

## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ARMADURAS CORROÍDAS CUANDO SE MODIFICA LA LONGITUD DE SUPERFICIE CORROÍDA

**A.M. BAZÁN**

Estudiante IE  
ETSIE  
Granada; España  
amb.x1990@gmail.com

**A. COBO**

Prof. Edificación  
EUATM  
Madrid; España  
alfonso.cobo@upm.es

**R.M. CAZORLA**

Prof. Edificación  
ETSIE  
Granada; España  
rmc@ugr.es

**J. RODRIGUEZ**

Prof. Ing.<sup>a</sup> Civil  
ETSICCP  
Granada; España  
rmontero@ugr.es

### RESUMEN

En este trabajo se estudia el efecto de la corrosión sobre el comportamiento mecánico de la armadura cuando se corroen distintas longitudes de barra. Se han ensayado a tracción 72 barras corrugadas de acero B500SD (con altas propiedades de ductilidad) que previamente se han corroído aceleradamente, localizándose la corrosión en tres longitudes de barra diferentes. Los resultados muestran que se producen variaciones significativas en la curva tensión-deformación obtenida en los ensayos de tracción, incluso con grados de corrosión por debajo del 1%. Además, al aumentar la longitud de barra corroída, tanto la resistencia a tracción como el límite elástico, disminuyen.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de degradación de estructuras de hormigón armado (EHA) por el paso del tiempo son inevitables [1], en especial en ambientes agresivos donde el material puede reaccionar con su entorno, provocando fenómenos corrosivos que pueden afectar al estado de servicio y la durabilidad de la estructura de hormigón [2-5], dando como resultado pérdidas económicas importantes [6] y originando la necesidad de un estudio en profundidad de este fenómeno.

En situaciones normales, el hormigón proporciona una protección al acero tanto física como química, pero la mayoría de los compuestos alcalinos que propician la protección química son inestables, por lo que la durabilidad puede verse comprometida por un gran número de circunstancias ambientales. La presencia de iones despasivantes (cloruros) puede alterar la barrera pasiva protectora del acero, mientras que si la alcalinidad disminuye por efecto del CO<sub>2</sub>, puede llegar a desaparecer dicha protección [7-8].

La consecuencia directa sobre el acero es, principalmente, la disminución de la sección y la pérdida de ductilidad, lo cual provoca variaciones en el comportamiento tensión-deformación [9-13] por lo que la capacidad portante de las EHA disminuye hasta valores muy por debajo de los previstos inicialmente en el proyecto [14-16]. Estimaciones recientes [17] cifran el coste de las reparaciones y sustituciones a causa de deterioros provocados por la corrosión de la armadura de EHA en 1.200 millones de euros por año en España.

Existen numerosos estudios relativos a los mecanismos que gobiernan la corrosión de la armadura. Sin embargo, la influencia de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero ha sido un tema al que se le ha dedicado menos atención [18-22]. Maslehuddin et al. [23] evaluaron el efecto de la corrosión atmosférica sobre las propiedades mecánicas de barras de acero, concluyendo que no se observan efectos significativos en ellas.

Estudios recientes [24] muestran cambios importantes en el diagrama tensión-deformación del acero corroído, manifestándose una disminución sistemática de la deformación bajo carga máxima conforme aumenta el grado de corrosión, hasta valores que en muchos casos quedan por debajo de los mínimos exigidos por las normas. En esos casos, el concepto de acero equivalente [25-29] como criterio de ductilidad, basado en la consideración conjunta de la deformación bajo carga máxima y el cociente entre la tensión máxima y el límite elástico, resulta muy favorable.

En este trabajo se analiza el comportamiento mecánico del acero bajo la influencia del grado de corrosión cuando afecta a diferentes longitudes de barra corroída. Se ha provocado una corrosión acelerada a 72 barras de acero corrugado de alta ductilidad, B500SD de 12 mm de diámetro embebidas en hormigón, estudiando el efecto que distintos niveles de corrosión generados sobre distintas longitudes afectadas tienen sobre las propiedades mecánicas de las barras mediante ensayos de tracción y siguiendo el concepto de acero equivalente.

## 2. PROCESO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

Para estudiar la evolución de las propiedades mecánicas del acero en función de su nivel de corrosión y de la longitud de barra afectada, se han fabricado dos losas de hormigón para cada longitud utilizando moldes de tres dimensiones diferentes (Figura 1); Longitud corta (s): 75x100x400 mm; longitud media (m): 150x100x400 mm y longitud completa (c): 300x100x400 mm.

El acero estudiado, que se define en la norma UNE 36065 [30], tiene características especiales de ductilidad, y por lo tanto, puede utilizarse en zonas sísmicas. Además, es el más comúnmente utilizado en las obras de construcción en España. La Tabla 1 muestra las características mecánicas mínimas que se deben cumplir de acuerdo con la EHE-08 [31].

Tabla 1 - Características mecánicas mínimas exigidas para el acero B500SD.

$f_y$	$f_s$	$f_s/f_y$	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{5\phi}$
500 MPa	575 MPa	$1,15 \leq f_s/f_y \leq 1,35$	$\geq 8\%$	$\geq 16\%$

Donde  $f_y$  es la resistencia en el límite elástico,  $f_s$  es la resistencia máxima,  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  es la deformación correspondiente a la resistencia máxima y  $\epsilon_{5\phi}$  es la deformación en rotura medida en base a 5 diámetros.

En la fabricación de las losas de hormigón se le añadió cloruro de calcio para destruir el estado pasivo de acero, con una concentración del 2% de ión cloruro en peso de cemento. Después del hormigonado y el desencofrado, las seis losas se curaron durante 28 días en una cámara húmeda (Figura 1) a 25°C y con una humedad relativa del 99%.

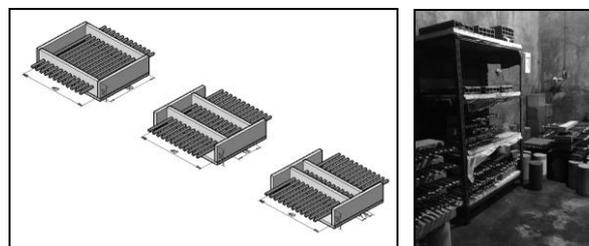


Figura 1: molde utilizado para la fabricación de las losas y foto derecha, curado de las losas en la cámara húmeda

Para evitar ataques preferentes se colocó una cinta aislante en la interfase hormigón-aire a fin de evitar puntos iniciadores y propagadores de corrosión, de forma que la cinta rodease la armadura con una longitud aproximada de 3 cm dentro y fuera del hormigón.

### 2.2 Técnicas de corrosión acelerada

Las barras de acero han sido cortocircuitadas externamente y se ha forzado la corrosión mediante la aplicación de una corriente anódica constante entre la armadura y una plancha de plomo colocada en la superficie de las losas que actuaba de cátodo. La distribución uniforme de la corriente eléctrica se logró mediante la inserción de un paño empapado con agua entre la superficie de las losas y la plancha. Para asegurar el aporte de la humedad necesaria, el paño se ha ido humedeciendo a medida que se iba secando (Fig. 2).

Durante el proceso, se ha registrado periódicamente la corriente que pasa a través de cada una de las barras usando un multímetro digital, realizando mediciones periódicas y corrigiendo cualquier caída de tensión mediante la variación del potencial eléctrico de la fuente de alimentación. La densidad media de corriente en cada una de las barras fue de aproximadamente  $10 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ . Al cabo de 180 días, cuando las fisuras aparecieron, las barras se desconectaron. Una vez finalizado el proceso de corrosión acelerada, se extrajeron las barras del hormigón y se procedió a la eliminación del óxido que las cubre mediante el uso de un cepillo de acuerdo con la ASTM G190-06 [32] y un decapado químico según la norma UNE-EN ISO 8407 [33].

El grado de corrosión ( $Q_{\text{corr}}$ ) producido en cada barra se determinó por pérdida gravimétrica, pesando las barras tras eliminar los productos de corrosión y suponiendo que la pérdida de peso se ha producido solo en la longitud de la barra que estaba en contacto con el hormigón de manera uniforme, a través de la ecuación:

$$Q_{\text{corr}} = [(P_i - P_c) / P_i] * 100 \quad (1)$$

Donde  $P_i$  es el peso de la barra antes del proceso de corrosión acelerada (g) y  $P_c$  es el peso de la barra corroída (g) y  $Q_{\text{corr}}$  que se obtiene en porcentaje.

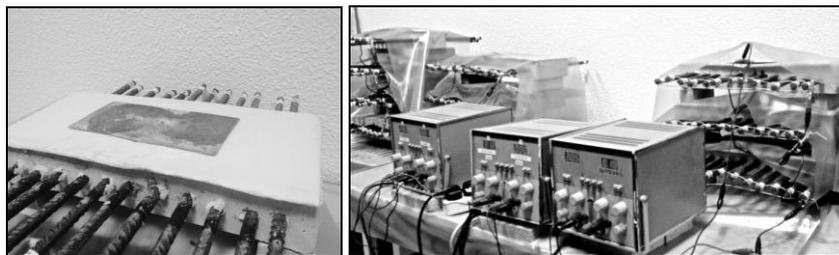


Figura 2: Disposición de la plancha (plomo) y la bayeta sobre la superficie de la losa y la conexión de las losas a la fuente de alimentación

Para el cálculo de la pérdida de sección del acero corroído se utiliza la fórmula de la sección equivalente, a través de la ecuación:

$$S_{\text{res}} = P_c / 7,85 * L_c \quad (2)$$

Donde  $S_{\text{res}}$  es la sección equivalente residual ( $\text{cm}^2$ ),  $P_c$  es el peso de la barra corroída (g), 7,85 es el valor de la masa específica del acero ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) y  $L_c$  la longitud corroída (cm).

### 2.3 Ensayo de tracción

Una vez finalizado el proceso de corrosión acelerada, tras la extracción de barras y la eliminación de óxido, las barras pre-corroídas se han sometido a ensayos de tracción siguiendo las normas europeas [40] en una prensa multiensayos de la firma IBERTEST con una capacidad de carga de 100 kN controlada mediante el programa informático WINTest 32. Los ensayos han sido llevadas a cabo por control de carga en la zona elástica y de deformación una vez que el límite de fluencia se había superado, con una velocidad normal de 3,7 kN/s en la zona elástica y de 20,1 mm/min en la zona plástica y las medidas de deformación se han obtenido con un medidor de deformación 2-IBER-25 base de 50 mm. Las barras han sido designadas mediante un código B-XXX-Y, en donde B es la indicación de armadura, XXX el número de la barra, Y la longitud de barra corroída.

### 3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos a tracción sobre la armadura se muestran en la Tabla 2, donde se exponen los datos correspondientes a las propiedades mecánicas de las barras ensayadas: límite elástico ( $f_y$ ), carga unitaria máxima a tracción ( $f_s$ ), relación  $f_s/f_y$ , deformación máxima ( $\epsilon_{\text{máx}}$ ) y deformación última medida sobre la base de cinco diámetros ( $\epsilon_{5\phi}$ ). El nivel de corrosión alcanzado se expresa mediante la variable  $Q_{\text{corr}}$  y  $L_{\text{corr}}$  es la longitud de la barra que ha sido corroída. Todas las características mecánicas se han obtenido respecto a la sección equivalente residual.

La Tabla 2 muestra que los valores de  $f_y$  oscilan entre 411,42 MPa y 626,49 MPa, para  $f_s$  483 MPa y 689 MPa. La relación  $f_s/f_y$  oscila entre 1,06 y 1,25 y el valor de  $\epsilon_{\text{máx}}$  desde 3,15% a 14,82%. Los valores obtenidos de  $\epsilon_{5\phi}$  van desde 6% a 32%. Los valores definidos siguiendo criterio de acero equivalente son:  $A^*$  que oscila entre 0,8 N/mm<sup>2</sup>, y 8,92

N/mm<sup>2</sup>,  $\rho$  entre 0,42 y 2,16 y el índice de ductilidad (Id) que oscila entre 30,6 y 159,36. Se han sombreado en gris las celdas en las que los valores de alguno de los parámetros mecánicos indicadores de la ductilidad han resultado inferiores a los límites exigidos por la instrucción EHE-08 para estos aceros.

Tabla 2 - Características mecánicas de la armadura de 12 mm de diámetro después del proceso de corrosión

Barra	L <sub>corr</sub>	Q <sub>corr</sub> (%)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>s</sub> (MPa)	f <sub>s</sub> /f <sub>y</sub>	$\epsilon_{\max}$ (%)	$\epsilon_{s0}$ (%)	Id	P	A* (N/mm <sup>2</sup> )
B009s	7,00	0,00	535,84	610,86	1,14	14,66	23	103,43	1,23	6,12
B011s	7,40	0,00	544,38	620,59	1,14	13,94	25	101,73	1,18	6,94
B025m	14,60	0,00	553,64	625,61	1,13	13,05	16	94,72	1,06	7,18
B036m	14,70	0,00	526,62	605,61	1,15	14,41	18	105,68	1,29	7,44
B034m	14,40	0,02	521,19	604,58	1,16	14,82	20	132,22	1,39	8,11
B002s	7,50	0,09	538,32	613,68	1,14	14,18	25	88,11	1,20	6,95
B028m	14,03	0,11	529,48	608,90	1,15	12,48	12	94,68	1,16	6,46
B029m	14,00	0,14	518,72	606,90	1,17	13,14	18	97,15	1,35	6,14
B032m	14,20	0,14	522,14	600,46	1,15	12,05	06	88,19	1,14	7,55
B003s	7,00	0,15	521,38	599,59	1,15	13,89	26	109,46	1,26	6,34
B006s	7,00	0,15	535,81	610,82	1,14	14,49	25	113,71	1,22	7,00
B007s	7,00	0,15	531,79	611,56	1,15	13,45	23	102,13	1,23	7,10
B030m	14,40	0,15	535,00	609,90	1,14	12,99	16	94,72	1,13	7,11
B001s	7,50	0,16	530,90	610,54	1,15	14,02	27	102,79	1,27	7,29
B031m	14,20	0,17	529,11	603,19	1,14	13,35	16	85,43	1,15	6,43
B012s	7,30	0,19	541,84	612,28	1,13	14,31	26	107,73	1,13	6,59
B035m	14,00	0,22	525,96	610,11	1,16	12,79	16	87,96	1,26	7,00
B027m	14,80	0,23	515,56	603,21	1,17	13,21	16	97,68	1,36	7,55
B010s	6,70	0,26	532,26	606,78	1,14	14,75	29	111,59	1,23	7,19
B033m	14,30	0,27	528,04	612,53	1,16	12,73	24	90,50	1,25	7,00
B014s	7,30	0,32	526,21	610,40	1,16	14,12	25	159,36	1,34	7,82
B026m	14,70	0,34	530,45	615,32	1,16	13,60	14	111,82	1,31	7,55
B004s	7,00	0,37	495,79	570,16	1,15	14,81	26	121,32	1,31	7,21
B005s	7,20	0,42	532,49	617,69	1,16	13,97	27	119,54	1,33	7,79
B024s	7,40	0,53	525,69	609,80	1,16	11,78	17	114,50	1,18	6,48
B060c	29,30	0,60	488,34	586,01	1,20	9,29	19	77,41	1,22	5,88
B023s	7,00	0,68	535,43	610,39	1,14	12,64	16	95,47	1,10	6,18
B021s	7,40	0,70	528,74	608,05	1,15	11,18	16	81,74	1,08	5,76
B017s	7,60	0,77	514,27	606,84	1,18	12,63	20	97,15	1,38	7,62
B016s	7,30	0,80	484,47	605,59	1,25	11,27	26	114,01	1,71	5,77
B018s	7,60	0,80	525,60	604,44	1,15	11,26	32	82,33	1,08	8,92
B048m	14,30	0,83	620,40	688,64	1,11	8,61	12	50,80	0,88	3,87
B022s	7,00	0,85	518,02	600,90	1,16	11,67	14	88,87	1,18	6,29
B008s	6,80	0,86	626,49	689,14	1,10	9,31	19	58,15	0,87	3,75
B020s	7,30	0,87	521,07	599,23	1,15	11,40	12	96,89	1,09	5,81
B015s	7,60	0,94	521,33	599,53	1,15	11,67	20	124,30	1,10	5,98
B019s	7,30	1,01	516,76	599,44	1,16	11,41	18	93,63	1,16	4,55
B045m	14,00	1,01	495,99	585,27	1,18	8,34	13	81,46	1,02	4,83
B047m	14,80	1,01	506,90	588,00	1,16	8,64	13	79,98	0,95	6,15
B013s	7,40	1,06	510,04	601,85	1,18	11,20	20	86,02	1,27	5,62
B049c	29,90	1,06	470,70	564,84	1,20	9,19	16	83,04	1,21	6,68
B046m	14,40	1,08	497,26	576,82	1,16	9,55	14	78,18	1,02	4,93
B064c	30,30	1,15	469,48	553,99	1,18	7,81	22	50,41	0,99	4,21
B059c	29,50	1,47	468,65	543,63	1,16	7,40	18	60,32	0,86	3,57
B043m	14,00	1,52	493,80	577,75	1,17	9,00	13	59,86	1,04	4,86
B044m	14,20	1,55	488,25	576,14	1,18	8,14	12	49,52	1,02	4,56
B071c	30,40	1,58	518,38	585,77	1,13	10,35	18	77,60	0,90	4,52
B042m	14,40	1,60	490,75	579,09	1,18	10,29	14	85,10	1,19	5,91
B053c	31,00	1,64	447,42	532,43	1,19	5,68	16	50,64	0,82	3,08
B070c	30,20	1,66	499,14	574,01	1,15	9,42	18	68,69	0,95	4,56
B072c	29,90	1,78	484,95	567,39	1,17	9,91	12	78,48	1,10	5,3
B054c	29,00	1,91	437,28	494,13	1,13	3,15	12	32,42	0,39	1,12
B057c	31,00	2,02	426,24	520,01	1,22	5,55	17	48,06	0,92	3,31

<b>B062c</b>	30,00	2,04	451,39	532,64	1,18	7,48	14	59,21	0,95	3,91
<b>B052c</b>	30,00	2,13	446,03	512,93	1,15	5,85	14	51,26	0,68	2,5
<b>B068c</b>	29,80	2,24	492,90	522,47	1,06	6,48	16	59,62	0,32	1,23
<b>B061c</b>	28,90	2,27	467,60	537,74	1,15	9,14	17	77,45	0,93	4,16
<b>B069c</b>	30,00	2,27	465,95	545,16	1,17	8,12	15	75,44	0,96	4,17
<b>B055m</b>	30,00	2,29	468,36	524,56	1,12	5,63	14	44,79	0,54	2,01
<b>B050c</b>	28,00	2,31	411,42	489,59	1,19	4,68	15	45,40	0,72	2,32
<b>B056c</b>	30,50	2,42	418,76	519,26	1,24	6,52	16	69,61	1,12	4,21
<b>B051c</b>	27,00	2,62	451,40	483,00	1,07	4,07	14	31,33	0,27	0,8
<b>B058c</b>	28,00	2,63	416,88	516,93	1,24	6,50	16	71,56	1,11	4,2
<b>B067c</b>	29,70	2,74	455,67	519,46	1,14	6,83	20	49,26	0,71	2,78
<b>B065c</b>	29,30	2,98	447,39	505,55	1,13	5,91	18	53,60	0,60	2,2
<b>B066c</b>	29,80	3,16	429,18	519,31	1,21	6,52	20	68,44	0,99	3,88
<b>B038m</b>	14,60	3,40	449,01	543,30	1,21	7,19	10	62,35	1,06	4,36
<b>B040m</b>	14,20	3,57	459,52	542,23	1,18	6,55	10	49,82	0,87	3,46
<b>B069c</b>	15,00	3,81	482,57	569,43	1,18	7,81	15	68,88	0,98	4,37
<b>B070c</b>	14,60	3,92	485,04	572,35	1,18	9,54	18	78,81	1,13	5,4
<b>B071c</b>	31,00	3,94	415,49	502,74	1,21	6,87	18	69,52	1,03	3,87
<b>B072c</b>	14,70	4,07	449,41	498,85	1,11	3,70	12	30,12	0,37	1,14

#### 4. DISCUSIÓN

Según puede comprobarse, valores de penetración media de corrosión tan pequeños como el 1% implican reducciones en las propiedades mecánicas del acero que suponen el no cumplimiento de la Instrucción EHE, que es la norma más restrictiva de todas (tablas 2 y 3).

Tabla 3 - Requisitos de ductilidad para el acero B500SD en distintas normativas

Normativa	CM-90	EC-2	EHE-08
Parámetro			
$f_s/f_y$	>1,15	>1,08	$1,35 \geq (f_s/f_y) \leq 1,15$
$\epsilon_{max}$	>6%	>5%	$\geq 8\%$
$\epsilon_{5\phi}$	-	-	$\geq 16\%$

A partir de los valores anteriores y hasta pérdidas del 4% se manifiesta una disminución sistemática de la deformación bajo carga máxima conforme aumenta el grado de corrosión, hasta valores que en muchos casos quedan por debajo de los mínimos exigidos por las normas y reglamentos en vigor sobre ductilidad. En concreto, si se analiza el cumplimiento de los criterios de ductilidad por separado de la EHE-08 se puede afirmar que las barras con un nivel de corrosión inferior al 1% no los cumplen el 44%, las barras con niveles de corrosión entre el 1% y el 2% no los cumplen el 62% y las barras con niveles de corrosión entre el 2% y el 4% no los cumplen en el 85% (tabla 2). Se comprueba el efecto tan importante que estos pequeños niveles de corrosión tienen sobre armaduras de alta ductilidad cuando se aplican los criterios de EHE-08.

En estos casos, la utilización del concepto de acero equivalente [33] como criterio de ductilidad, basado en la consideración conjunta de la deformación bajo carga máxima y del cociente entre la tensión máxima y el límite elástico, puede resultar muy ventajoso. La tabla 4 muestra los mínimos exigidos por cada norma del concepto de acero equivalente definido por Cosenza, Creazza y Ortega.

Tabla 4 - Requisitos del concepto de acero equivalente de para cada normativa

Normativa	CM-90	EC-2	EHE-08
Parámetro			
$\rho$	0,69	0,82	0,86
$A^*$ (N/mm <sup>2</sup> )	2,87	3,6	3,87
$I_d$	50,45	63,35	67,65

En la figura 3 se muestra un estudio comparativo del porcentaje de barras que no cumplen los requisitos mínimos exigidos por EHE-08 para aceros de alta ductilidad cuando la superación de los requisitos se exigen por separado (A) o se exige su cumplimiento en función de alguno de los criterios de acero equivalente (B).

Se puede comprobar la enorme diferencia que existe en el cumplimiento de los criterios de ductilidad cuando se emplea algún criterio de acero equivalente donde todas las barras con un nivel de corrosión inferior al 1% superan la norma, el 37% de las barras con niveles de corrosión entre el 1% y el 2% no los cumplen y el 55% de las barras con niveles de corrosión entre el 2% y el 4% no los cumplen (tabla 2).

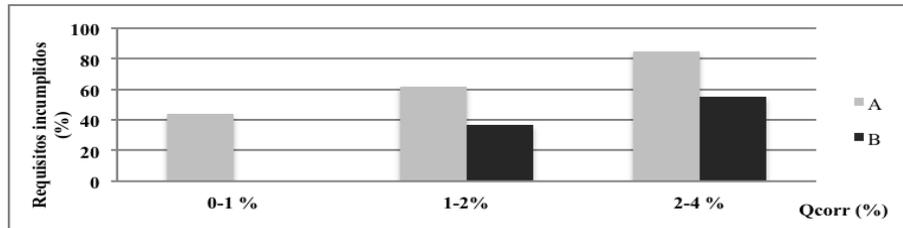


Figura 3: Comparación de la proporción de barras que no cumplen los parámetros de la EHE-08

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos a tracción se ha realizado una comparación para cada una de las características mecánicas en función de la longitud de barra corroída. (Figura 4 a 7)

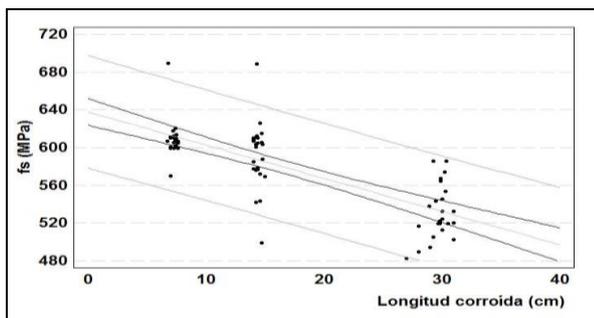


Figura 4: Efecto de la longitud de barra corroída sobre la resistencia a tracción ( $f_s$ )

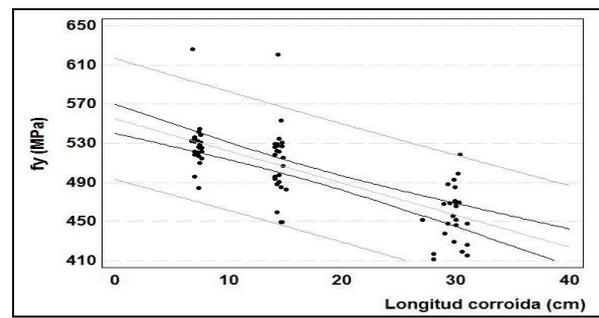


Figura 5: Efecto de la longitud de barra corroída sobre el límite elástico ( $f_y$ )

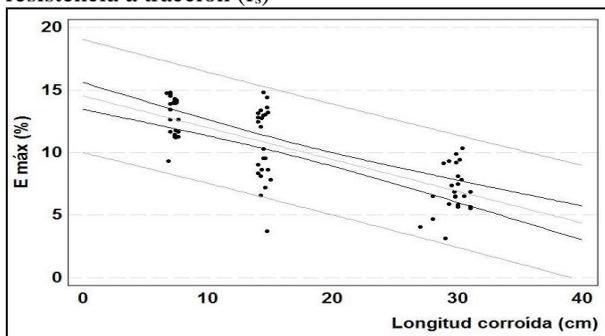


Figura 6: Efecto de la longitud de barra corroída sobre la deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ )

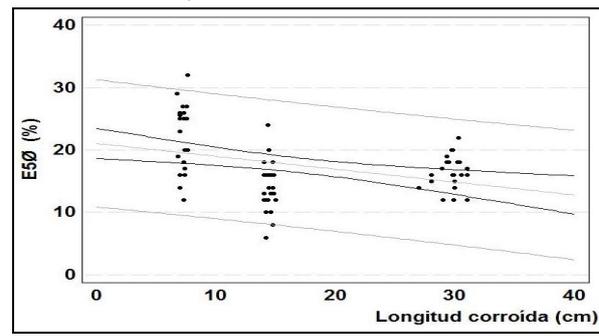


Figura 7: Efecto de la longitud de barra corroída sobre la deformación última ( $\epsilon_{50}$ )

Tabla 5 – Resultados estadísticos obtenidos de las Figuras 4 a 7.

	$f_s$	$f_y$	$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{50}$
Valor - P	0.0002	0.0002	0.0000	0.0000

Los aceros de alta ductilidad se fabrican siguiendo un proceso de temple severo de la parte superficial de la barra cuando sale del tren de laminación y un posterior revenido de esta capa provocado por el calor residual que conserva el núcleo. Como consecuencia de este procedimiento de fabricación, se forman capas de distinta estructura metalográfica visibles mediante microscopía óptica (Fig. 8). La corona exterior está formada por martensita revenida, de gran dureza y resistencia mecánica, mientras que el núcleo es de naturaleza mayoritariamente ferrítica, de elevada ductilidad por lo que cuando la martensita desaparece tras un proceso de corrosión la resistencia disminuye. Además se puede observar que la pérdida de sección no se produce de manera uniforme sobre toda la barra, los cloruros producen pérdidas localizadas de materia (picaduras) de gran profundidad donde se concentran grandes tensiones, que pueden generar el llamado efecto entalla.

Por lo que cuanto más superficie corroída más probabilidades de encontrar entalla, volviéndose algunas partes más débiles que otras, que determinan en gran parte el comportamiento de la barra. La Figura 9 corresponde a las metalografías hechas de la microestructura del acero que revela la diferencia del tamaño del grano en la periferia (corona exterior) debido a el enfriamiento más rápido que en la región central (núcleo).

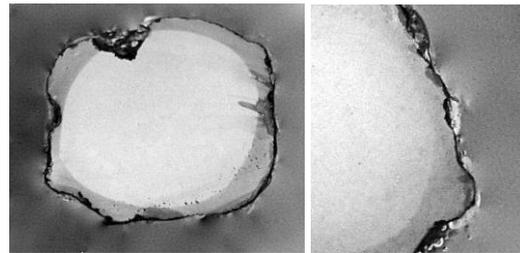


Figura 8: Microscopía de la probeta B054c con  $Q_{corr} = 1,91\%$

Estos dos efectos sumados, como se pueden ver en las figuras 4 a 7, son los que causan disminuciones en el límite elástico, la resistencia máxima a rotura y el alargamiento, y permite confirmar que al aumentar la longitud de barra corroída más probabilidad hay de encontrar picaduras por donde puede fallar la barra.

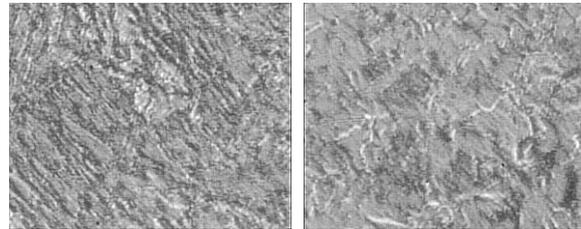


Figura 9: Foto izquierda, microestructura de la corona exterior de martensita revenida y foto derecha, microestructura del núcleo de ferrita (5000x)

En la Figura 10 se muestran los diagramas tensión-deformación representativos del comportamiento de las 72 barras ensayadas.

Las barras por las que no ha pasado casi corriente muestran un comportamiento típico tensión-deformación de barras de acero laminadas en caliente para hormigón estructural. Sin embargo, a medida que aumenta el grado de corrosión, el diagrama tensión-deformación experimenta cambios notables, especialmente el escalón de cedencia, que en algunos casos disminuye drásticamente como si se tratase de un acero deformado en frío.

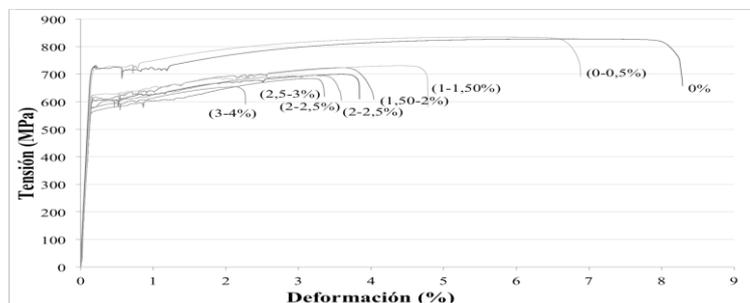


Figura 10: Resumen de los resultados del ensayo a tracción de las 72 barras ensayadas.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha observado una disminución de resistencia a tracción, límite elástico y la deformación máxima y última a medida que se aumentaba la longitud de barra corroída debido a las picaduras de gran profundidad que suponen una disminución del 7% y 5% de  $f_y$  y  $f_u$  con grados de corrosión menores del 1%, valor que se duplica con grados de corrosión superiores al 1% (15% y 12%) respectivamente.

Los requisitos de la normativa EHE-08 son muy restrictivos para aceros de alta ya que no se cumplen en el 44% de las barras con valores de penetración media de corrosión de menos del 1%, cuando los niveles de corrosión son superiores al 1% un 74% de barras no cumplen. Utilizando el concepto definido por varios autores de acero equivalente todas las barras son admitidas con valores de penetración media de corrosión de menos del 1%, con más del 1% el 45% de las barras ya no cumplen, por lo que utilizando el concepto de acero equivalente son admisibles más barras.

Los resultados experimentales también han proporcionado datos útiles del comportamiento esperado de las barras de acero al aumentar el grado de corrosión, el cambio que sufre el diagrama tensión-deformación es especialmente significativo reduciéndose la tensión y alcanzado deformaciones unitarias del 5%, en comparación con las barras sin corrosión que alcanzan un 8%.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Cobo A, Cánovas MF, Moreno E., "Repercusión de la corrosión de la armadura en el comportamiento de estructuras de hormigón armado situadas en zona sísmica", Quito, Ecuador, CONPAT; 2007.
- [2] Flaga K., "Advances in materials applied in civil engineerin", J Mater Process Technol, 2000, n.º106, pp. 173-83.
- [3] Cobo, A., "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación", Fundación Escuela de la Edificación, Madrid, 2001.

- [4] Fang C, Lungren K, Chen L, Zhu C., “*Corrosion influence on bond in reinforced concrete*”, Cem Concr Res, 2004, n.º 34, pp. 2159–67.
- [5] Cairns J et al., “*Mechanical properties of corrosion of damaged reinforcement*”, ACI, 2005, n.º 102(4), pp.256–64.
- [6] Francisco J.Pancorbo., “*Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*”, Marcombo, S.A., 2010.
- [7] Hime W, Erlin B., “*Some chemical and physical aspects of phenomena associated with chloride-induced corrosion*”, American Concrete Institute. Corrosion, Concrete and Chlorides, Detroit, 1987, pp. 1–12.
- [8] Leek DS, Poole AB., “*The breakdown of the passive film on high yield mild steel by chloride ions*”, Corrosion of reinforcement corrosion in concrete, London, pp. 65–73, 1990.
- [9] Apostolopoulos, C. A. et al, “*Tensile behaviour of corroded reinforcing steel bars BStt 500*”, Construction and Building Materials, 2006, n.º 20, pp. 782-789.
- [10] A. Cobo et al, “*Mechanical properties variation of B500SD high ductility reinforcement regarding its corrosion degree*”, Materiales de construcción, 2011, n.º 61, pp. 517-532.
- [11] Apostolopoulos, C. A.; Papadakis, V. G., “*Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar*”, Construction and Building Materials, 2008, vol. 22, pp. 2316-2324.
- [12] Moreno, E. et all, “*Ductilidad del acero de armar con diferentes grados de corrosión aplicando el criterio de acero equivalente*”, Mater. Construcc., 2007, vol. 57, n.º 286, pp. 5-17.
- [13] N.D. Alexopoulos et al, “*Mechanical performance of BStIV grade Steel bars with regard to the long-term material degradation due to corrosion damage*”, Construction and Building Materials, 2007, vol. 21, pp. 1362-1369.
- [14] Grupo Español del Hormigón (GEHO), “*Durabilidad de estructuras de hormigón*”, Guía, 1993.
- [15] Lay S et al, “*Instructions on methodology and application of models for the prediction of the residual service life for classified environmental loads ant types of structures in Europe*” LIFECON, N° D 3.2, 2003, pp. 119.
- [16] Bastidas, D.M. et al, “*Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures: advantages and pitfalls*”, Corrosión Engineering, Science and Technology, vol. 43, pp.248-255, 2008.
- [17] M.D.García et al, “*Influencia de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero*”, 1998.
- [18] Ch.alk. Apostolopoulos, “*Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue*”, Construction and Building Material, vol.21, pp. 1447-1456, 2007.
- [19] Abdullah A. Almusallam, “*Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*”, Construction and Building Material, vol.15, pp. 361-368, 2001.
- [20] Wenjun Zhu, Raoul François, “*Effect of corrosion of reinforcement on the mechanical behaviour of highly corroded RC beams*”, Engineering Structures, vol.56, pp.544–554, 2013.
- [21] Aldridge, W.W., Ghaffarzadeh, M. y Farhadi, K, “*Effect of corrosion and bar spacing on bond properties of reinforcing bars in concrete*”, University of Oklahoma Research Institute, 1970.
- [22] A.W. Beeby, “*Relation between ductility and reinforcement properties*”, Report presented at the meeting of CEB Task Group 2.2, Venice, September 1996.
- [23] Maslehuddin, M., Allam, I. A., Al-Sulaimani, G. J., Al-Mana, A. y Abduljawwad, S. N., “*Effect of rusting of reinforcing steel on its mechanical properties and bond with concrete*”, Materials Journal, 1990.
- [24] Moreno, E.: “*Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón*”, Tesis Doctoral, Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [25] Comité Euro-International du Béton (CEB), “*Durable concrete structures CEB design guide*”, 1992.
- [26] Cosenza, E. et all, “*The concept of equivalent steel*”, CEB, n.º 218, Lausanne 1993, pp. 163-184.
- [27] Cosenza, E.; Greco, C.; Manfredi, G., “*An equivalent steel index in the Assessment of the ductility performances of the reinforcement*”, Ductility of RCS, CEB, n.º 242, Lausanne 1998, pp. 157-170.
- [28] Creazza, G.; Russo, S., “*A new proposal for defining the ductility of concrete reinforcement steels by means of a single parameter*”, Ductility of Reinforced Concrete Structures, CEB, n.º 242, Lausanne, 1998, pp. 171-181.
- [29] Ortega, H.: “*Estudio experimental de la influencia del tipo de acero en la capacidad de redistribución en losas de hormigón armado*”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1998.
- [30] UNE 36065 EX:2000, “*Corrugated weldable steel bars with special ductility features for Reinforcement Concrete Structures*”, AENOR, 2000.
- [31] Ministerio de Fomento, “*Structural concrete instruction EHE-08*”, Madrid. (2008).
- [32] ASTM G190 - 06, “*Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*”.
- [33] UNE-EN ISO 8407, “*Corrosión de los metales y aleaciones*”, 2014.
- [33] Moreno, E.: “*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, 2008.