

Comparative study of the mechanical behavior of stainless steel and carbon steel reinforcements, depending on their degree of corrosion

Julia Laura-Quispe ^{*,a,b} , Edwin Pino ^a , María Isabel Prieto ^b , Alfonso Cobo ^b ,

^aUniversidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores s/n - Ciudad Universitaria, Tacna, Perú

^bEscuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 28040, España.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i3.49>

Abstract.- In this work, the mechanical behavior of stainless steel rebars was experimentally evaluated, as a function of their degree of corrosion, in comparison with the mechanical behavior of carbon steel. For this purpose, 16 mm diameter rebars of stainless steel and carbon steel, corroded in an accelerated way in a previous stage and with the presence of chloride ion as a triggering factor, were subjected to tensile tests in order to study the effect of corrosion on their mechanical properties and ductility based on the concept of equivalent steel. From the results it was possible to verify that the influence of corrosion on stainless steels is much lower than that of carbon steel, complying with the minimum values established in the European standards for reinforced concrete structures (CM-90, EC2 and EHE).

Keywords: Steel; pitting corrosion; ductility.

Estudio comparativo del comportamiento mecánico de armaduras de acero inoxidable y al carbono, en función de su grado de corrosión

Resumen.- En este trabajo se evaluó experimentalmente el comportamiento mecánico de armaduras de acero inoxidable y al carbono en función de su grado de corrosión, en comparación con el comportamiento mecánico del acero al carbono. Para ello se sometieron a ensayos de tracción barras corrugadas de acero inoxidable y acero al carbono de 16 mm de diámetro corroídas de forma acelerada en una etapa anterior y con un factor desencadenante la presencia del ion cloruro, con el fin de estudiar el efecto de la corrosión sobre sus propiedades mecánicas y su ductilidad en base al concepto de acero equivalente. A partir de los resultados se pudo comprobar que la influencia de la corrosión a los aceros inoxidables es mucho menor a los del acero al carbono, cumpliendo con los valores mínimos que se establecen en la normativa europea con respecto a estructuras de hormigón armado (CM-90, EC2 y EHE).

Palabras clave: Acero; corrosión por picaduras; ductilidad.

Recibido: 06 de septiembre, 2021.

Aceptado: 19 de noviembre, 2021.

1. Introducción

La corrosión es un fenómeno natural que genera el deterioro de un material y resulta de una reacción química o electroquímica con su entorno. La contaminación del hormigón por cloruros, es la más común y generalmente es causada por compuestos salinos en el aire, sal de deshielo y/o agregados contaminados con cloruro [1], [2].

La corrosión afecta el comportamiento de tracción de las barras de acero, reduce el área de

la sección transversal, por lo tanto, la capacidad de carga de las barras y la pérdida de ductilidad, además induce una reducción no uniforme en el área de la sección transversal a lo largo de la longitud de las barras (corrosión por picadura) y, por lo tanto, disminuye la capacidad de deformación de las barras [3, 4, 5, 6, 7, 8].

La corrosión inducida por cloruro de las armaduras de acero ha sido un factor vital para evaluar la durabilidad de las estructuras del hormigón armado, expuestas a ambientes marinos, como los edificios, puentes con estructura de acero, plantas y las plataformas oceánicas y el desarrollo del modelo de penetración de cloruros es esencial para predecir la vida útil [4, 9, 10, 11].

Existen muchos métodos de prevención de

* Autor para correspondencia:

Correo-e:jlauraq@unjbg.edu.pe (J. Laura)

la corrosión y aumento de la vida útil de las estructuras, uno de ellos es el uso del acero inoxidable que contiene cromo, con un contenido mínimo de 10,5 % que le proporciona una mayor resistencia a la corrosión. Existen varios tipos, pero solo el acero inoxidable austenítico y el acero inoxidable ferrítico-austenítico (dúplex) son relevantes como refuerzo [4, 12, 13, 14].

Actualmente, la corrosión causa costos considerables en los procesos de reparación y reemplazo de estructuras dañadas, por lo que el deterioro progresivo de la infraestructura, conlleva una inversión estimada de \$ 100 mil millones para el mantenimiento y reparación de estructuras corroídas en todo el mundo [15, 16].

En las estructuras de ingeniería civil de hormigón armado, la corrosión representa el 80 % de las patologías observadas y el 3 a 4 % del producto bruto interno (PIB) en los países industrializados según la Organización Mundial de la Corrosión (OMA) [17, 18, 19].

A pesar de que el costo de las barras corrugadas de acero inoxidable es de 4 a 7 veces más que el de acero al carbono, el uso de acero inoxidable tiene un costo aceptable, ya que presenta beneficios económicos complementarios a los ambientales con respecto al acero al carbono [2, 9, 12].

Durante la década de 1990 en Europa, se define al acero equivalente como aquel que presenta las mismas prestaciones de ductilidad que los definidos en las clases del Eurocódigo2 (EC-2) o el Código Modelo CEB-FIP (CM-90), aunque puede que no alcance el mínimo valor de alguno de los requerimientos exigidos [2, 17].

Existen diferentes criterios para el cálculo del acero equivalente, en la Tabla 1, se muestran los parámetros de ductilidad, y entre los criterios más usados se tiene el de E. Cosenza, Greco y Manfredi [20], expresados en las ecuaciones (1) y (2),

$$\begin{aligned}
 p &= \varepsilon_{max}^{0,73} \left(\frac{f_{max}}{f_y} - 1 \right)^{0,92} \\
 &= \varepsilon_{max}^{0,75} \left(\frac{f_{max}}{f_y} - 1 \right)^{0,90}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 p &= \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,90} ((\varepsilon_{max} - \varepsilon_{sh}) \\
 &\quad + 4(\varepsilon_{sh} - \varepsilon_{max})^{0,75}) \\
 &\cong \left(\frac{f_s}{f_y} - 1 \right)^{0,90} (\varepsilon_{max} + 3\varepsilon_{sh})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

La propuesta de Creazza y Russo [21], queda indicada en las ecuaciones (3) y (4),

$$A_{nom}^* = \frac{2}{3} (f_{max} - f_y) (\varepsilon_{max} - \varepsilon_y) \tag{3}$$

$$A_{nom}^* = \frac{2}{3} (f_{max} - f_y) (\varepsilon_{max} - \varepsilon_y) \tag{4}$$

El Índice de tenacidad (I_d) es propuesto por Ortega [22], según la ecuación (5),

$$I_d = \frac{T}{EE} = 1 + \left(1 + \frac{f_{max}}{f_y} \right) \left(\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \tag{5}$$

Tabla 1: Parámetros de ductilidad mínimos exigidos para barras de acero de acuerdo a los códigos europeos CM-90, EC-2 y EHE [3]

Parámetros	CM-90	EC-2	EHE
f_s/f_y	1,15	1,15–1,35	1,15–1,35
ε_{max} (%)	6 %	7,5 %	8 %
p	0,69	0,82	0,86
A_{nom}^* (N/mm ²)	2,87	3,6	3,87
I_d	50,45	63,35	67,65

Numerosos trabajos estudian los mecanismos que controlan la corrosión del refuerzo, sin embargo, la influencia de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero ha sido un tema poco estudiado.

Estudios recientes han declarado cambios importantes en el diagrama de curva de tensión-deformación del acero corroído, demostrando una disminución sistemática de la deformación bajo la tensión máxima, ya que el grado de corrosión aumenta hasta valores que, en muchos casos, caen por debajo del mínimo requerido por las normas y reglamentos. En estos casos, el uso del concepto de acero equivalente como criterio de ductilidad, basado en la consideración conjunta

de la deformación bajo tensión máxima y el cociente entre máximo esfuerzo y límite elástico, es ventajoso [3, 8].

La utilización del acero inoxidable corrugado crece cada vez como barra de refuerzo para estructuras de hormigón, por su excelente resistencia a la corrosión por cloruros, su alta dureza, ductilidad y su estimación de la vida útil de servicio. Por lo tanto, se considera un material atractivo para el sector de la construcción gracias a sus excelentes propiedades mecánicas y su poco mantenimiento e inspecciones, que hacen más duradero el servicio del hormigón armado. Por ello en la actualidad se están construyendo puentes y estructuras costeras con hormigón armado de acero inoxidable, pero el uso se limita a las regiones más expuestas de la estructura y a los elementos de alto riesgo.

También se utilizan para la restauración de estructuras con interés artístico o que ya han sufrido graves daños por corrosión mucho antes del final de su vida útil prevista [9, 23].

El primer uso del armado de acero inoxidable fue en 1941 en el embarcadero de Progreso, en el Golfo de México, en su estructura se utilizó un acero equivalente al actual grado EN 1.4301 (AISI 304) para armar los arcos del embarcadero, que se extiende 2 km mar adentro. En la actualidad, la estructura está en perfecto estado de uso, sin necesidad de reparaciones significativas, mientras que un segundo embarcadero construido a su lado en 1969, con armado de acero al carbono, ha desaparecido casi por completo [23].

En países como los de América del norte y Europa hay aplicación de barras corrugadas de acero inoxidable en estructuras de hormigón armado, en caso de España todavía es escasa su uso, y estos países han realizado investigaciones sobre su influencia en la corrosión del acero, sin embargo, en Perú, no se tiene investigaciones propias que traten sobre la influencia de la corrosión sobre los aceros inoxidables.

Este trabajo se realiza con el fin de generar y dar información que permita conocer y evaluar el comportamiento mecánico de armaduras de acero inoxidable dúplex de baja aleación EN 1.4482 (AISI 2001) en función a su grado de corrosión, comparándolas con las propiedades mecánicas del

acero al carbono (armaduras B500SD) embebidos en hormigón. Las propiedades mecánicas se evaluarán en relación con el concepto del acero equivalente. Esta investigación también tiene la intención de poder de alguna forma contribuir con datos que se puedan utilizar como referencia para mejorar las construcciones y por consiguiente la vida útil de las futuras edificaciones.

2. Metodología o desarrollo de la investigación

2.1. Materiales

Para determinar la evolución de las propiedades mecánicas del acero frente al proceso de corrosión se utilizaron dos tipos de acero: 15 barras corrugadas de acero inoxidable dúplex de baja aleación EN 1.4482 (AISI 2001) (Figuras 1, 2 y 3) y 15 barras corrugadas de acero al carbono B 500 SD (Figuras 4, 5 y 6), ambos tipos de acero con distintos grados de corrosión, los cuales han sido sometidos a corrosión artificialmente realizados en una etapa anterior, en la cual se realizaron 4 losas de hormigón de dimensiones $400 \times 400 \times 100 \text{ mm}^3$, en las que se introdujeron barras de acero B 500 SD y acero inoxidable, ambos de 16 mm de diámetro y 500 mm de longitud aproximadamente. En la fabricación de las losas de hormigón se le han añadido cloruro de calcio para destruir el estado pasivo del acero, en una concentración de cloruro de iones del 2 % por peso de cemento. Después de colocar el hormigón y retirar el encofrado, las losas se curaron en una cámara de humedad a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura y 99 % de humedad durante 28 días.

En la Tabla 2 se presentan las características mecánicas de acero al carbono corrugado de alta ductilidad B 500 SD.

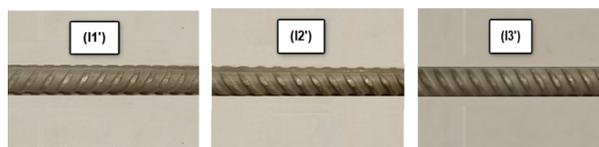


Figura 1: Aceros inoxidables de referencia ($D = 16 \text{ mm}$)

En la Tabla 3 se presentan las características mecánicas del acero inoxidable dúplex de baja

Tabla 2: Características mecánicas mínimas del acero B 500 SD

Características	B 500 SD
Norma de producto	UNE 36065:2000 EX
Límite elástico f_y , (MPa)	500
Carga unitaria de rotura, f_s (MPa)	575
Relación f_s / f_y	$\geq 1,15$ y $\leq 1,35$
Alargamiento bajo carga máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$)	≥ 8
Alargamiento de rotura (A5)	≥ 16
Resistencia a la fatiga	2×10^6 ciclos
Resistencia a la carga cíclica	3 ciclos

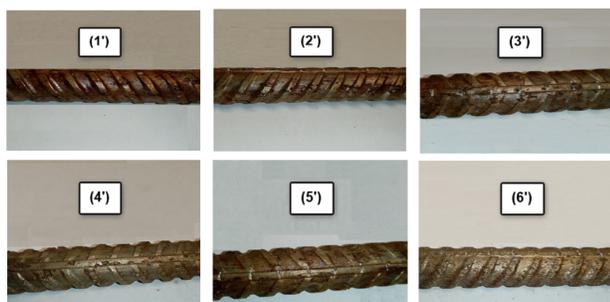


Figura 2: Aceros inoxidables de baja corrosión ($D = 16$ mm)

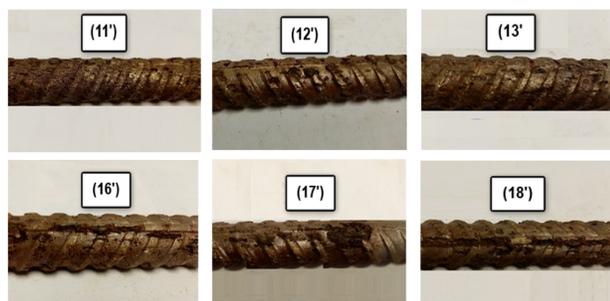


Figura 3: Aceros inoxidables de alta corrosión ($D = 16$ mm)



Figura 4: Aceros al carbono de referencia ($D = 16$ mm)

aleación EN 1.4482 / AISI S32001 (2001), laminado en caliente.



Figura 5: Aceros al carbono de baja corrosión ($D = 16$ mm)



Figura 6: Aceros al carbono de alta corrosión ($D = 16$ mm)

Tabla 3: Características mecánicas del acero inoxidable dúplex de baja aleación EN 1.4482 / AISI S32001 (2001)

Características	AISI S32001
Resistencia en el límite elástico convencional al 0,2 % ($R_p 0,2$)	≥ 500 N/mm ²
Resistencia máxima de tracción o carga unitaria de rotura (R_m)	700-900 N/mm ²
Alargamiento	≥ 20 %

2.2. Técnicas de corrosión acelerada

En una etapa perteneciente a la fase anterior a este trabajo se conectó a las losas a la corriente a los 28 días de permanencia en la cámara húmeda. Se dejaron diferentes tiempos para obtener distintos grados de corrosión en las barras. La densidad de corriente eléctrica aplicada en las losas fue de $i = 50 - 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ por cada barra, obteniéndose barras de baja y alta corrosión para ambos tipos de acero (Figuras 7 y 8).

El grado de corrosión (Q), se determinó por la pérdida gravimétrica, pesando las barras según la



Figura 7: Aceros inoxidables corroídos



Figura 8: Aceros al carbono corroídos

ecuación (6):

$$Q_{corr} = \frac{w_0 - w_s}{w_0}, \quad (6)$$

donde,

Q_{corr} : es la cantidad de corrosión de la armadura (%).

w_0 : es el peso de la armadura antes del proceso de corrosión.

w_s : es el peso de la misma armadura después del proceso de corrosión y después de haber sido sometida a un decapado químico.

Para determinar la sección residual de la armadura, se utiliza el peso específico convencional del acero y se determina siguiendo la definición de sección equivalente (S_{eq}) con la ecuación (7):

$$S_{eq} = \frac{w_s}{7,85 \cdot L_s}, \quad (7)$$

donde:

w_s : es el peso de la parte corroída en gramos.

L_s : longitud corroída.

7,85 el peso específico del acero en g/cm^3 .

Por lo que el diámetro residual de las barras corroídas será determinado con la ecuación (8):

$$\phi_{res} = \sqrt{\frac{4 \cdot w_s}{\phi \cdot 7,85 \cdot L_s}} \quad (8)$$

2.3. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se han realizado a las barras de 16 mm de diámetro, en un total de 30 (15 barras de acero al carbono y 15 de acero inoxidable), con distintos grados de corrosión.

Estos ensayos se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, utilizando una máquina de accionamiento hidráulico y servocontrolada, con mordazas hidráulicas de presión regulable modelo MIB-40-MOD-AM con capacidad de carga de 6104 kp (Figura 9) actualizada mediante el programa informático WINTEST32 como sistema de adquisición de datos de 600 kN de capacidad, equipada con un extensómetro de 50 mm de longitud, JB-MFA-2.

Las varillas se enumeran como probetas (Tablas 4 y 5), luego se procede a medir y pesar para estimar la pérdida de masa en comparación con el peso de las varillas en perfecto estado.

Para comprender la variación del alargamiento final en base a 5 diámetros, se realizan marcas distanciadas a un centímetro con el objeto de identificar una vez producida la rotura.

Posteriormente las barras se sometieron a los ensayos de tracción de acuerdo a las normas UNE-EN ISO 15630-1, UNE 36420 y UNE 36745, [24, 25, 26]. Con una precarga de 1 kN, para el control de carga del tramo elástico y una velocidad de 15 MPa/s y extensómetro hasta la deformación del 2%. Una vez terminado el ensayo se juntaron los dos trozos de la probeta y se mide la longitud final (L_f) para calcular Δl (5Φ) medida que se toma como alargamiento último del acero. En la Figura 10, se muestran algunos de las varillas después del ensayo, en la que se observa la estricción en la zona de rotura en ambos tipos de varillas.

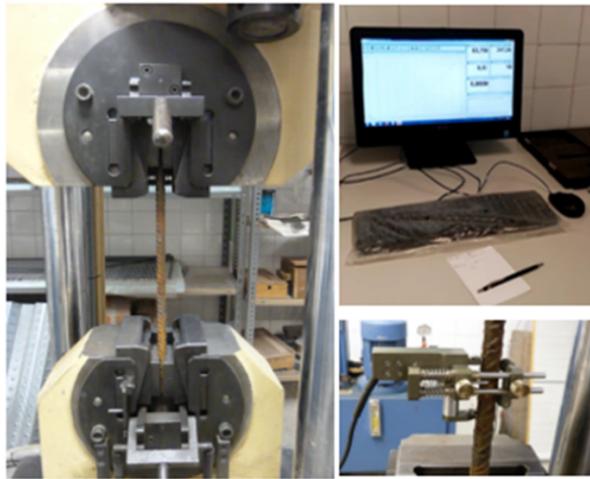


Figura 9: Máquina de accionamiento hidráulico y servocontrolada, sistema procesamiento de datos y detalle del extensómetro de 50 mm, acoplado a una barra Ø16 de acero B500SD



Figura 10: Falla típica del acero inoxidable y acero al carbono

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Ensayos de tracción

En la Tabla 4, se recogen los resultados de los ensayos de tracción de las 30 barras corrugadas, de las cuales se dividen en 2 grupos: aceros inoxidables y los aceros al carbono, y estos a su vez se subdividen en 3 grupos: aceros inoxidables de referencia (3), aceros inoxidables de baja corrosión (6), aceros inoxidables de alta corrosión (6), aceros al carbono de referencia (3), aceros al carbono de baja corrosión (6), y aceros al carbono de alta corrosión (6). En donde la tensión (f_y) se obtiene de la fuerza aplicada en cada ensayo sobre la sección equivalente, y la deformación resulta del alargamiento entre la longitud inicial.

En la Figura 11, se muestran las curvas de tensión-deformación de las 15 barras de acero inoxidable con diferentes grados de corrosión, en este gráfico se puede apreciar la diferencia de la resistencia en el límite elástico, resistencia máxima y de ruptura entre las barras según su grado de corrosión.

En la Figura 12, se muestran las curvas de tensión-deformación de las 15 barras con alta corrosión de acero al carbono B-500-SD con diámetro de 16 mm, en este gráfico se puede ver la diferencia de la resistencia en el límite elástico, resistencia máxima y de ruptura entre las barras, según su grado de corrosión.

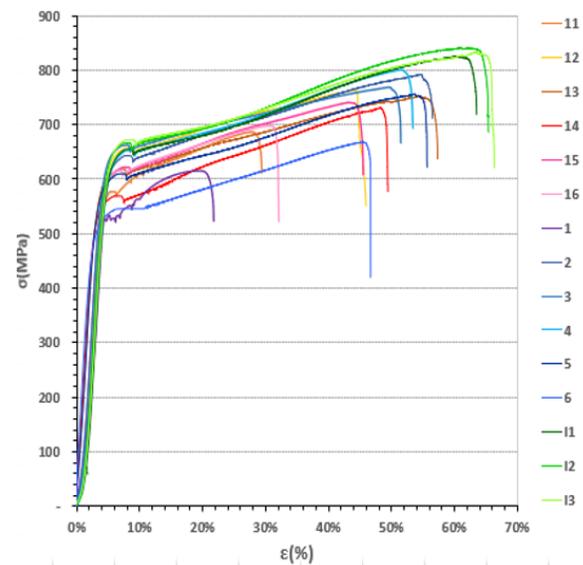


Figura 11: Diagramas de tensión-deformación de las barras de acero inoxidable dúplex de baja aleación EN 1.4482 / AISI S32001 (2001)

3.2. Resultados de ductilidad

Los parámetros de ductilidad de los aceros, se han calculado a partir de los ensayos de tracción, siguiendo los siguientes criterios:

El establecido en las diferentes normativas europeas:

- Relación f_s/f_y o ratio de endurecimiento a tracción.
- Deformación para la carga máxima $\epsilon_{(max)}$ o Agt.

Tabla 4: Resultados de los ensayos de tracción de barras corrugadas de los dos tipos de acero

Acero	Probeta	f_y (MPa)	f_s (MPa)	ϵ_y (%)	$\epsilon_{m\acute{a}x} = A_{gt}$ (%)	$\epsilon_{5\phi}$ (%)	E (MPa)
Inox-ref	I1	602,74	833,48	0,04	54,54	54,13	206.310,00
	I2	566,73	835,48	0,31	55,42	55	198.110,00
	I3	583,18	833,04	0,58	58,04	57,63	186.340,00
Inox-baja corr.	1	517,02	742,15	0,34	44,25	43,88	173.660,00
	2	559,41	791,75	0,38	37,02	36,63	195.860,00
	3	565,44	768,77	0,4	31,26	30,88	196.960,00
	4	552,4	800,9	0,37	46,66	46,26	182.480,00
	5	522,61	755,88	0,3	44	43,63	192.610,00
	6	454,75	667,71	0,26	36,96	36,63	185.070,00
Inox-alta corr.	11	523,43	686,68	0,34	14,84	14,5	196.380,00
	12	550,37	763,57	0,34	33,26	32,88	198.590,00
	13	511,45	753,61	0,31	34,13	33,75	184.410,00
	14	509,24	730,13	0,3	40,37	40	190.540,00
	15	515,89	740,85	0,3	26,75	26,38	194.000,00
	16	531,49	697,95	0,31	19,72	19,38	191.990,00
Carb-ref	R3	571,5	695,04	0,31	21,71	21,38	201.300,00
	R4	573,07	691,03	0,36	7,21	6,88	162.440,00
	R5	573,82	664,65	0,3	9,7	9,38	200.210,00
Carb-baja corr.	21	469,86	575,28	0,29	8,04	7,75	153.490,00
	22	538,27	625,91	0,26	9,94	9,63	203.670,00
	23	528,19	615,66	0,3	11,18	10,88	141.080,00
	25	512,5	608,4	0,25	8,05	7,75	87.220,00
	26	476,98	580,9	0,26	7,42	7,13	158.930,00
	27	486,85	581,96	0,25	12,94	12,65	175.350,00
	Carb-alta corr.	31	479,28	578,42	0,26	5,91	5,63
32		472,84	592,64	0,26	2,8	2,5	199.610,00
33		405,67	501,13	0,21	2,75	2,5	201.320,00
34		504,02	615,26	0,26	10,31	10	201.110,00
35		482,59	539,66	0,24	7,05	6,75	191.260,00
36		484,23	548,58	0,22	6,42	6,13	220.200,00

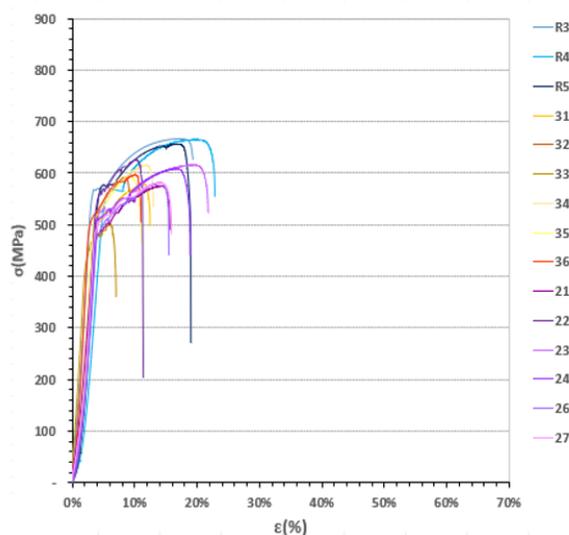


Figura 12: Diagramas de tensión-deformación de las barras de acero al carbono B 500 SD

- El concepto de acero equivalente según Cosenza (parámetro p), Creazza (A_{nom}^*) y Ortega (índice de tenacidad I_d).

En la Tabla 5, se recogen los diferentes parámetros de ductilidad calculados de las barras corrugadas ensayadas, aplicando el concepto de acero equivalente para aceros con características especiales de ductilidad.

3.3. Interpretación estadística y ecuaciones de degradación

En la Figura 13, se representa la comparación de los valores obtenidos en los ensayos de tracción de los dos tipos de aceros obtenidos de la Tabla 4 con respecto a la resistencia en el límite elástico (f_y). La probeta n°6 de los aceros inoxidable no alcanza el valor característico de $f_y = 500$ MPa determinado por la instrucción EHE-08, el resto tiene valores comprendidos entre 509,24 y 602,74 MPa, en caso de la mayoría de los aceros al carbono corroídos presentan valores inferiores a la normativa, los cuales oscilan entre 405,67 y 486,85 MPa.

En la Figura 14, se representa la comparación de los valores obtenidos en los ensayos de tracción de

los dos tipos de aceros obtenidos de la Tabla 4 con respecto a la resistencia máxima (f_s). Los aceros inoxidable a pesar de su grado de corrosión presentan valores superiores a la de determinado por la instrucción EHE-08 la cual es de 575 MPa presentando valores de 833,48 y 667,71 MPa y también presentan valores superiores a los que presentan los aceros al carbono, que están entre 695,04 y 501,13 MPa.

La Figura 15, muestra la comparación de los valores de ratio de endurecimiento f_s/f_y obtenidos en base a los datos de los ensayos de tracción de los dos tipos de aceros y los límites que se establecen en las normativas, refiriéndose al acero de alta ductilidad (B-500-SD), en ella se puede ver que los aceros inoxidable presentan comportamientos buenos en términos de ductilidad que los aceros al carbono, presentando valores entre 1,47 y 1,31 en cambio los aceros al carbono mencionados valores entre 1,22 y 1,12.

En la Figura 16, se representa la comparación de los resultados medios de la deformación máxima (ϵ_{max}) para los dos tipos de acero, y su comparativa con las diferentes normativas, como se ha de esperar los aceros inoxidable con valores comprendidos entre 58,54 % y 26,75 % superan los valores que presentan los aceros al carbono las cuales están comprendidas entre 21,71 % y 6,42 %.

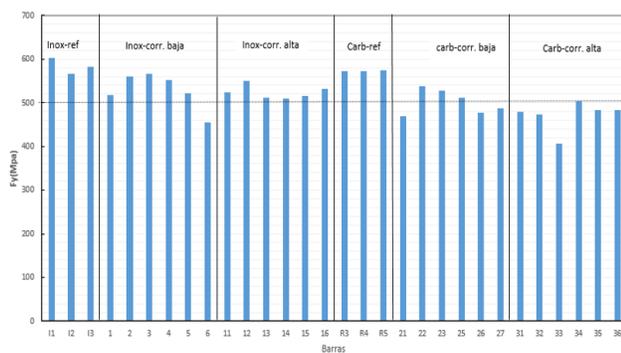


Figura 13: Comparativa de los valores obtenidos, de la resistencia en el límite elástico F_y (MPa), de los dos tipos de acero ensayados

Según la ductilidad evaluada en términos de acero equivalente, a partir de los datos obtenidos de la Tabla 5, se realiza la comparación de valores

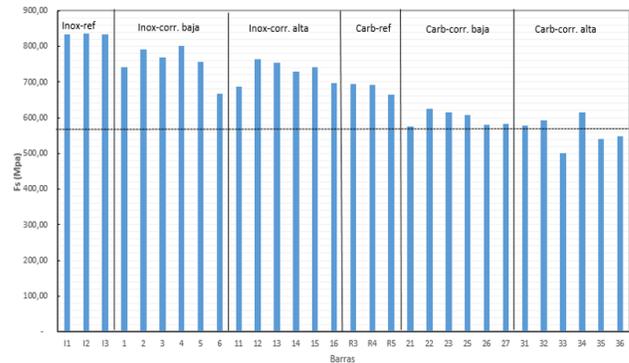


Figura 14: Comparativa de los valores de las dos probetas, de la resistencia máxima F_s (MPa), de los dos tipos de acero ensayados

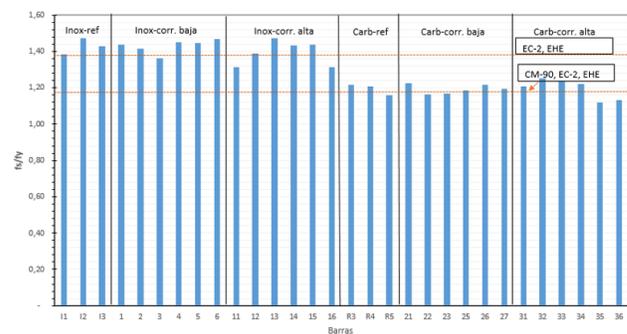


Figura 15: Resultados medios de la relación f_s/f_y de los dos tipos de aceros ensayados, y su comparativa con las diferentes normativas

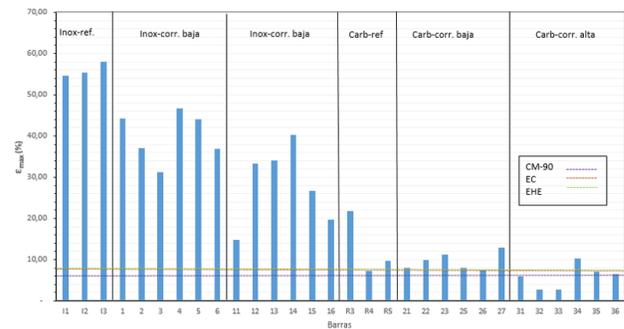


Figura 16: Resultados medios de la deformación máxima ϵ_{max} (%) para los dos tipos de acero, y su comparativa con las diferentes normativas

mínimos establecidos según las normas CM-90, EC-2 y EHE de la Tabla 1.

En la Figura 17, se comparan los resultados de parámetro p de Coteza, en la Figura 19, se comparan los resultados del parámetro A_{nom}^* de Creazza, y en la Figura 19, los resultados de índice

Tabla 5: Parámetros de ductilidad de las barras corrugadas ensayadas

Prob	Corr (%)	f_s/f_y	E_y (%)	$E_{max}=Agt$ (%)	p	A_{nom}^* (N/mm ²)	Id	he (%)
I1	-	1,38	0,39	54,54	8,46	8.389,11	329,19	-
I2	-	1,47	0,31	55,42	10,38	9.874,67	446,46	-
I3	-	1,43	0,58	58,04	9,81	9.571,77	242,04	-
1	1,32	1,44	0,34	44,25	8,12	6.589,20	312,78	-
2	3,55	1,42	0,38	37,02	6,81	5.675,52	234,27	-
3	3,04	1,36	0,4	31,26	5,27	4.183,77	185,37	-
4	2,37	1,45	0,37	46,66	8,7	7.669,82	310,29	-
5	0,8	1,45	0,3	44	8,27	6.796,58	360,01	-
6	3,6	1,47	0,26	36,96	7,57	5.210,58	351,92	-
11	5,38	1,31	0,34	14,84	2,65	1.579,03	101,05	-
12	2,13	1,39	0,34	33,26	5,9	4.679,16	234,95	-
13	2,3	1,47	0,31	34,13	7,2	5.460,24	274,72	-
14	4,31	1,43	0,3	40,37	7,55	5.899,32	321,28	-
15	4,68	1,44	0,3	26,75	5,57	3.965,38	212,32	-
16	3,86	1,31	0,31	19,72	3,29	2.154,16	144,27	-
R3	-	1,22	0,31	21,71	2,66	1.746,73	154,66	0,5
R4	-	1,21	0,36	7,21	1,28	514,12	43,12	0,67
R5	-	1,16	0,3	9,7	1,18	553,69	69,38	0,56
21	6,12	1,22	0,29	8,04	1,24	544,19	59,55	-
22	5,67	1,16	0,26	9,94	1,09	565,5	81,68	-
23	3,7	1,17	0,3	11,18	1,21	634,45	78,75	-
25	5,17	1,19	0,25	8,05	1,06	498,66	67,99	-
26	6,32	1,22	0,26	7,42	1,14	495,71	62,05	-
27	5,01	1,2	0,25	12,94	1,57	804,5	110,75	-
31	5,79	1,21	0,26	5,91	0,92	374	49,87	-
32	8,57	1,25	0,26	2,8	0,63	202,93	23,4	-
33	4,22	1,24	0,21	2,75	0,58	161,37	27,38	-
34	8,53	1,22	0,26	10,31	1,48	745,13	86,81	-
35	9,11	1,12	0,24	7,05	0,63	258,82	60,22	-
36	8,05	1,13	0,22	6,42	0,66	266,29	62,43	8,05

Corr: corrosión, *he*: deformación correspondiente al punto donde finaliza la cedencia y comienza el endurecimiento en frío, índice *p*: capacidad de rotación plástica, índice A_{nom}^* : área plástica de endurecimiento, *Id*: índice de tenacidad (energía total absorbida en el punto de alargamiento bajo carga máxima).

de tenacidad *Id* propuesto por Ortega. En ellos se observa que los aceros inoxidable cumplen con los valores mínimos exigidos por las normativas en comparación de aceros al carbono, los cuales en algunos no cumplen, el parámetro *p* medio de los aceros inoxidable corroídos obtenido es de 6,41; lo que supone una capacidad de rotación de $6,41/1,02 = 6,3$ veces superior a las barras de acero al carbono corroídos.

Tanto los aceros inoxidable como los aceros al carbono cumplen con los requerimientos mínimos de las normativas para el parámetro A_{nom}^* .

Se observa también que los aceros inoxidable cumplen con los requisitos mínimos exigidos por las normativas con respecto al parámetro de índice de tenacidad, y que la mayoría de los aceros al carbono no cumplen con estos valores mínimos.

Por lo mencionado anteriormente se puede concluir que los aceros inoxidable tanto con cierto

grado de corrosión siguen cumpliendo con los requisitos mínimos de ductilidad establecidos por las normativas para un acero de alta ductilidad, por ello no presentan tanta variación con respecto a la ductilidad y que los aceros al carbono van disminuyendo esta ductilidad en función a la corrosión que presentan.

A partir de los resultados obtenidos, se definen las ecuaciones de degradación de las propiedades mecánicas de los dos tipos de acero según un enfoque estadístico, en ella se establecen las relaciones para predecir su comportamiento frente a la corrosión por picadura en función a barras no corroídas, los cuales se muestran con su respectiva ecuación, para este cálculo se empleó el programa Minitab 2019.

En las Figuras 20 y 21, se muestra el efecto la corrosión sobre la resistencia en el límite elástico de los dos tipos de acero inoxidable y al carbono en

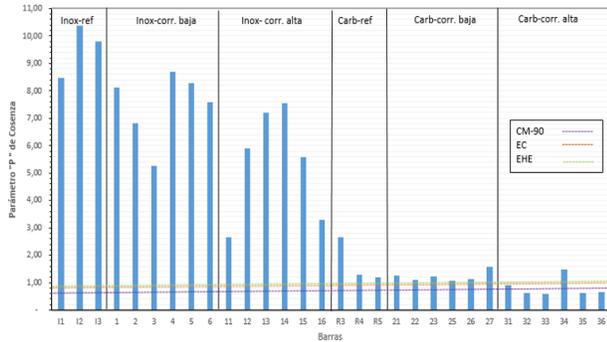


Figura 17: Parámetro p de acero equivalente, para los cuatro tipos de acero ensayados, y su comparativa con los valores obtenidos aplicando las diferentes normativas consideradas

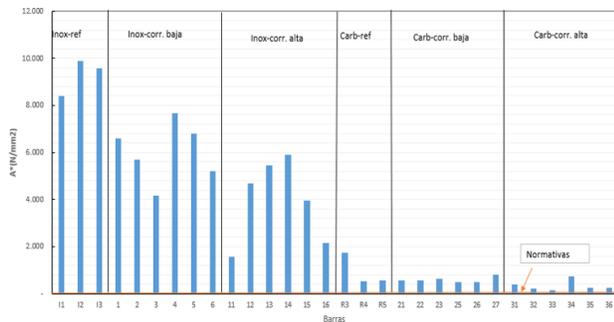


Figura 18: Parámetro A_{nom}^* (N/mm^2) de acero equivalente, para los dos tipos de acero ensayados, y su comparativa con los valores obtenidos aplicando las diferentes normativas consideradas

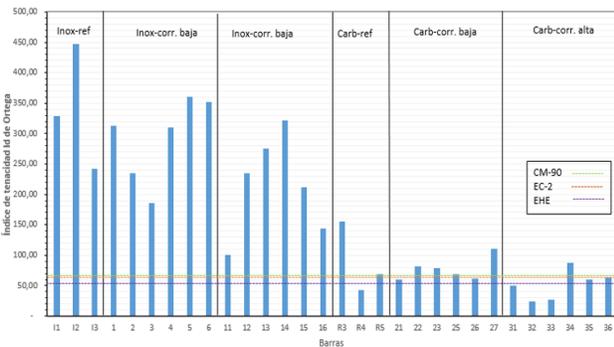


Figura 19: Índice de Tenacidad de los dos tipos de acero ensayados, y su comparativa con los valores obtenidos aplicando las diferentes normativas europeas consideradas

donde f_y/f_{y0} es la relación entre la resistencia en el límite elástico de cada barra y la resistencia en el límite elástico medio de las barras sin corroer,

A/A_0 es la relación de la sección equivalente de cada barra corroída y el valor medio de las barras sin corroer. En ambos tipos de acero se puede observar como con el aumento de la corrosión va reduciendo la relación f_y/f_{y0} , como se muestra con las ecuaciones (9) y (10), obtenidas por el análisis de regresión.

$$f_y \approx (0,9181 - 0,0056 \cdot Q(\%)) \cdot f_{y0} \quad (9)$$

Aceros al carbono:

$$f_y \approx (0,8549 - 0,0009 \cdot Q(\%)) \cdot f_{y0} \quad (10)$$

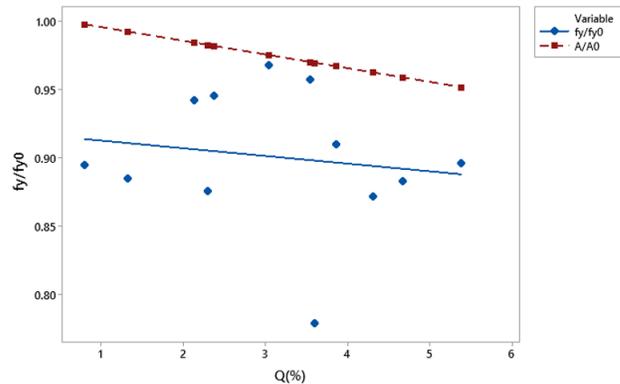


Figura 20: Efecto de la corrosión sobre la resistencia en el límite elástico de los aceros inoxidables corroídos

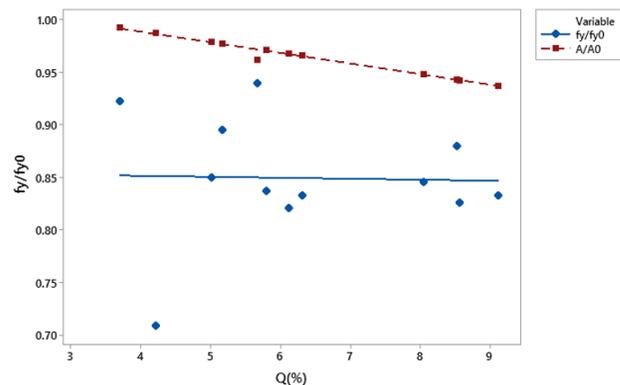


Figura 21: Efecto de la corrosión sobre la resistencia en el límite elástico de los aceros al carbono corroídos

En las Figuras 22 y 23, se muestran el efecto la corrosión sobre la resistencia máxima de los dos

tipos de acero inoxidable y al carbono en donde f_s/f_{s0} es la relación entre la resistencia máxima de cada barra y la resistencia máximo medio de las barras sin corroer, A/A_0 es la relación de la sección equivalente de cada barra corroída y el valor medio de las barras sin corroer. En ambos tipos de acero de puede observar como con el aumento de la corrosión se va reduciendo la relación f_s/f_{s0} , lo cual se demuestra con las ecuaciones (11) y (12) obtenidas del análisis de regresión.

Aceros inoxidables:

$$f_s \approx (0,9428 - 0,01720Q(\%)) f_{s0} \quad (11)$$

Aceros al carbono:

$$f_s \approx ((0,8625 - 0,00213Q(\%)) f_{s0} \quad (12)$$

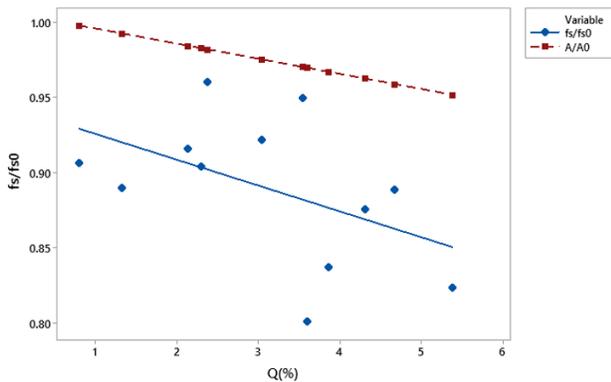


Figura 22: Efecto de la corrosión sobre la resistencia máxima de los aceros inoxidables corroídos

En las Figuras 24 y 25, se muestra el efecto la corrosión sobre la deformación última en base a 5 diámetros de los dos tipos de acero inoxidable y al carbono. En ambos tipos de acero de puede observar como con el aumento de la corrosión se va reduciendo la relación $\varepsilon_{\varnothing 5}/\varepsilon_{0\varnothing 5}$, lo cual se demuestra con las ecuaciones (13) y (14), resultado de análisis de regresión.

Aceros inoxidables:

$$\varepsilon_{\varnothing 5} \approx (0,8903 - 0,0911 \cdot Q(\%)) \cdot \varepsilon_{0\varnothing 5} \quad (13)$$

Aceros al carbono:

$$\varepsilon_{\varnothing 5} \approx (0,820 - 0,0357 \cdot Q(\%)) \cdot \varepsilon_{0\varnothing 5} \quad (14)$$

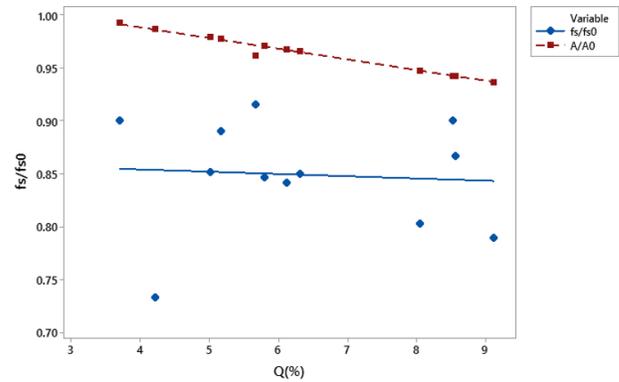


Figura 23: Efecto de la corrosión sobre la resistencia máximo de los aceros al carbono corroídos

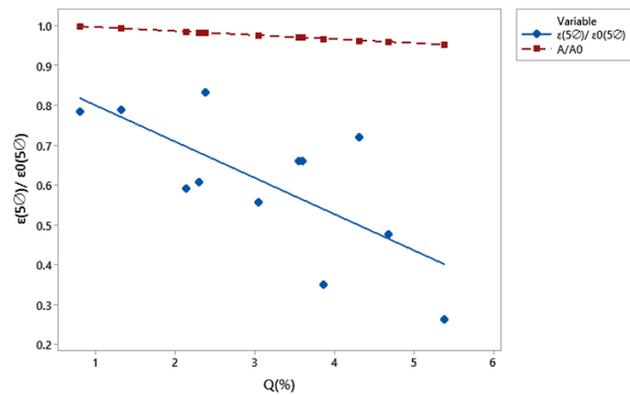


Figura 24: Efecto de la corrosión sobre la deformación última en base a los 5 diámetros de los aceros inoxidables corroídos

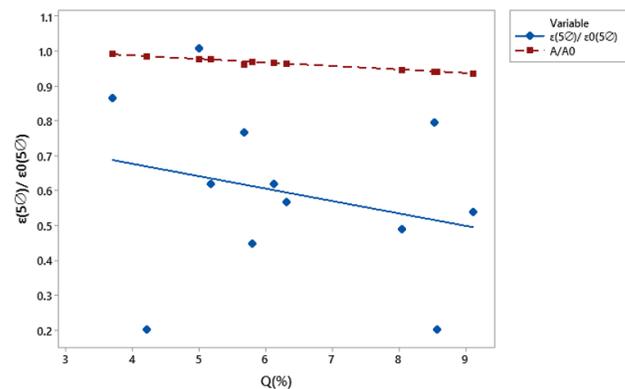


Figura 25: Efecto de la corrosión sobre la deformación última en base a los 5 diámetros de los aceros al carbono corroídos

4. Conclusiones

Según los resultados de ensayos experimentales de tracción de las armaduras corroídas artificialmente a diferentes grados, existe una reducción del comportamiento mecánico de las barras independientemente del tipo de acero a medida que aumenta la corrosión, así como es el caso de aceros inoxidable, que presentan una reducción de deformación de 59% con respecto al acero de referencia y en caso del acero al carbono una reducción de deformación de 78% con respecto al acero de referencia.

La diferencia más notoria entre estos dos tipos de acero es en la forma de la curva tensión-deformación ya que el acero al carbono normalmente presenta un comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico y una meseta antes del endurecimiento por deformación, mientras que acero inoxidable tiene una respuesta más redondeada sin un límite elástico bien definido.

Se observa una disminución significativa en términos de ductilidad principalmente de los aceros al carbono, en cambio los aceros inoxidable tienen mayor ductilidad y una mayor capacidad de endurecimiento por trabajo que los aceros al carbono.

Los parámetros estudiados en base al concepto de acero equivalente disminuyen a medida que aumenta la corrosión, por lo que el uso de criterios de ductilidad es eficiente para analizar barras con problemas de corrosión.

Los aceros inoxidable son una alternativa a los aceros al carbono en ambientes en los que se va a producir la corrosión de las armaduras, ya que posee una excelente resistencia a la corrosión, dando gran durabilidad a la estructura.

5. Referencias

- [1] D. M. Bastidas, A. Cobo, M. N. González, E. Medina, y J. M. Bastidas, “Ductilidad del acero inoxidable bajo en níquel para estructuras de hormigón armado,” *Materiales de Construcción*, vol. 61, no. 304, pp. 613–620, 2011. <https://doi.org/10.398mc.2011.57210>
- [2] D. M. Bastidas y E. Medina Sánchez, Eds., *Armaduras de acero inoxidable*, 1.ª ed. Madrid, España: CEDINOX, 2013.
- [3] E. Moreno, “Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón: Estudio Experimental de la Variación de la Ductilidad en Armaduras Corroídas Aplicando el Criterio de Acero Equivalente,” Tesis Doctoral, Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2008.
- [4] H. Lin, Y. Zhao, J. Özbolt, and R. Hans-Wolf, “The bond behavior between concrete and corroded steel bar under repeated loading,” *Engineering Structures*, vol. 140, pp. 390–405, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.067>
- [5] J. Sheng and J. Xia, “Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel,” *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 90–100, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.037>
- [6] R. K. Vanama and B. Ramakrishnan, “Improved degradation relations for the tensile properties of naturally and artificially corroded steel rebars,” *Construction and Building Materials*, vol. 249, p. 118706, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118706>
- [7] M. Hanifehzadeh, B. Gencturk, and K. Willam, “Dynamic structural response of reinforced concrete dry storage casks subjected to impact considering material degradation,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 325, no. 2, pp. 192–204, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.10.001>
- [8] A. M. Bazán, A. Cobo, and J. Montero, “Study of mechanical properties of corroded steels embedded concrete with the modified surface length,” *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 80–87, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.109>
- [9] M. Mistry, C. Koffler, and S. Wong, “LCA and LCC of the world’s longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, pp. 1637–1644, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1080-2>
- [10] C. A. Apostolopoulos and V. G. Papadakis, “Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 12, pp. 2316–2324, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006>
- [11] Y. Zhang and A. Poursaeed, “Passivation and Corrosion Behavior of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution under Tensile and Compressive Stresses,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 8, p. 04014234, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001199](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001199)
- [12] J. Shi, D. Wang, J. Ming, and W. Sun, “Passivation and Pitting Corrosion Behavior of a Novel Alloy Steel (00Cr10MoV) in Simulated Concrete Pore Solution,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 10, p. 04018232, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002455)

- [13] J. Xia, W.-l. Jin, Y.-x. Zhao, and L.-y. Li, "Mechanical performance of corroded steel bars in concrete," *Structures and Buildings*, vol. 166, no. 5, pp. 235–246, 2013. <https://doi.org/10.1680/stbu.11.00048>
- [14] N. A. Taha and M. Morsy, "Study of the behavior of corroded steel bar and convenient method of repairing," *HBRC Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 107–113, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.11.004>
- [15] J. Lizarazo-Marriaga, C. Higuera, I. Guzmán, and L. Fonseca, "Probabilistic modeling to predict fly-ash concrete corrosion initiation," *Journal of Building Engineering*, vol. 30, p. 101296, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101296>
- [16] Y. Zhang and R. K. L. Su, "Concrete cover delamination model for non-uniform corrosion of reinforcements," *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 329–340, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.199>
- [17] U. M. Angst, "A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete," *Corrosion*, vol. 75, no. 12, pp. 1420–1433, 2019. <https://doi.org/10.5006/3355>
- [18] B. Hou, X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zhang, W. Xu, D. Lu, and F. Ma, "The cost of corrosion in China," *npj Materials Degradation*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2017. <http://dx.doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2>
- [19] K. Flaga, "Advances in materials applied in civil engineering," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 106, no. 1–3, pp. 173–183, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00611-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00611-7)
- [20] E. Cosenza, C. Greco, and G. Manfredi, "An Equivalent Steel Index in the Assessment of the Ductility Performance of the Reinforcement," in *Ductility of Reinforced Concrete Structures Ductility of Reinforced Concrete Structures, Bollettin No. 242. Lausanne: Comitè Euro-international du Betón. Lausanne: Comitè Euro-international du Betón*, 1998, pp. 157–170.
- [21] G. Creazza and S. Russo, "A new proposal for defining the ductility of concrete reinforcement steels by Concrete, means of a single parameter," in *Ductility of Reinforced Concrete Structures. Lausanne: Comitè Euro-international du Betón*, 1998, pp. 171–181.
- [22] H. Ortega, "Estudio experimental de la influencia del tipo de acero en la capacidad de redistribución en losas de hormigón armado," PhD Tesis, E.T.S.I. Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1998.
- [23] J. T. Pérez-Quiroz, J. Terán, M. J. Herrera, M. Martínez, and J. Genescá, "Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 11, pp. 1317–1324, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.024>
- [24] AENOR, *UNE-EN ISO 15630-1 Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte I: Barras, alambres y alambón para hormigón armado*, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2011.
- [25] AENOR, *UNE 36065: Barras corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigón armado*, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2011.
- [26] AENOR, *UNE 36745:2004 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad en armaduras de acero para hormigón*, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2004.