

# DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS DE CONSTRUCCIÓN: ACERO AL CARBONO Y ACERO INOXIDABLE

*L. Abreu<sup>1,2</sup>, J. Sánchez<sup>1</sup>, R. Arrabal<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC), Serrano Galvache, 4, Madrid 28033, España, [luana.abreu@ietcc.csic.es](mailto:luana.abreu@ietcc.csic.es)

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Químicas - Universidad Complutense de Madrid, Avda. Complutense s/n, Madrid 28040, España.

**Resumen:** Este estudio propone una metodología experimental y numérica para evaluar la corrosión y su impacto mecánico en armaduras de hormigón. Se compararon acero al carbono y aceros inoxidable dúplex EN 1.4362 y EN 1.4462 (2304 y 2205 respectivamente) mediante ensayos electroquímicos en medio alcalino con cloruros, complementados con perfilometría óptica y simulación FEM para analizar el efecto de picaduras sobre la capacidad portante. Aunque los inoxidables presentan menor velocidad de corrosión, el daño localizado puede comprometer la integridad estructural, lo que sugiere revisar umbrales normativos y optimizar criterios de diseño para estructuras más seguras y durables.

**Palabras clave:** corrosión localizada, acero inoxidable dúplex, hormigón armado, técnicas electroquímicas, durabilidad estructural.

## 1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón armado es uno de los materiales más utilizados en construcción por su resistencia y durabilidad. Sin embargo, su vida útil puede verse afectada por factores de exposición ambiental, lo que puede comprometer la seguridad estructural. Garantizar su durabilidad es esencial para prolongar la vida útil y reducir costos de mantenimiento [1, 2].

Aunque el hormigón forma una matriz sólida tras la hidratación del cemento, su naturaleza porosa permite la penetración de agentes agresivos como cloruros y CO<sub>2</sub> [3]. Esta porosidad, junto con la alcalinidad (pH ≈ 12,5), determina la protección del acero embebido. Sin medidas preventivas, estructuras en ambientes marinos pueden durar solo 20-50 años, mientras que en entornos urbanos alcanzan 50-75 años. Estrategias como protección catódica, recubrimientos y materiales de baja permeabilidad pueden extender la vida útil a más de 100 años [1].

### 1.1. Corrosión del acero de refuerzo.

La corrosión electroquímica ocurre cuando el acero entra en contacto con medios electrolíticos, formando celdas anódicas y catódicas. En hormigón, la capa pasiva que protege el acero se destruye principalmente por:

- Cloruros, que inducen picaduras localizadas (umbral crítico: 0,15%-0,4% respecto al peso de cemento) [2].
- Carbonatación, que reduce el pH por debajo de 9, favoreciendo la corrosión.

El modelo de Tuutti divide la vida útil en dos fases: iniciación (pérdida de pasividad) y propagación (deterioro crítico) [3].

### 1.2. Acero inoxidable como solución.

Para ambientes agresivos, el acero inoxidable ofrece alta

resistencia a la corrosión gracias a su capa pasiva autorregenerativa de óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [4]. Su resistencia a picaduras se evalúa mediante el índice PREN, basado en su contenido en Cr, Mo y N. El uso de acero inoxidable permite diseñar estructuras con vida útil superior a 100 años y reducir costes de mantenimiento [4]. Un ejemplo es el puente Hong Kong-Zhuhai-Macau, que emplea acero dúplex EN 1.4362 para garantizar 120 años de servicio.

Este trabajo busca caracterizar el fenómeno de corrosión en aceros al carbono corrugados y diferentes grados de acero inoxidable, evaluando su impacto en el desempeño mecánico de las estructuras.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se estudiaron tres tipos de acero en barras corrugadas de 12 mm: un acero al carbono (B500 SC) y dos inoxidables dúplex (EN 1.4362 – 2304 y EN 1.4462 – 2205). La caracterización microestructural se realizó mediante preparación metalográfica (lijado, pulido y ataque), usando Nital al 2% para el acero al carbono y electropulido para los inoxidables. Las observaciones se efectuaron con microscopía óptica, y se calculó el índice PREN [2] (26.0 para 2304 y 36.2 para 2205).

Para los ensayos electroquímicos, las muestras se cortaron en secciones de 1 cm, embutidas en resina epoxi y conectadas eléctricamente. Se empleó una solución saturada de Ca(OH)<sub>2</sub> con 3% NaCl. Se aplicaron tres técnicas:

- Polarización cíclica: Barrido de potencial entre -1.2 V y +1.8 V (vs Ag/AgCl) a 0.1667 mV/s, según ASTM G61, utilizando un potenciostato Autolab PGSTAT100N. Se determinaron E<sub>corr</sub>, E<sub>r</sub> y E<sub>pr</sub> (repasivación) [5].

- Cronoamperometría: Potenciales fijos (0.8–1.5 V según acero) para registrar corriente en función del tiempo [6].
- Cronopotenciometría: Corriente constante de 10 mA para evaluar la evolución del potencial y la estabilidad electroquímica bajo condiciones activas [6].

La topografía post-corrosión se analizó mediante perfilometría óptica (InfiniteFocusSL, ALICONA), obteniendo imágenes 2D y mapas 3D para calcular pérdida de volumen y profundidad de picaduras.

Finalmente, se desarrolló un modelo numérico FEM en COMSOL Multiphysics para simular el impacto mecánico de picaduras en barras de acero. Se modeló una barra cilíndrica con defectos semicirculares de 0.2–3.6 mm de profundidad, aplicando carga axial hasta plastificación. El análisis incluyó tensiones de von Mises y curvas fuerza-desplazamiento, demostrando la reducción significativa de capacidad portante con el aumento del daño localizado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1. Caracterización de los aceros.

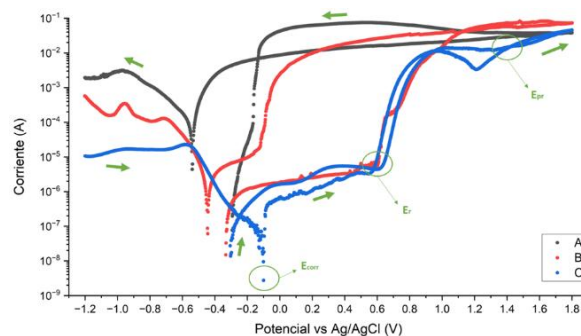
El análisis metalográfico mostró diferencias importantes entre los materiales. El acero al carbono (A) presentó una microestructura heterogénea, con núcleo ferrítico-perlítico y capa externa martensítica, producto del proceso Tempcore, lo que explica su mayor susceptibilidad a la corrosión en presencia de cloruros.

Los aceros inoxidables dúplex (B y C) exhibieron una estructura bifásica típica, con ferrita y austenita distribuidas homogéneamente, además de inclusiones de carbonitruros de titanio que previenen la sensibilización intergranular. El acero 2205 destacó por granos más finos y distribución más uniforme que el 2304, lo que le otorga mayor resistencia mecánica y superior comportamiento frente a la corrosión localizada.

#### 3.2. Curvas de polarización.

Las curvas de polarización cíclica (Figura 1) mostraron diferencias marcadas:

- Acero al carbono (A):  $E_{corr} = -0.54$  V,  $i_{corr} = 3.861$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Sin región pasiva, indicando corrosión activa y uniforme. La superficie post-ensayo evidenció deterioro generalizado, especialmente en la zona martensítica.
- Dúplex 2304 (B):  $E_{corr} = -0.44$  V,  $i_{corr} = 0.054$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Presentó pasividad y potencial de picadura en  $-0.13$  V, con cierta repasivación ( $\approx 1.10$  V). Se observaron zonas metálicas y acumulación localizada de productos de corrosión.
- Dúplex 2205 (C):  $E_{corr} = -0.10$  V,  $i_{corr} = 0.002$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Amplia región pasiva, picadura en  $0.60$  V y repasivación en  $1.40$  V. Superficie prácticamente intacta, confirmando alta resistencia.



**Figura 1.** Curvas de polarización cíclica obtenidas para el acero al carbono (A), el acero inoxidable dúplex 2304 (B) y el 2205 (C) en solución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\%$  NaCl.

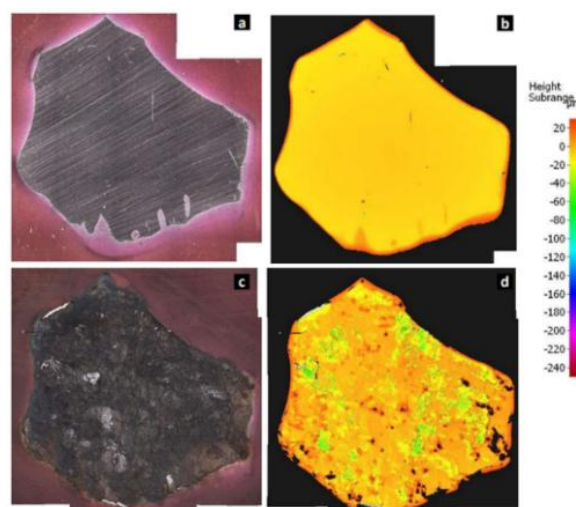
#### 3.3. Pérdida de volumen por corrosión.

Los ensayos de cronopotenciometría, aplicando 10 mA durante cuatro etapas (24 C acumulados), permitieron estimar la pérdida de volumen teórica mediante la Ley de Faraday y compararla con la pérdida real obtenida por perfilometría óptica. Los resultados muestran:

- El acero al carbono presentó la mayor pérdida ( $0.220$   $\text{mm}^3$  en t4), con corrosión generalizada.
- El acero 2304 mostró pérdida moderada ( $0.057$   $\text{mm}^3$ ), mientras que el 2205 apenas alcanzó  $0.035$   $\text{mm}^3$ .
- La discrepancia entre volumen teórico y real se atribuye a reacciones secundarias, principalmente evolución de oxígeno.

En las Figuras 2, 3 y 4: a y b) representan perfilometrías en el tiempo t1; c y d) en el tiempo t4. A la izquierda, imágenes en color real; a la derecha, imágenes coloreadas en función de la profundidad.

Las figuras ilustran la evolución de la pérdida de volumen, confirmando la superior resistencia de los aceros inoxidables, especialmente el 2205.



**Figura 2.** Perfilometría de la muestra A.

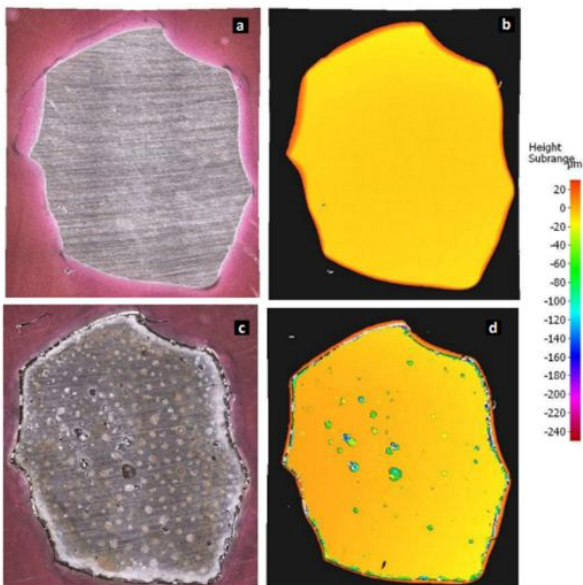


Figura 3. Perfilometría de la muestra B.

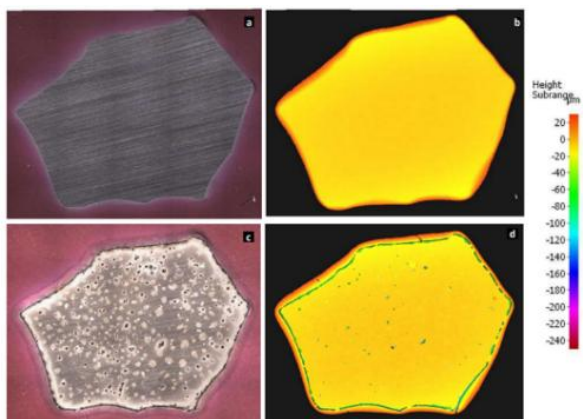


Figura 4. Perfilometría de la muestra C.

### 3.4. Análisis de picaduras.

El estudio topográfico permitió cuantificar la profundidad máxima para posteriormente calcular el factor de picadura ( $\alpha$ ), definido como la relación entre la profundidad máxima y la pérdida media de sección. Los resultados muestran:

- El acero al carbono presentó picaduras superficiales (máx. 0.079 mm) y  $\alpha$  bajo ( $\approx 12$ ), reflejando corrosión uniforme.
- El acero 2304 alcanzó profundidades de 0.214 mm y  $\alpha \approx 75$ .
- El acero 2205 mostró picaduras de hasta 0.187 mm, pero con  $\alpha > 150$ , indicando daño altamente localizado.

Este comportamiento implica que, aunque la pérdida global de sección es baja en los inoxidables, la concentración de tensiones en picaduras profundas puede comprometer la integridad estructural.

### 3.5. Impacto mecánico.

El modelo numérico de elementos finitos (FEM) simuló barras con picaduras semicirculares de 0.2–3.6 mm (Figura 5). Los resultados evidencian:

- A mayor profundidad, aumenta la concentración de tensiones en torno a la picadura, reduciendo la capacidad portante.
- La relación  $F/F_{max}$  disminuye de forma no lineal con  $P_{max}/D$ : pequeñas picaduras apenas afectan la resistencia, pero defectos mayores provocan pérdidas significativas.
- Las curvas fuerza-desplazamiento pierden linealidad en picaduras profundas, confirmando la localización del fallo.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos [7] validando el modelo propuesto.

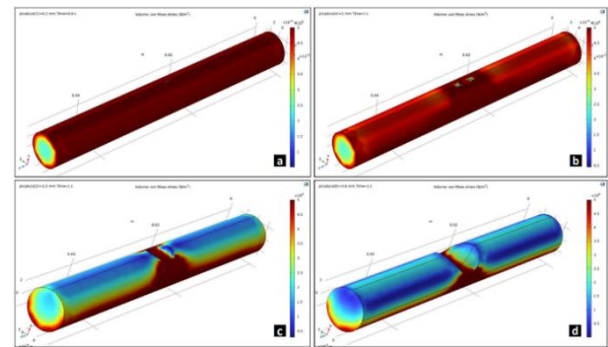


Figura 5. Tensión de von Mises para: a) profundidad de picadura de 0.2 mm y 0.16 mm de alargamiento; b) profundidad de 1.0 mm y 0.20 mm de alargamiento; c) profundidad de 2.2 mm y 0.20 mm de alargamiento; d) profundidad de 3.6 mm y 0.20 mm de alargamiento.

### 3.6. Seguridad estructural.

Combinando los parámetros electroquímicos y mecánicos, se estimó la evolución de la resistencia residual en función del tiempo (Figura 6).

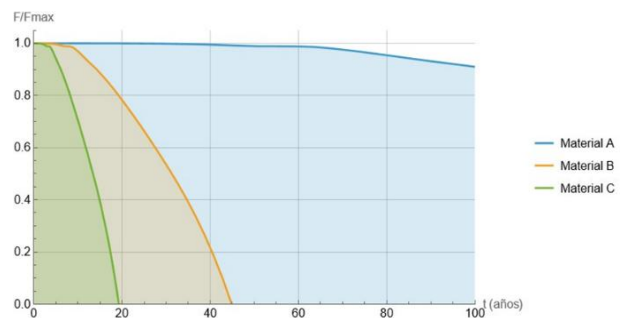


Figura 6. Diagrama de fallo: fuerza máxima relativa frente al tiempo de corrosión de la armadura.

Sorprendentemente, bajo una velocidad de corrosión media de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (utilizado en diversas normativas), los aceros inoxidables pierden capacidad más rápido que el acero al carbono debido a su elevado factor de picadura. El acero 2205 alcanza el 90% de  $F/F_{max}$  en solo 6 años, frente a más de 90 años para el acero al carbono.

Este resultado cuestiona los umbrales normativos actuales ( $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) y sugiere reducirlos a  $0.01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para inoxidables, evitando diseños inseguros.

#### 4. CONCLUSIONES.

Se desarrolló una metodología experimental y numérica para evaluar el efecto de la corrosión localizada en armaduras de hormigón, considerando su impacto electroquímico y mecánico. Principales hallazgos:

- El acero al carbono mostró corrosión uniforme y mayor pérdida de material, mientras que los aceros dúplex presentaron corrientes mucho menores, pero con picaduras profundas que reducen la capacidad portante.
- El modelo FEM confirmó que el incremento en la profundidad de picaduras concentra tensiones y acelera el fallo estructural, incluso con baja pérdida de volumen.
- El umbral normativo de  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  no es adecuado para inoxidables. Se propone reducirlo a  $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para garantizar una vida útil segura.
- Como línea futura, se recomienda ampliar el estudio a más muestras y condiciones no aceleradas para validar la metodología y aproximarse al comportamiento en servicio.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] L. Bertolini, "Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 123–137, Apr. 2008, doi: 10.1080/15732470601155490.
- [2] A. Pachón, "Durabilidad de las armaduras corrugadas de acero inoxidable en estructuras de hormigón armado en ambientes marinos," Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2017.
- [3] C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, and P. Castro, "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar," *Cem Concr Res*, vol. 30, no. 7, pp. 1047–1055, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00265-9.
- [4] F. Lollini, M. Carsana, M. Gastaldi, and E. Redaelli, "Corrosion behaviour of stainless steel reinforcement in concrete," *Corrosion Reviews*, vol. 37, no. 1, pp. 3–19, 2019, doi:10.1515/corrrev-2017-0088.
- [5] E. G. García, "Estudio de corrosión de estructuras en ambientes con bajos contenidos en oxígeno," Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2020.
- [6] W. Feng, A. Tarakbay, S. Ali Memon, W. Tang, and H. Cui, "Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review," *Constr Build Mater*, vol. 289, p. 123165, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123165>.
- [7] S. Zeng, S. Gu, S. Ren, Y. Gu, C. Kong, and L. Yang, "A Modeling Method for Finite Element Analysis of Corroded Steel Structures with Random Pitting Damage," *Buildings*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/buildings12111793.