC-structures in marine environment Long term assessment of a preventive hydrophobic treatment, *Construction and Building Materials* (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, *Cement and Concrete Composites* (2016) 144– 152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.emconcomp.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. Fullea, C. Andrade, Corrosion-induced brittle failure in reinforcing steel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* (2017) 229–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.08.006>.
- [8] J. Sanchez, J. Fullea, C. Andrade, Fractosurface mobility mechanism in high-strength steel wires. *Engineering Fracture Mechanics* (2017) 410– 422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.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, *Construction and Building Materials* (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, *Construction and Building Materials* (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. SanchezGalvez, L. Caballero, Environment sensitive cracking of prestressing steels, *Corrosion Science* (1982) 379–405. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWS-48JKXT-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* (2023) 189–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.202200170>.
- [14] J. Sanchez, J. Fullea, C. Andrade, *Stress Corrosion Cracking of High Strength Steels*, 2007.
- [15] J. Sanchez, J. Fullea, C. Andrade, P.L. De Andres, Hydrogen in α -iron: Stress and diffusion, *Condensed Matter and Materials Physics* (2008). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.014113>.
- [16] J. Sanchez, J. Fullea, C. Andrade, C. Alonso, Stress corrosion cracking mechanism of pre-stressing steels in bicarbonate solutions, *Corrosion Science* 49 (2007) 4069–4080. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.025>.
- [17] J. Sanchez, J. Fullea, C. Andrade, Fracture toughness variation induced by stress corrosion cracking of prestressing steels, *Materials and Corrosion* (2008) 139–143. <https://doi.org/10.1002/maco.200804171>.
- [18] J. Sanchez, C. Andrade, J. Fullea, Reasons for crack arrest in stress corrosion cracking tests - Crack propagation rate in high-strength steels, *Corrosion* (2009) 368–375. <https://doi.org/10.5006/1.3319142>.

- [19] Código Estructural. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio de 2021.
- [20] 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* (2022) e01582. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01582>.
- [21] 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/10.1016/j.cscm.2023.e02390>.
- [22] F. Vecchi, B. Belletti, L. Franceschini, C. Andrade, J. Rodriguez, S.J. Montero, Flexural Tests on Prestressed Beams Exposed to Natural Chloride Action, in: *Fib (Ed.), December 0, Proceedings of the fib CACRCS DAYS 2020, 2021: pp. 205–212*.
- [23] 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* (2020). <https://doi.org/10.1002/suco.202000205>.
- [24] N. Rebolledo, J. Torres, S. Chinchón-Payá, J. Sánchez, S. de Gregorio, M. Ordóñez, I. López, M. Ordóñez, I. López, M. Ordóñez, I. López, Monitoring in a reinforced concrete structure for storing low and intermediate level radioactive waste. Lessons learnt after 25 years, *Nuclear Engineering and Technology* (2023) 1199–1209. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.12.004>.
- [25] J. Sanchez, C. Andrade, J. Fulla, Hydrothermal monitoring using embedded sensors of the actual roof system of the Prado Museum, *Constr Build Mater* (2010) 2579–2589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.018>.
- [26] 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 containers of El Cabril disposal (Spain), *Journal of Nuclear Materials* (2006) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.06.015>.
- [27] Ø. Vennesland, M. Raupach, C. Andrade, Recommendation of Rilem TC 154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete” measurements with embedded probes, *Material Structure* (2007) 745–758. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>.
- [28] 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.
- [29] 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>.
- [30] E. Garcia, J. Torres, N. Rebolledo, R. Arrabal, J. Sanchez, Corrosion of Steel Rebars in Anoxic Environments. Part I: Electrochemical Measurements, *Materials* (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14102491>.

- [31] 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* (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14102547>.
- [32] J. Warkus, M. Raupach, J. Gulikers, Numerical modelling of corrosion – Theoretical backgrounds , *Materials and Corrosion* (2006) 614–617. <https://doi.org/10.1002/maco.200603992>.
- [33] J. Sanchez, C. Andrade, J. Torres, N. Rebolledo, J. Fullea, Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements, *Material Structure* (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527016-0884-7>.
- [34] C. Andrade, J. Sanchez, J. Fullea, N. Rebolledo, F. Tavares, On-site corrosion rate measurements: 3D simulation and representative values, *Materials and Corrosion* (2012) 1154–1164. <https://doi.org/10.1002/maco.201206775>.
- [35] S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade, I. Rzmari bona, Errors introduced by the guard ring device in the on-site measurement of rebar corrosion rates, 1990.
- [36] 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, *Cement Conceter Composite* (2014) 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>.
- [37] M. Keddami, X.R. Nóvoa, B. Puga, V. Vivier, Impedance based method for noncontact determination of the corrosion rate in buried metallic structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2011) 1097–1103. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9695296>.
- [38] C. Andrade, J. Sanchez, I. Martinez, N. Rebolledo, Analogue circuit of the inductive polarization resistance, *Electrochim Acta* (2011) 1874–1880. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.09.057>.
- [39] N. Rebolledo, J.E. Torres, A. Silva, J. Sánchez, Monitoring of Reinforced Concrete Corrosion: Active and Passive Bars Exposed to Climate, *Applied Sciences* (2024). <https://doi.org/10.3390/app14114665>.