

# Comportamiento de armaduras laminadas en frío sometidas a distintos grados de corrosión

<sup>1</sup>González Rodrigo, S.\*; <sup>2</sup>Cobo Escamilla, A.  
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid  
Universidad Politécnica de Madrid

<sup>1</sup>Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control

<sup>2</sup>Departamento de Tecnología de la Edificación  
Avda./ Juan de Herrera, 6, 28040 Madrid, España  
Teléfono: 651 69 93 09. Fax: 91 336 76 11  
e-mail: sonsoles.gonzalez@upm.es

## RESUMEN

Los efectos de la corrosión sobre el acero se manifiestan fundamentalmente por la pérdida de capacidad portante y la disminución de su capacidad de alargamiento. Aunque su incidencia sobre armaduras laminadas en caliente se ha estudiado en numerosos trabajos, existe muy poca información en la literatura acerca de los efectos sobre barras laminadas en frío.

En este trabajo se muestran las consecuencias de la corrosión en las propiedades mecánicas de las barras corroídas a partir de experiencias con barras embebidas en mortero de cemento y sometidas a un proceso acelerado de corrosión mediante cloruros.

Para ello se han embebido varillas de acero de armar de 8mm de diámetro en losas de mortero a las que se ha añadido cloruro cálcico en el momento de su amasado. Después del curado las barras se han cortocircuitado externamente y se las ha sometido a un proceso de corrosión acelerada, haciendo pasar cantidades variables de corriente por cada una de ellas. Posteriormente se ha procedido a la extracción de las barras y a su ensayo a tracción hasta la rotura, obteniendo sus características de ductilidad, comparando estos parámetros con los de las barras patrón que no han experimentado ningún proceso de corrosión.

El resultado de los ensayos muestra que existen modificaciones en el comportamiento dúctil de las barras sometidas al proceso de corrosión.

## 1.- Introducción

### 1.1.- Corrosión de las armaduras

La causa más frecuente de deterioro de una estructura de hormigón armado es la corrosión de sus armaduras. Uno de los efectos más significativos de la corrosión es la modificación de las propiedades mecánicas del acero<sup>[1,2]</sup>.

En las últimas décadas los problemas originados por una durabilidad insuficiente han crecido de forma dramática, originando grandes problemas, no sólo de índole económica, por el elevado coste que supone la reparación de estas estructuras deterioradas, sino por el decremento de la fiabilidad y seguridad de las mismas. La vida útil del hormigón armado es el periodo de tiempo en el cual el rendimiento del hormigón mantendrá un nivel compatible con el cumplimiento de los requisitos de rendimiento de la estructura completa. La durabilidad es por tanto, la capacidad de una estructura de

resistir las agresiones de su entorno sin que su rendimiento descienda por debajo de unos mínimos comúnmente aceptables.

Los factores principales que definen la durabilidad del hormigón son, en primer lugar, los errores iniciales (elección de la dosificación, deficiente ejecución, baja calidad de los materiales). En segundo lugar los errores en el diseño y cálculo de la estructura, su puesta en obra y su mantenimiento, debido a los problemas originados por a las cargas y empujes no considerados, así como impactos y acciones accidentales, como el sismo. Y por último aquellos condicionados por las características específicas del entorno. La pérdida de rendimiento tanto del acero como del hormigón originado por su deterioro puede ser el resultado de la combinación de uno o varios procesos mecánicos, físicos químicos y biológicos (fig1), siendo el resultado final la rotura o colapso del conjunto<sup>[2]</sup>.

MECHANICAL	plastic shrinkage						
	plastic settlement						
		direct loading		imposed deformations			
PHYSICAL	temperature differences						
	shrinkage						
	early	frost action	late				
CHEMICAL						acid, sulfate	
						alkali attack	
						reinforcement corrosion	
BIOLOGICAL						microgrowth	
						H <sub>2</sub> S attack	
		HOOR	DAY	WEEK	MONTH	YEAR	CENTURY

fig. 1: "Mecanismos de deterioro del hormigón y tiempo estimado de aparición del la rotura" <sup>[3]</sup>.

En el acero de armar, el efecto de la corrosión no solo afecta a su aspecto exterior, también lo hace sobre su resistencia y seguridad, ya que produce una pérdida significativa de su sección eficaz, así como un considerable deterioro de la interfase acero hormigón.

Existen numerosos trabajos previos que exponen la doble protección que supone el hormigón para el acero. Por un lado el hormigón representa una barrera física que separa el metal del contacto directo con la atmósfera. Tradicionalmente se pensaba que la elevada alcalinidad del hormigón constituía una frontera de protección permanente del acero frente a cualquier agresión exterior. Si los recubrimientos empleados carecen del espesor necesario y/o el hormigón no es suficientemente impermeable, se produce la penetración de agentes agresivos hasta la armadura, desprotegiendo el acero. Además en la interfase acero-hormigón, debido a un proceso de naturaleza fundamentalmente electroquímica, se forma una capa pasivante autoregenerable de espesor muy pequeño. De esta forma el acero permanecerá indefinidamente pasivo, a menos que se produzca una disminución del valor del pH, necesaria para iniciar la destrucción del estado pasivo.

La pérdida de la pasividad de la armadura se debe, en la mayoría de las ocasiones a dos factores desencadenes: la carbonatación del hormigón, que se origina por la reacción del dióxido de carbono contenido en la atmósfera con las sustancias alcalinas de la solución de los poros y los componentes hidratados del hormigón, produciendo un descenso del pH de la masa de hormigón y a la presencia de iones despasivantes,

especialmente cloruros. Ambos factores desencadenan la corrosión siempre que sucedan en determinadas condiciones de humedad y presencia de oxígeno.

Cuando el proceso es incipiente y la corrosión se produce de modo uniforme se puede suponer, en una primera aproximación, que la capacidad mecánica de la armadura disminuye de forma proporcional a la pérdida de sección. Cuando el fenómeno está más avanzado, la existencia de picaduras actúan como concentradores de tensión, produciendo un estado de tensiones que fragiliza un material que en un principio era dúctil.

La mayoría de los trabajos previos sobre la corrosión en barras de acero de armar se centran en aspectos metalúrgicos como la pérdida de masa, y la profundidad y densidad de las picaduras. Maslehuddin<sup>4</sup> et al evaluaron los efectos de la corrosión atmosférica en las propiedades mecánicas de las barras de acero así como su influencia en la pérdida de peso, de resistencia y de sus características de servicio, como su alargamiento y deformabilidad.

## 1.2.- Ductilidad del acero

El comportamiento de una estructura de hormigón armada frente a una determinada sollicitación permite que consiga acomodaciones plásticas una vez que ha alcanzado grandes resistencias iniciales.

Una estructura dúctil permite redistribuir los efectos de las acciones. Así, cuando en una sección se alcanza su máxima capacidad portante, otra, con tensión alejada del máximo, puede asumir más carga, pero para ello es necesario que la primera de las secciones pueda seguir deformándose. Para ello las estructuras deben ofrecerle una capacidad de giro suficiente en las secciones más solicitadas

En la práctica, el estudio del grado de ductilidad de una estructura permite el diseño de las mismas mediante la aplicación de métodos de análisis no lineales y de redistribución ilimitada, así mismo, en las fase de proyecto de obra nueva permite minimizar el coste, comparando distintas combinaciones de armados equivalentes, y en comprobaciones o recálculos estudiar los distintos patrones de agotamiento de la estructura.

En este proyecto se busca precisamente analizar el comportamiento dúctil del acero en estructuras de hormigón armado ya construidas, donde interesa analizar la estructura con redistribución de sollicitaciones. Esto permite la comparación de resistencias últimas con una banda de valores centrada en los obtenidos en el régimen elástico lineal y de una apertura igual a doble del valor de la máxima capacidad de redistribución.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), el Código Modelo CEB-FIP 1990 (CM90) o el Eurocódigo 2 (EC2) permiten redistribuciones de sollicitaciones en función de diversos parámetros que traten de medir la ductilidad de las secciones de hormigón armado. La ductilidad del acero influye de forma decisiva en la ductilidad de la sección.

El procedimiento habitual para cuantificar la ductilidad del acero considera dos parámetros, que indican la ductilidad mínima exigida:

- La relación entre la tensión de rotura y la tensión en el límite elástico ( $f_u/f_y$  ó  $f_s/f_y$ ) o ratio de endurecimiento a tracción. Indica la reserva de resistencia que le queda al acero una vez que ha alcanzado el límite elástico. Cuanto mayor sea la relación ( $f_u/f_y$ ) mayor seguridad presenta a rotura.
- La deformación bajo carga máxima ( $\Delta g_t$ ,  $\epsilon_{m\acute{a}x}$ ,  $\epsilon_{su}$ , ó  $\epsilon_u$ ). Cuanto mayor es este valor, más se puede deformar el acero antes de su rotura y mejor ductilidad presenta.

En general, para barras corrugadas conformadas en caliente, considerando diferentes normativas europeas <sup>[5,6,7]</sup>, los distintos rangos para clasificar la ductilidad del acero serían:

- Ductilidad baja o normal es la que tienen una relación carga de rotura – tensión en el límite elástico ( $f_u/f_y$ ) de 1,05, con un alargamiento en rotura ( $\epsilon_{m\acute{a}x}$ ) que oscila entre 2,5 y 5,0.
- Ductilidad media es la que tienen una relación  $f_u/f_y$  de 1,08 y un alargamiento en rotura  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  de 5,0
- Ductilidad alta es la que tienen una relación  $f_u/f_y$  de 1,15 a 1,20 y un alargamiento en rotura  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  de 7,5 a 9,0.

Este trabajo pretende ahondar en el conocimiento de los efectos de la corrosión del acero en la variación de las propiedades de ductilidad del acero de armar, en función de su grado de corrosión

## 2.- Trabajo experimental

En los ensayos realizados, la corrosión ha sido inducida mediante iones cloruro, para ello se ha añadido una pequeña cantidad de cloruro cálcico en el agua de amasado, de esta manera, se forma una celda de corrosión en la zona catódica en el cual se da el proceso de reducción y una pequeña área anódica donde se disuelve el acero (picadura).

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación se han ensayado un conjunto de doce armaduras en tres grupos de cuatro barras, dos de los cuales se han utilizado en la elaboración de sendas piezas prismáticas de mortero y el tercero se ha utilizado como elemento de referencia.

Para la fabricación del mortero se ha utilizado cemento Portland CEM II / B-L 32,5N, arena normalizada CEN UNE-EN 196-1:1996 y agua potable de Madrid, añadiendo además cloruro cálcico (2% de ión CL<sup>-</sup> en relación con el peso de cemento). Todos los materiales utilizados en la fabricación del mortero cumplen con las especificaciones de la EHE.

La dosificación utilizada es 1:3:0,5, con el fin de conseguir una mejora en la conductividad eléctrica del hormigón e inducir la corrosión se ha utilizado con de cloruro cálcico anhidro en polvo en una proporción del 4% en peso de cemento seco. (42 gramos por kilogramo de cemento) añadido al agua de amasado.

Las dos piezas de dimensiones 30x15x3,8cm de mortero se han realizado con la misma dosificación

Las probetas utilizadas son barras de diámetro 8mm de 0,50m de longitud de acero soldable con altas características de ductilidad B 500 SD según la Norma UNE 36065:2000 EX.

Las barras de acero a ensayar fueron numeradas y pesadas para poder comprobar con posterioridad la pérdida de peso producida durante el proceso de corrosión.

La longitud prevista para la corrosión ha sido delimitada con cinta aislante, dejando un tramo intermedio efectivo de la barra de 30cm como zona ensayar. La cinta se coloca con el fin de evitar la concentración de corrosión en la interfase acero- hormigón – ambiente.

Una vez que la probeta es desmoldada a las 24 horas de su vertido, se cura en cámara húmeda durante 28 días, posteriormente son sometidas a tiempos variables de polarización anódica con el fin de acelerar el proceso de corrosión. La corriente ha

circulado entre las barra, cortocircuitadas externamente, y las planchas de plomo colocadas sobre la superficie exterior que han hecho las veces de cátodo. La cantidad de corriente que ha pasado por cada barra se ha registrado periódicamente con un multímetro en serie con la barra durante un periodo de un mes.

Posteriormente se han extraído las barras mediante golpeo con la maza. La primera barra en ser extraída de cada probeta es la que mostraba exteriormente una fisuración más pronunciada, ya que su grado de corrosión era superior al del resto.

Los extremos de las barras extraídas, la longitud que supera los 30 cm centrales, se han sumergido en una disolución al 50% de ClH, con el fin de retirar los restos de oxidación superficial. Las barras han sido de nuevo pesadas y se puede observar que la pérdida de peso es del orden de los 0,2 gramos, despreciable a los efectos del estudio.

Posteriormente han sido sumergidas en su totalidad en la misma concentración durante 24 horas con el fin de retirar los restos de oxidación producidos en la zona central de las mismas, volviéndose a pesar de nuevo después de la operación. Visualmente puede apreciarse como las barras de la segunda pieza (BA29,BA30,BA31,BA32) han sufrido una pérdida de peso superior a las de la otra.

Las barras, una vez han sido limpiadas, permiten obtener los valores de la pérdida porcentual de la probeta de acero producida por la corrosión. A continuación se ensayan a tracción según ensayo normalizado ISO 15630-1

A partir de los resultados de los ensayos a tracción se han obtenido los siguientes valores: tensión en el límite elástico ( $f_y$ ), tensión de rotura ( $f_u$ ), cociente entre la tensión de rotura y tensión en el límite elástico ( $f_u/f_y$ ), alargamiento unitario ( $\epsilon_u$ ) y alargamiento bajo carga máxima ( $\epsilon_{max}$ )

### 3.- Resultados obtenidos

#### 3.1.- Resultados de los ensayos de tracción

En las tablas 2 y 3 se recogen los resultados de los ensayos a tracción de las barras corrugadas de diámetro 8mm con sus distintos grados de corrosión, con la siguiente nomenclatura:

- **Ag** [%]: Alargamiento no proporcional porcentual bajo carga máxima, o simplemente alargamiento de rotura o deformación de rotura.
- **Agt**,  $\epsilon_{max}$ ,  $\epsilon_{su}$ , ó  $\epsilon_u$  [%]: Alargamiento total porcentual bajo carga máxima, o también deformación máxima.
- **F<sub>y</sub>** [kN]: Fuerza correspondiente a la tensión en el límite elástico.
- **F<sub>u</sub>** ó **F<sub>s</sub>** [kN]: Fuerza de rotura o de deformación máxima.
- **f<sub>y</sub>** ó **R<sub>p0,2</sub>** [N/mm<sup>2</sup>]: Resistencia en el límite elástico convencional al 0,2%.
- **f<sub>u</sub>**, **f<sub>s</sub>** ó **R<sub>m</sub>** [N/mm<sup>2</sup>]: Resistencia máxima a tracción o carga unitaria de rotura.
- **E** ó **E<sub>s</sub>**: [N/mm<sup>2</sup>]: Módulo de elasticidad longitudinal del acero. Para todos los casos se ha supuesto el valor de  $E=200.000\text{N/mm}^2$ .
- **$\epsilon_y$**  [%]: Alargamiento en el límite elástico

	<b>Ag</b> %	<b>Agt (<math>\epsilon_{\text{máx}}</math>)</b> %	<b>Fy</b> kN	<b>Fu</b> kN	<b>fy</b> N/mm <sup>2</sup>	<b>fu</b> N/mm <sup>2</sup>
BA1	12,50	12,82	30,91	32,22	614,91	641,04
BA2	15,83	16,17	28,31	33,44	563,14	665,27
BA3	13,54	13,86	26,96	32,01	536,36	636,84
BA4	15,78	16,10	27,32	32,40	543,61	644,59
BA7	5,05	5,24	14,33	18,40	285,00	366,14
BA8	10,05	10,34	23,41	28,64	465,74	569,81
BA29	6,41	6,66	21,29	25,69	423,47	511,10
BA30	4,48	4,71	19,33	22,98	384,59	457,13
BA31	0,21	0,43	22,00	22,07	437,58	438,97
BA32	5,89	6,13	20,80	24,68	413,80	491,01

Tabla 1: “Resultados de los ensayos a tracción de las barras corrugadas de diámetro 8mm con distintos grados de corrosión”.

	<b>E</b> (0,1-0,3 fs)	<b>N/mm<sup>2</sup></b> fs = 100-500	<b><math>\epsilon</math> 0,2 %</b>	<b>fy/E</b> $\epsilon_y$	<b>fy/E'</b>	<b>fs/fy</b>
BA1	42.478	48.489	2,35	1,45	1,27	1,04
BA2	21.377	31.861	1,63	2,63	1,77	1,18
BA3	47.343	53.354	1,14	1,13	1,01	1,19
BA4	38.787	46.098	1,30	1,40	1,18	1,19
BA7	105.109	93.188	0,48	0,27	0,31	1,28
BA8	34.847	37.307	1,54	1,34	1,25	1,22
BA29	37.808	38.226	1,31	1,12	1,11	1,21
BA30	41.835	41.673	1,13	0,92	0,92	1,19
BA31	174.102	221.745	0,42	0,25	0,20	1,00
BA32	26.018	31.184	1,80	1,59	1,33	1,19

Tabla 2: “Resultados de los ensayos a tracción y de los parámetros de ductilidad de las barras corrugadas de diámetro 8mm con distintos grados de corrosión”.

En la figura 2 están representados los diagramas tensión-deformación de las cuatro barras corrugadas patrón, sin corroer, de acero, observándose un comportamiento análogo en todas ellas. Las diferencias más significativas están en la deformación máxima.

La figura 3 representa los diagramas tensión deformación de las seis barras de acero corroídas. Se puede apreciar la diferencia entre las tensiones y las deformaciones de las distintas barras según su grado de corrosión, por lo que el rango de datos es muy variable.

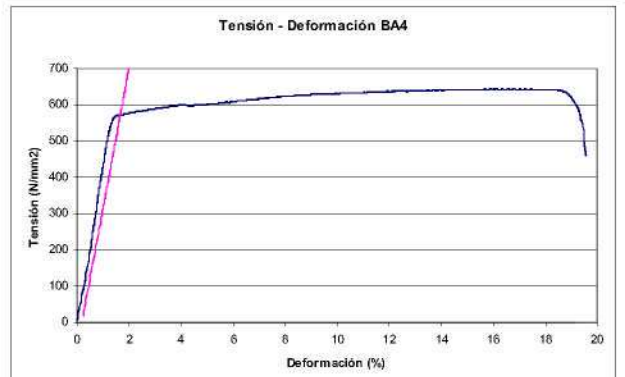
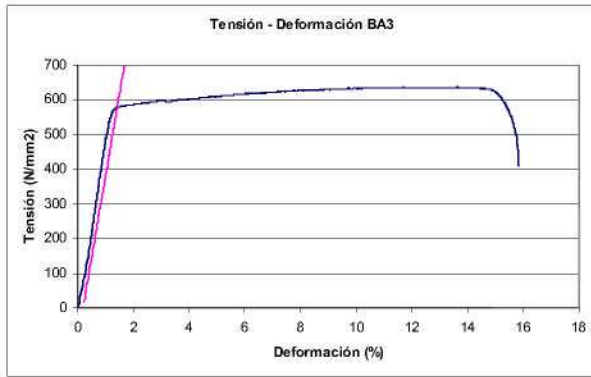
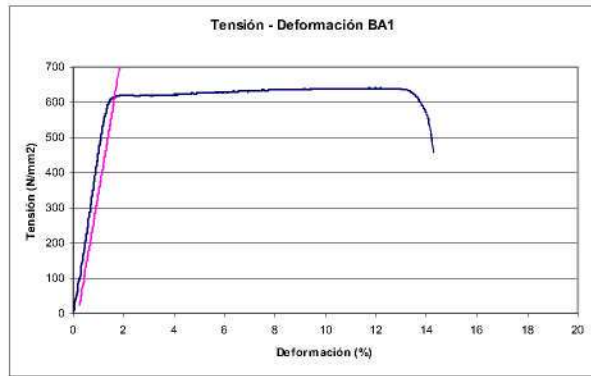
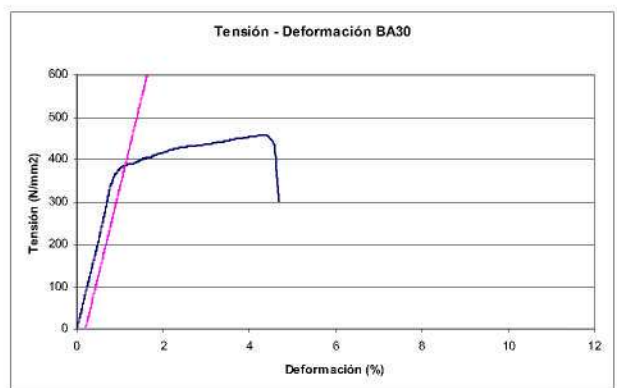
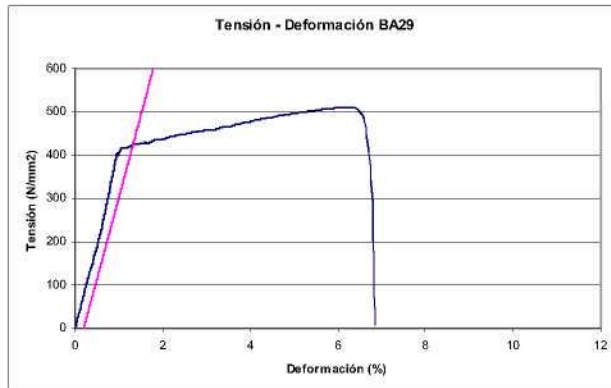
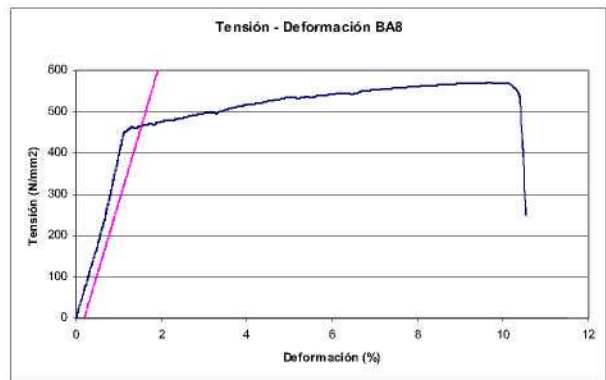
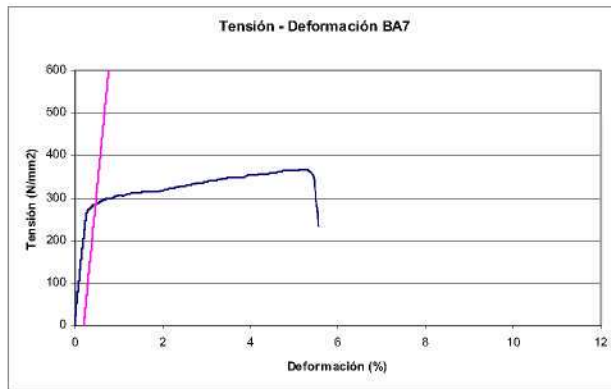


fig. 2 “Diagramas tensión deformación de las cuatro barras corrugadas de acero B500SD patrón. Se representa la recta 0,2% de la deformación con la pendiente del módulo de elasticidad E”.



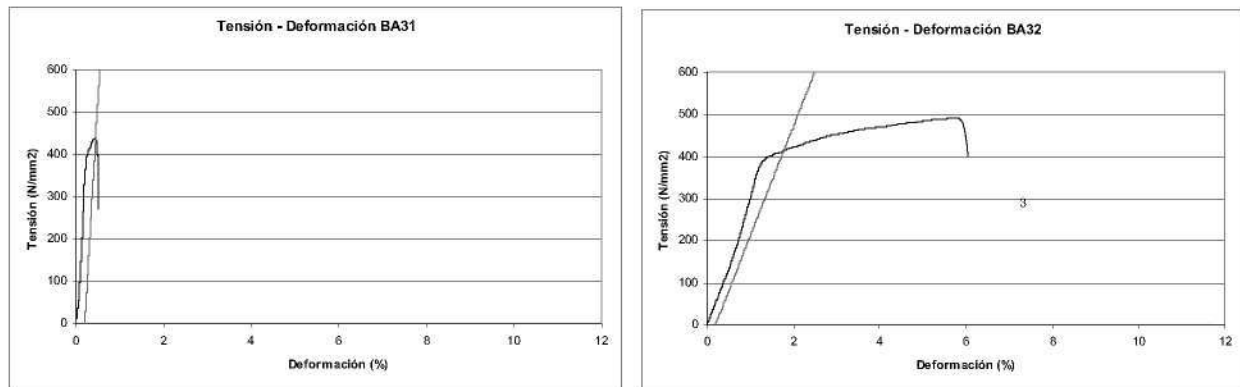


fig. 3 “Diagramas tensión deformación de las seis barras corrugadas de acero B500SD corroídas. Se representa la recta 0,2% de la deformación con la pendiente del módulo de elasticidad E”.

### 3.2.- Resultados de los cálculos de ductilidad

A partir de los resultados de los ensayos de tracción, se han calculado los parámetros de ductilidad del acero, con sus distintos grados de corrosión a partir de los establecidos en las diferentes normas europeas (tabla 3).

En la figuras 4 y 5 se representan la relación entre la fuerza ejercida en el ensayo de tracción, tanto en el límite elástico como en agotamiento, así como la tensión en el límite elástico y la de rotura, frente al grado de corrosión de cada una de las probetas, obtenido por gravimetría entre la diferencia de peso de cada una de las barras antes y después del proceso de corrosión (tabla 4).

	Valores iniciales		Franja central (30cm)		Peso perdido		(Pi-Pf/Pi) %
	Li	Pi	%Li	%Pi	total	Pf	
BA1	50,0	192,5					
BA2	50,5	197,6					
BA3	50,0	192,7					
BA4	50,0	192,8					
BA7	50,3	193,1	0,6	115,2	8,5	106,7	7,4
BA8	50,6	194,7	0,6	115,4	6,4	109,0	5,5
BA29	50,6	195,1	0,6	115,7	13,7	102,0	11,8
BA30	50,7	195,7	0,6	115,8	16,1	99,7	13,9
BA31	50,5	194,8	0,6	115,7	17,0	98,7	14,7
BA32	50,5	195,0	0,6	115,8	15,3	100,5	13,2

Tabla 3 “Valores de peso y longitud de cada una de las barras antes y después del proceso de corrosión”.

La figura 6 muestra el alargamiento para carga máxima de cada una de las barras en función del porcentaje de acero corroído, y la figura 7 la relación entre tensión de rotura y tensión en el límite elástico para el mismo porcentaje. Ambos son los parámetros utilizados mayoritariamente para evaluar el grado de ductilidad del elemento.



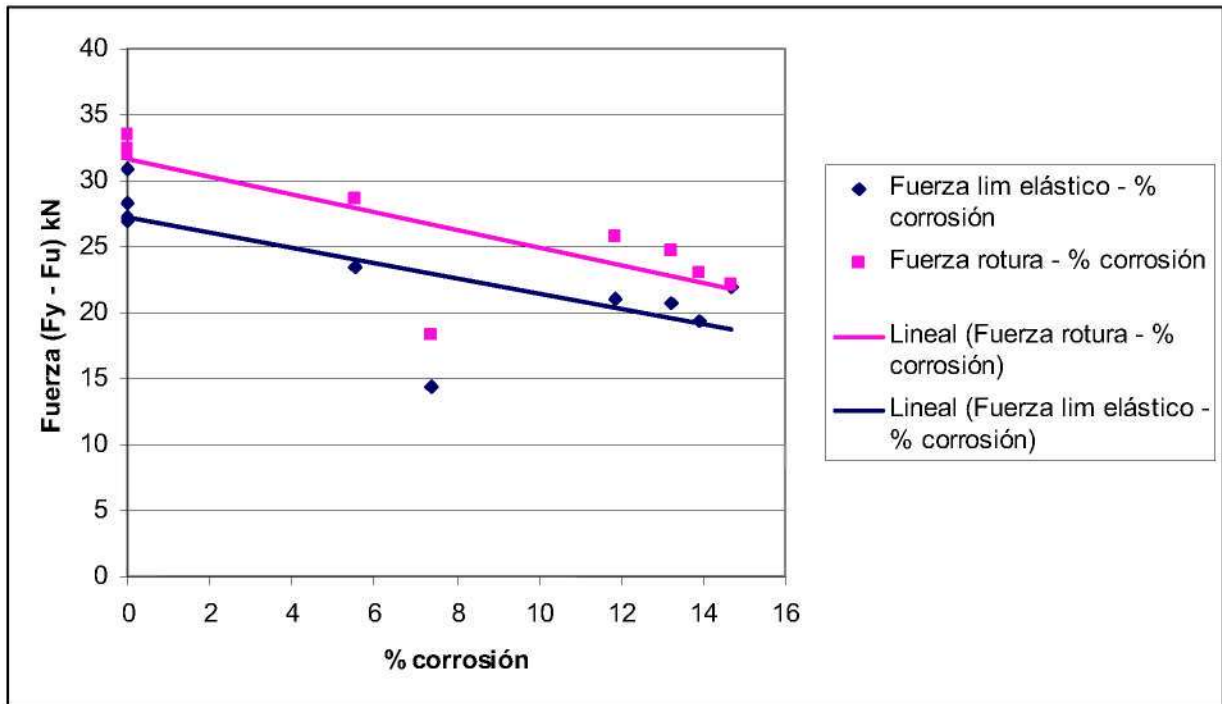


fig. 4 “Valores de la fuerza en el límite elástico y de rotura de cada una de las probetas, frente al porcentaje de corrosión de la barra”.

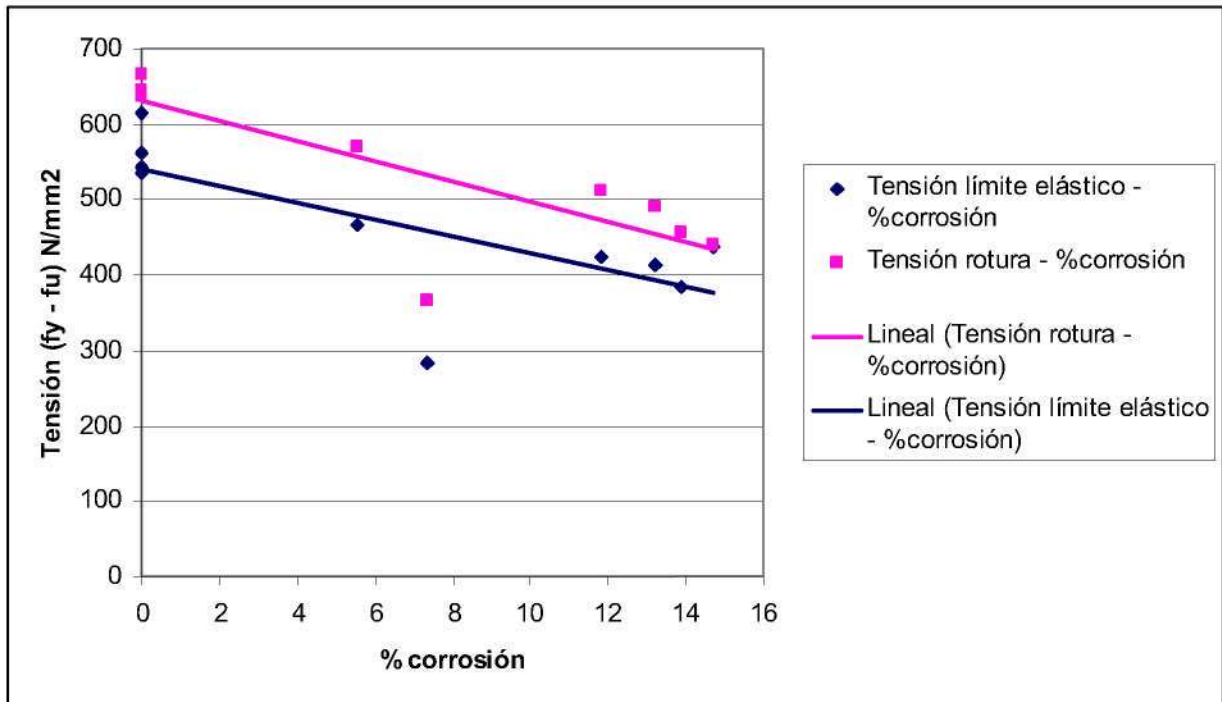


fig. 5 “Valores de la tensión en el límite elástico y de rotura de cada una de las probetas, frente al porcentaje de corrosión de la barra”.

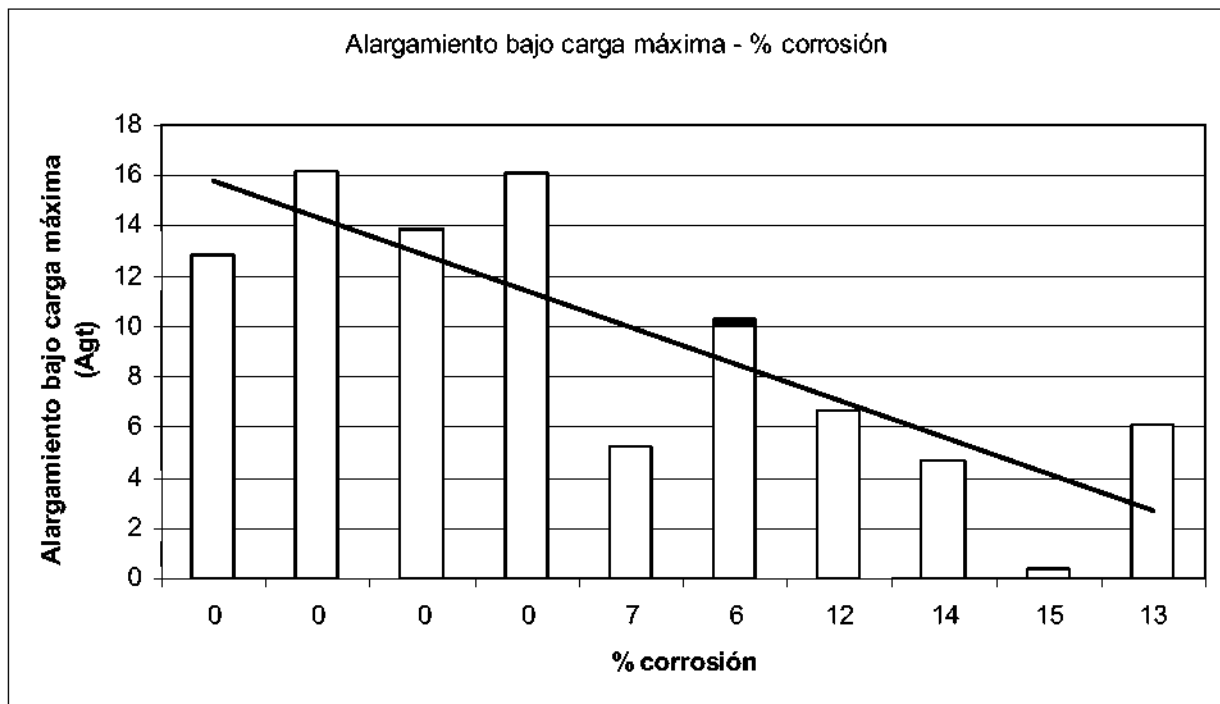


fig. 6 "Valores de alargamiento para carga máxima frente a porcentaje de corrosión de cada una de las barras".

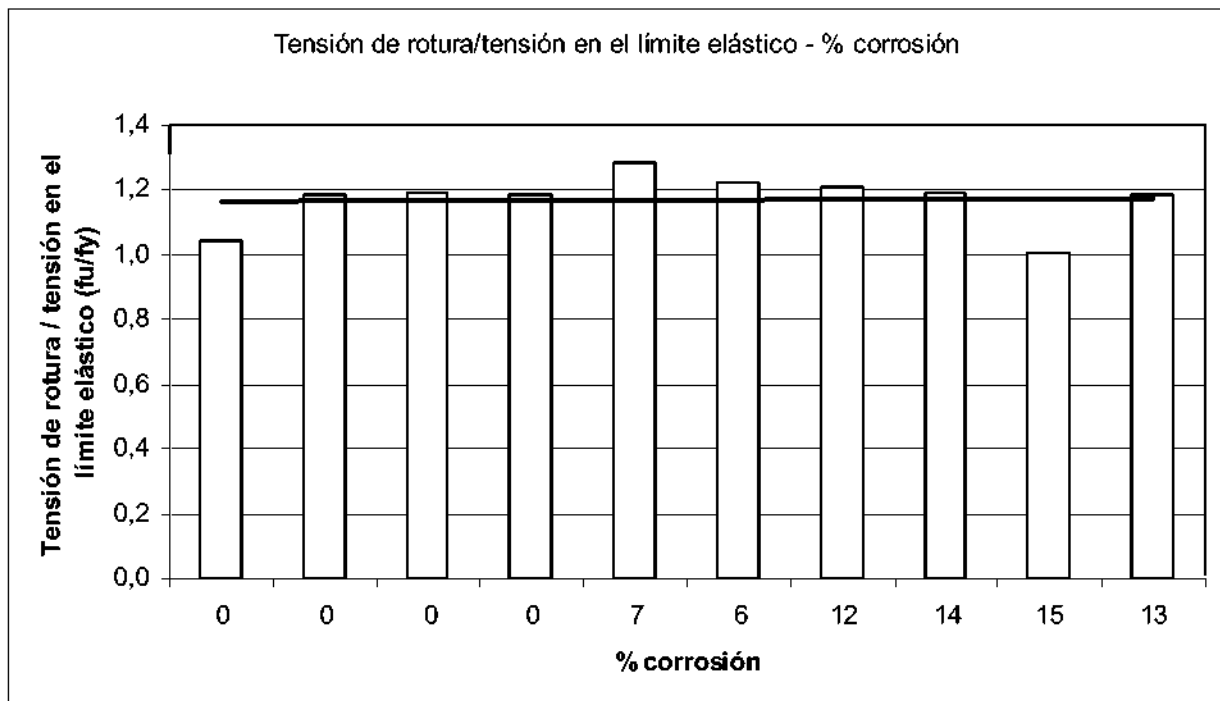


fig. 7 "Valores de la relación entre la tensión de rotura y la tensión en el límite elástico en función del porcentaje de barra corroída".

#### 4.- Análisis de los resultados

Analizando los resultados de la figura 2 frente a los datos de las figura 3, podemos apreciar que el grado de corrosión influye significativamente en la pérdida de tensión de

las barras, debido fundamentalmente a la brusca reducción de sección eficaz, producida por el incremento de la corrosión. En las mismas gráficas podemos observar la disminución de la capacidad de alargamiento de la barra, para tensiones elevadas, lo que indica una menor posibilidad de acomodaciones plásticas en una pieza armada con acero corroído. Esta rebaja de los valores de tensión, tanto en límite elástico, como en agotamiento también se aprecia en las figuras 4 y 5.

En cuanto a la deformación, en la figura 6 se aprecia que el alargamiento bajo carga máxima es sensible a la corrosión, si bien es cierto que depende enormemente del grado de corrosión que sufre cada barra. En el ensayo, la barra BA 29 ha tenido una deformación antes de la rotura muy inferior al resto de la probetas ensayas, probablemente porque se produjo una rotura frágil aprovechando una picadura superficial del acero

Por otro lado la relación  $f_u/f_y$  se mantiene constante, sin apreciarse variación significativa. También se observa que, en general, la tendencia indica que todas ellas, independientemente de si están corroídas o si no, o de su grado de corrosión, se mantienen en valores de alta ductilidad según los baremos antes señalados. Sin considerar barras como la BA29, cuya reserva dúctil ha quedado muy mermada por su rotura frágil.

## **6.- Conclusiones**

El comportamiento dúctil del acero sometido a un proceso de corrosión por cloruros es inferior al del acero original. Aunque la relación entre la tensión de rotura y la producida en el límite elástico no muestra diferencias importantes, hemos observado en los diagramas tensión deformación que la posibilidad de deformaciones plásticas de la pieza armada con este tipo de acero, son significativamente menores, debido a que el alargamiento bajo carga máxima de estos aceros disminuye notablemente.

## REFERENCIAS

- [1] Apostolopoulos C.A., Papadopoulos M.P. (2007), Tensile and low cycle fatigue behaviour of corroded reinforcing steel bars S400 .*Construction and Building Materials*. **21**, 1362-1369
- [2] Apostolopoulos C.A., Papadopoulos M.P. (2007), Mechanical behaviour of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue .*Construction and Building Materials*. **21**, 1447-1456.
- [3] Apostolopoulos C.A., Papadakis V.G. (2008), Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*. **22**, 2316-2324.
- [3] Cobo Escamilla, A. (2001). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación*. Madrid. Fundación Escuela de la Edificación.
- [4] Maslehuddin M, Ibrahim I Sariciem H, Abdullaziz I. (1993), Influence of atmospheric corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel. .*Construction and Building Materials*. **8**, 35-41.
- [5] AENOR (1993): *UNE-ENV 1992-1-1: EUROCÓDIGO 2 Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas de edificación*. Madrid. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [6] AENOR (1998): *UNE-ENV 1998-1: EUROCÓDIGO 8 Proyecto de estructuras frente a sismo. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas de edificación*. Madrid. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [7] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN (2008): *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural*. Madrid. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones.