

TOLERANCIA AL DAÑO DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA PARA ARMADURAS ACTIVAS

A. Valiente

**Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica de Madrid**

Resumen. La condición de que las estructuras sean tolerantes al daño se está convirtiendo en una necesidad que afecta especialmente a las estructuras construidas con aceros de gran resistencia. La técnica del pretensado o postensado que se emplea en ingeniería civil requiere aceros con esas características. En este trabajo se analiza la tolerancia de los distintos tipos de armaduras activas utilizadas habitualmente, empleando como referencia para contrastar los datos experimentales la capacidad resistente determinada por dos modos de fallo contrapuestos: la rotura frágil y el agotamiento plástico. Se incluyen en el análisis los daños debidos a procesos de fisuración, entallas y cargas laterales sobre la armadura.

Abstract. Damage tolerance is becoming a requirement in structural engineering. Most of the structural steels used in civil engineering provide a high level of damage tolerance, but this level decreases for the steels of the highest resistance, as those used in the prestressing techniques. This work examines the damage tolerance of the of the wires and bars more commonly used for prestressing structures. Two failure loads, that of plastic collapse and that of brittle fracture, are compared with the available experimental data, this comparison being used as a basis to assess the damage tolerance. The damage due to cracking, notching and lateral loading is included in the assessment.

1. INTRODUCCIÓN

Se puede afirmar con poco margen de error que la tolerancia al daño es una constante en las estructuras creadas por la ingeniería civil. Tradicionalmente, el ingeniero civil ha sabido elegir materiales dúctiles para la construcción de estructuras y ha conseguido altos niveles de tolerancia al daño sin necesidad de utilizar criterios de diseño específicamente dirigidos a ese fin. Ha bastado para ello aplicar métodos de diseño que suponen elementos estructurales sin defectos ni sujetos a degradación, o en todo caso a pérdidas poco importantes de sección resistente compensables mediante un ligero sobredimensionamiento.

Sin embargo, en los últimos tiempos la situación está cambiando debido al progresivo endurecimiento de las condiciones de servicio de las estructuras y a la extensiva utilización de técnicas constructivas que requieren materiales estructurales de gran resistencia mecánica. Ambas circunstancias afectan negativamente a la tolerancia al daño hasta el punto de hacer necesaria la aplicación de criterios de diseño basados en la evaluación de dicha propiedad y en la determinación de límites que permitan no sobrepasarla. Una muestra reciente de esta tendencia son las limitaciones de espesor que establece el Eurocódigo 3 para los aceros de construcción [1]. Por razones de tolerancia al daño, el espesor del acero no puede superar un valor máximo dependiente de la temperatura y de la velocidad de deformación, aun cuando las tensiones calculadas según los criterios de diseño clásicos sean perfectamente admisibles.

La técnica del pretensado y postensado de estructuras es

una de las más afectadas por la necesidad de controlar la tolerancia al daño. Mediante esta técnica, que constituye uno de los grandes hallazgos de la ingeniería civil, los excedentes de resistencia mecánica de un material se utilizan para compensar las carencias de resistencia o de rigidez de otro, combinando los dos en un mismo elemento estructural con óptimo aprovechamiento de ambos. Esta forma de funcionamiento se consigue introduciendo en la estructura acciones internas de pretensado o postesado que se superponen a las acciones externas y producen el efecto indicado en el estado final de tensiones y deformaciones de la estructura.

En este trabajo se analiza la tolerancia al daño de las armaduras activas más comunes en la práctica. Como paso previo se formula el concepto de tolerancia al daño, se examina el modo de tipificar el daño en función de la forma física que puede revestir, y se establecen los valores límite de la tolerancia a partir de los comportamientos extremos que un material puede exhibir ante la rotura. Estos principios y conceptos generales se particularizan para el caso de las armaduras activas tras describir su tipología, los materiales con que se fabrican y los daños que pueden experimentar. Los resultados se analizan comparándolos con datos experimentales de rotura de armaduras activas en presencia de daño.

2. TOLERANCIA AL DAÑO

La expresión tolerancia al daño es una acertada denominación que procede de la ingeniería aeronáutica e indica la capacidad de un componente para realizar su función estructural habiendo sufrido alteraciones desfavorables localiza-

das, que reciben el nombre genérico de daño.

Las alteraciones pueden consistir en pérdidas de continuidad física del material (fisuras), pérdidas de material (entallas) o formación de zonas débiles por degradación local del material. Estas últimas acaban degenerando en entallas o fisuras cuando la debilidad del material degradado hace que éste se rompa o se separe del resto bajo las acciones de servicio. El daño, pues, es asimilable a defectos de geometría tipo fisura o entalla. La oposición que los defectos encuentran para desarrollarse y la capacidad del material para soportar acciones mecánicas en presencia de defectos son los factores determinantes de la tolerancia al daño.

En el caso de los materiales metálicos, las concentraciones de tensión causadas por un defecto geométrico producen efectos oscilantes entre la rotura frágil y el agotamiento plástico del ligamento resistente que conserva la sección afectada. La resistencia a la rotura frágil y el límite elástico del material son los factores determinantes de que la plastificación se anticipe a la rotura frágil y la concentración elástica de tensiones debida al defecto se transforme en concentración de deformaciones plásticas. El agotamiento plástico del ligamento resistente se producirá posteriormente si la plastificación total precede al desgarramiento dúctil iniciado en el defecto, lo cual depende nuevamente de la resistencia del material a la rotura, pero esta vez a la rotura dúctil.

La rotura frágil y el agotamiento plástico constituyen, pues dos mecanismos de fallo que limitan la tolerancia al daño en los materiales metálicos. Entre estos dos mecanismos límite se sitúan la propagación frágil y el desgarramiento dúctil a partir del defecto en etapas de plastificación anteriores al agotamiento plástico. Las cargas que producen la rotura frágil y el agotamiento plástico proporcionan una medida cuantitativa del límite de tolerancia al daño.

1. Agotamiento plástico. En el agotamiento plástico, el defecto influye esencialmente como pérdida de sección resistente, ya que la concentración de tensiones se diluye. Generalmente, la carga que produce el agotamiento se calcula como la resultante de la distribución de tensiones mediante la cual un sólido plástico ideal con la geometría del elemento dañado se transforma, a efectos de deformación, en un mecanismo generado a partir del defecto. Para tener en cuenta la capacidad de endurecimiento por deformación del material, el límite elástico σ_Y del sólido plástico ideal se iguala a un valor estimado con el límite elástico convencional $R_{p0.2}$ y la resistencia a tracción R_m .

El análisis dimensional permite determinar la forma de la expresión general de la carga de agotamiento plástico. En el caso de que dicha carga sea una fuerza P_Y , se tiene:

$$P_Y = W_0^2 \sigma_Y f_Y \left(\frac{a}{W_0}, \frac{W_i}{W_0} \right) \quad (1)$$

donde a es la dimensión que determina el tamaño del defecto, W_i son las demás dimensiones del elemento estructural y $f_Y(\bullet)$ es una función propia del elemento y del mecanismo de agotamiento plástico adoptado. Este puede no ser único, en cuyo caso debe adoptarse el que predice la menor carga de agotamiento para establecer la tolerancia al daño correspondiente a este modo de fallo. En la referencia [2] puede encontrarse una extensa recopilación de cargas de agotamiento plástico.

2. Rotura frágil. La rotura de un material metálico por propagación frágil de una fisura está controlada por la tenacidad de fractura del material. La carga de rotura se predice igualando la tenacidad de fractura del material K_C al factor de intensidad de tensiones K_I del elemento estructural. En el caso de que dicha carga sea una fuerza P_R , se tiene:

$$K_C = K_I = \frac{P_R}{W_0^{1.5}} f_C \left(\frac{a}{W_0}, \frac{W_i}{W_0} \right) \quad (2)$$

donde a y W_i tienen el mismo significado que en la ecuación (1) y $f_C(\bullet)$ es una función propia del elemento.

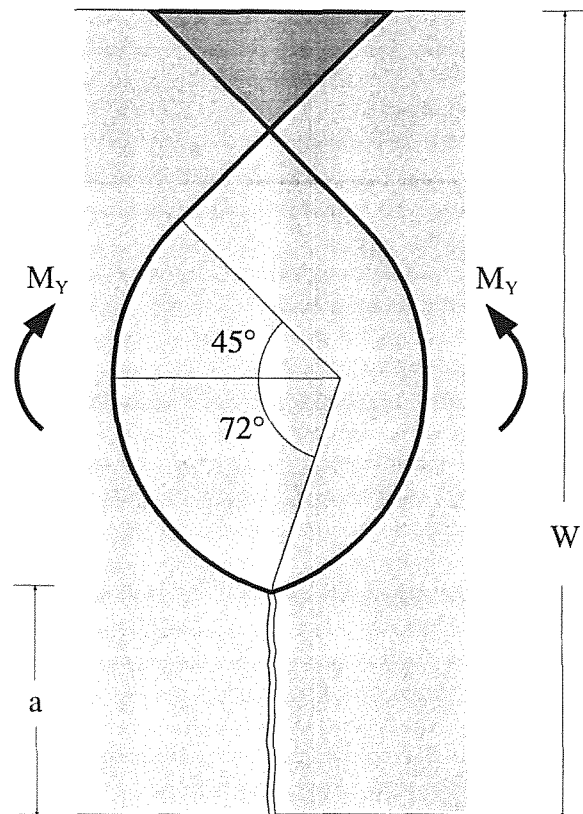


Fig. 1. Mecanismo de agotamiento plástico para una viga fisurada en flexión pura.

La figura 1 ilustra el caso de una viga de espesor B y canto W sometida a flexión pura y parcialmente seccionada por

una fisura de profundidad a . El mecanismo de agotamiento plástico [3] consiste en dos bandas circulares de deslizamiento y una cuña triangular de material plastificado que dividen la viga en dos mitades y un enclave rígidos. Las dos mitades giran con sentidos opuestos, cada una en torno al centro del arco circular que la limita. El momento flector de agotamiento M_Y se halla con la condición de que las tensiones desarrolladas a lo largo de una banda de deslizamiento y de un cateto de la cuña triangular equivalgan al momento M_Y . Se obtiene así:

$$M_Y = 0,364W^2B\sigma_Y(1-\frac{a}{W})^2 \quad (3)$$

Por su parte, teniendo en cuenta el factor de intensidad de tensiones de la viga (veáse, por ejemplo la referencia 4), el momento flector de rotura frágil M_R es:

$$M_R = \frac{K_C BW^{1.5} \cos \frac{\pi a}{2W}}{[2,486 + 1,689(1 - \sin \frac{\pi a}{2W})^4] \sqrt{\text{tg} \frac{\pi a}{2W}}} \quad (4)$$

En la figura 2 se comparan los límites de tolerancia al daño de la viga de la figura 1. La representación gráfica de los momentos flectores dados por las ecuaciones (3) y (4) en función del tamaño de fisura pone de manifiesto el papel desempeñado por el factor adimensional $K_C / (\sigma_Y \sqrt{W})$ en la tolerancia al daño. El hecho de que este factor no sólo dependa de las propiedades del material K_C y σ_Y , sino también de la dimensión W del elemento estructural implica que la tolerancia al daño está afectada por un efecto del tamaño.

La figura 2 indica que la tolerancia al daño al daño de la viga frente a defectos tipo fisura coincide con el límite determinado por la rotura frágil para tamaños grandes, tenacidades bajas, y límite elástico ideal σ_Y alto (valores bajos de $K_C / (\sigma_Y \sqrt{W})$), ya que en ese caso dicho límite está por debajo del de agotamiento plástico. Si el tamaño es pequeño, la tenacidad es alta, y el límite elástico ideal σ_Y es bajo (valores altos de $K_C / (\sigma_Y \sqrt{W})$), la carga de agotamiento plástico representa una cota superior de la tolerancia al daño, toda vez que el desgarramiento dúctil o la propagación frágil en régimen plástico pueden preceder al agotamiento plástico. Para valores intermedios de $K_C / (\sigma_Y \sqrt{W})$ se da uno u otro caso en función del tamaño de defecto.

Cuanto mayor sea la resistencia a la formación y crecimiento de defectos, menor es el riesgo de daño, y por tanto dicha resistencia debe tenerse en cuenta para fijar los requisitos de tolerancia al daño, aunque no influye directamente en ella. La resistencia a la formación y crecimiento de defectos depende del material, pero no exclusivamente; influyen factores ajenos al material como la agresividad del ambiente o la periodicidad de las acciones a que se encuentra sometido el elemento estructural. Altas tensiones de tracción, actuando en combinación con un

ambiente agresivo, originan el fenómeno conocido como corrosión bajo tensión, consistente en la formación y crecimiento de fisuras netamente definidas. Se trata pues de un fenómeno de daño creciente por fisuración, cuyo efecto sobre la seguridad estructural depende de la tolerancia al daño. El fenómeno de fatiga es similar y también su efecto sobre la seguridad depende de la tolerancia al daño. La única diferencia con la corrosión bajo tensión se halla en la causa del proceso de fisuración, que en el caso de la fatiga es la actuación de cargas de variación periódica. Las medidas que se adopten para actuar sobre los factores externos que propician la formación y crecimiento de defectos deben tenerse en cuenta en los requisitos de tolerancia al daño.

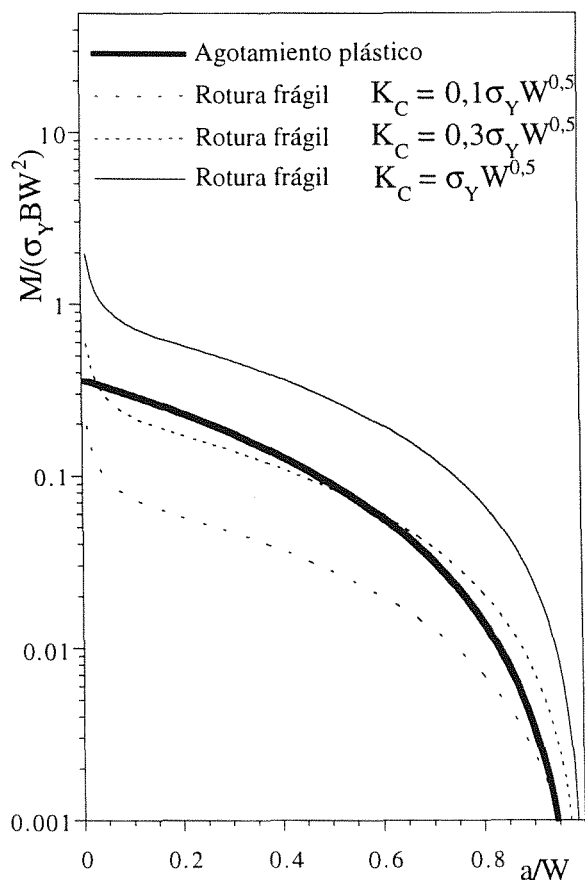


Fig. 2. Límite de tolerancia al daño para una viga fisurada en flexión pura.

3. TIPOLOGIA DE ARMADURAS ACTIVAS

Las armaduras activas se emplean para pretensar o postesar estructuras fundamentalmente de hormigón, pero también metálicas. Se fabrican con acero de alta resistencia en forma de barras, alambres y cables. La resistencia a tracción oscila entre 1 y 2 GPa. Los alambres son de acero eutéctico de estirado en frío que se obtienen calentando el acero por encima de la temperatura de austenitización y enfriándolo de modo que la microestructura resultante sea apta para el estirado en frío. Este se efectúa mediante trefilado en hilera

con reducciones de sección que pueden llegar a ser casi de un orden de magnitud. El alambre así obtenido se somete a un tratamiento final térmico o termomecánico de relajación de tensiones y queda listo para su uso como armadura activa o para su incorporación a un cable. Los diámetros de alambre más usuales están comprendidos entre 3 y 9 mm.

Las barras cubren la gama de diámetros siguiente a la de los alambres, hasta 40 mm. Se fabrican por laminación en caliente con aceros aleados de medio y alto contenido en carbono. Las propiedades finales se consiguen con tratamientos de temple y revenido o por estirado en frío, con posterior tratamiento de relajación de tensiones.

El daño inicial en una armadura activa se origina por causas mecánicas o electroquímicas en la superficie de la armadura. Los golpes o impactos debidos a manipulación incorrecta de las armaduras durante el transporte o la puesta en obra, las lesiones que produce el sistema de tensado, (indentaciones en los anclajes con cuñas dentadas o el trefilado in situ en el pretensado de armaduras anulares) son formas de daño mecánico muy comunes. También cabe considerar como daño mecánico las cargas transversales que actúan sobre las armaduras cuando se tesan estando la superficie lateral en contacto con algún elemento rígido. El daño propiciado electroquímicamente tiene como origen las corrosiones localizadas que se conocen como picaduras y que pueden producirse por causas tan diversas como aireación diferencial, corrientes eléctricas incontroladas, fallos locales de las barreras anticorrosivas, e incluso ataques de bacterias [5].

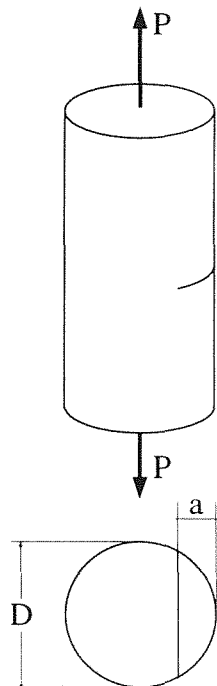


Fig. 4. Daño por fisuración en una armadura.

La progresión del daño puede deberse a las cargas que la

armadura ha de soportar si se trata de cargas variables (fisuración por fatiga) o a la acción combinada de las cargas, variables o no, y del ambiente (fisuración por corrosión bajo tensión o por corrosión-fatiga). Las fisuras se desarrollan a partir de daños iniciales o zonas débiles de la superficie y crecen hacia el interior cortando la sección transversal de la armadura. El frente de fisura es curvo al principio, pero a medida que la fisura crece en profundidad pierde curvatura y tiende a enderezarse. En consecuencia, la fisura de la figura 4 es la envolvente del daño que una armadura puede experimentar por fisuración.

Los ambientes agresivos que favorecen los procesos de daño se deben muchas veces a descuidos en la ejecución de la obra, especialmente de los detalles constructivos. Un mal sistema de desagüe puede dar lugar a que las sales empleadas para evitar la formación de hielo se acumulen en las proximidades de las armaduras. Un sellado que se fisura por estar ejecutado con materiales incompatibles puede convertir la zona que se pretendía aislar en una zona de acumulación de humedad [6].

4. TOLERANCIA AL DAÑO EN ARMADURAS ACTIVAS FISURADAS

La carga de agotamiento plástico de la armadura de la figura 4 ha sido determinada para el mecanismo de agotamiento de la figura 5 [7], con el siguiente resultado:

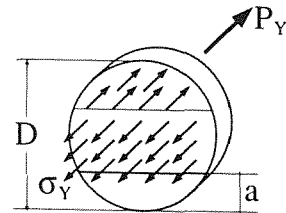


Fig. 5. Agotamiento plástico de una armadura fisurada.

$$P_Y = D^2 \sigma_Y f_Y \left(\frac{a}{D} \right) \quad (5)$$

donde:

$$f_Y(x) = \sqrt{x-x^2} \left[\frac{1}{2}(1-2x) + 2^{-1/3} \sqrt{1-2^{4/3}(x-x^2)} \right] + \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4} \arccos(1-2x) - \frac{1}{2} \arcsen[2^{2/3}(x-x^2)]$$

La carga de rotura frágil puede deducirse con el factor de intensidad de tensiones dado en [8]:

$$P_R = \frac{D^{1.5} K_C}{f_C \left(\frac{a}{D} \right)} \quad (6)$$

donde:

$$f_C(x) = 1,081x^{1/2} + 0,639x^{3/2} - 2,445x^{5/2} + 13,463x^{7/2}$$

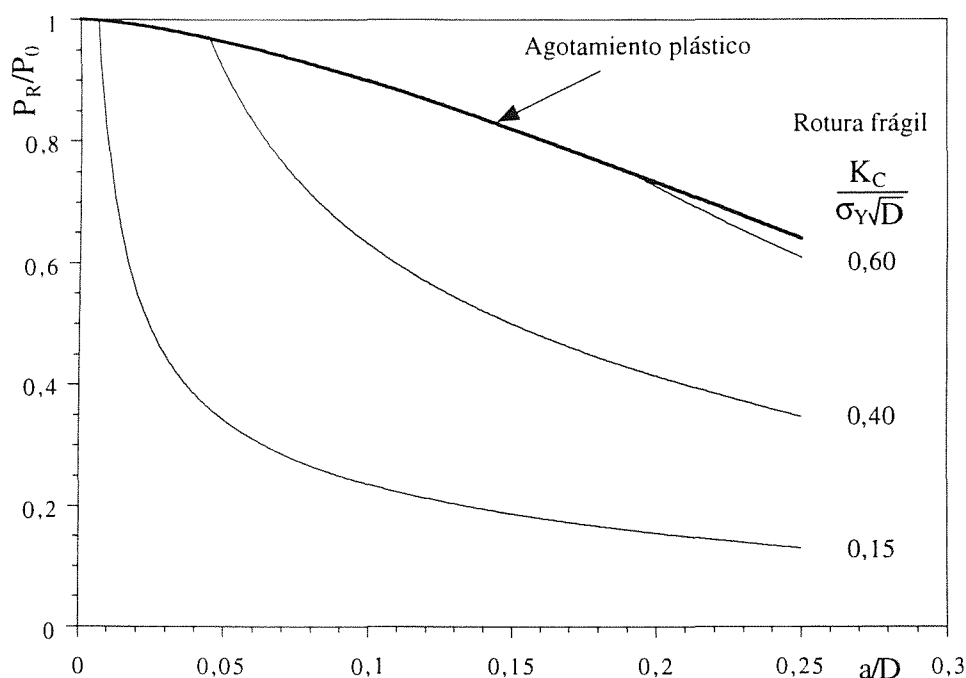


Fig. 6. Tolerancia al daño de una armadura fisurada (rotura frágil y agotamiento plástico).

En la figura 6 se han representado las cargas dadas por las ecuaciones (5) y (6) en función del tamaño relativo de fisura a/D , con el factor $K_C/(\sigma_Y \sqrt{D})$ como parámetro y con la carga de agotamiento plástico en ausencia de fisura:

$$P_0 = \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_Y \tag{7}$$

como unidad. Las ideas generales acerca de los límites de tolerancia al daño expresadas en el apartado 2 se concretan en la figura 6 para una armadura activa fisurada: con baja tenacidad de fractura, grandes diámetros y alto límite elástico, la rotura frágil determina la tolerancia al daño; en otro caso, el agotamiento plástico es la cota máxima de tolerancia que cabe esperar del material.

La tabla 1 indica el diámetro D , la tenacidad de fractura K_C , el límite elástico al 0,2% $R_{p0.2}$ y la resistencia a tracción R_m de tres armaduras, cada una de ellas perteneciente a uno de los tipos descritos en el apartado 3. La armadura 1 es alambre eutectoide trefilado. La tenacidad de fractura de este acero no se conoce, ya que el material la adquiere tras haber experimentado todas aquellas fases del proceso de fabricación, en particular el trefilado, que determinan sus características definitivas, con el cual adquiere la conformación geométrica final. En este tipo de armadura la configuración geométrica y las propiedades mecánicas están unidas inseparablemente, lo cual representa una seria limitación para medir la tenacidad ya que las probetas normalizadas requieren un espesor mínimo muy superior al de los alambres trefilados. La cifra que figura en la tabla es una cota inferior [8].

La armadura 2 es de acero al Cr-Si con un contenido medio de carbono (0,47 %), laminada en caliente, templada y revenida. Este procedimiento de fabricación permite obtener diámetros mucho mayores que el trefilado y el valor de la tenacidad se ha obtenido con probetas normalizadas extraídas de armaduras idénticas pero de mayor diámetro [8]. La armadura 3 es de acero al Mn con alto contenido en carbono (0,65 %) laminada en caliente. La tenacidad se ha medido con dos tipos distintos de probetas normalizadas [9].

Tabla 1. Características de armaduras activas.

	Armadura 1	Armadura 2	Armadura 3
D (mm)	7	9	36
$R_{p0.2}$ (MPa)	1590	1350	1140
R_m (MPa)	1790	1470	1290
K_C (MPa $m^{1/2}$)	>110	102	35
$K_C/(\sigma_Y \sqrt{D})$	>0,734	0,731	0,143

El valor del límite elástico ideal σ_Y adoptado en la tabla 1 para calcular el factor adimensional $K_C/(\sigma_Y \sqrt{D})$ ha sido la resistencia a tracción R_m . Comparando los valores de este factor en la tabla y en la figura 6 se concluye que la rotura frágil sólo es determinante de la tolerancia al daño para la armadura 3, pero no para las armaduras 1 y 2. En el caso de estas últimas, la curva de agotamiento plástico representa la máxima tolerancia al daño que cabe esperar para fisuras de borde recto.

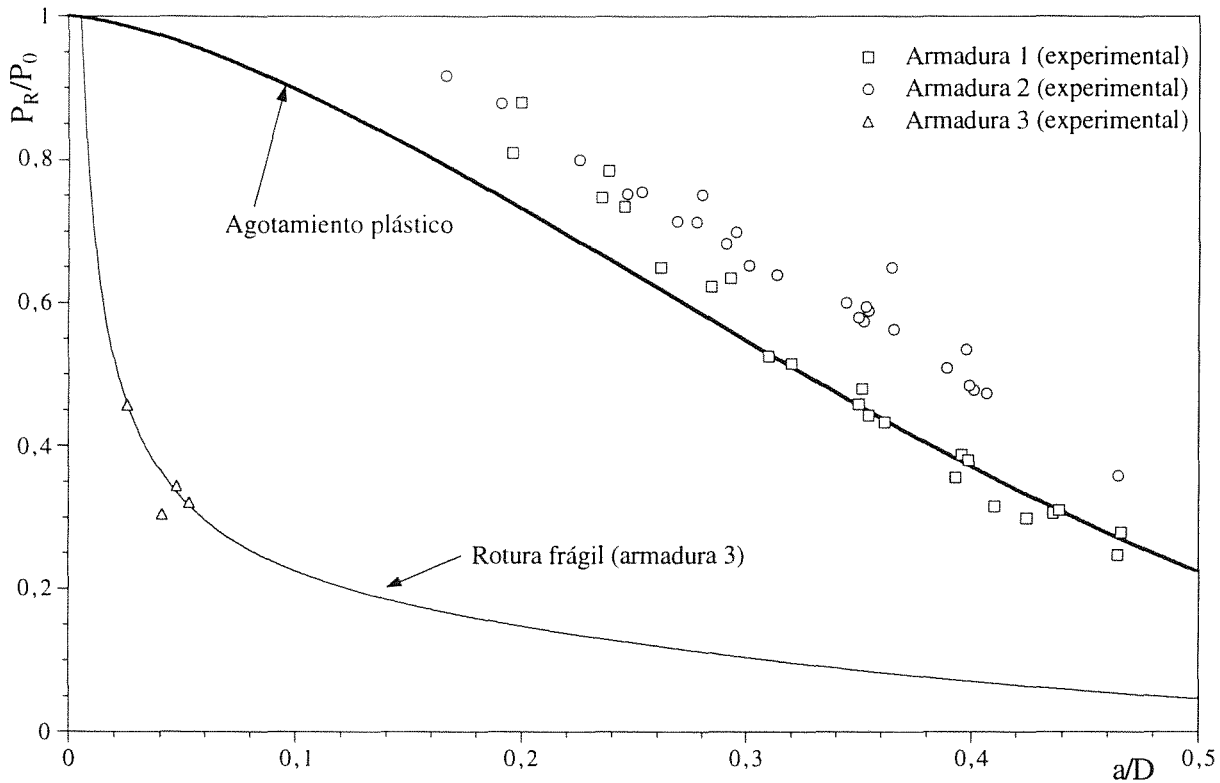


Fig. 7. Tolerancia al daño teórica y experimental de armaduras fisuradas.

Estas previsiones pueden verificarse comparándolas con los resultados disponibles de roturas en servicio y ensayos de rotura llevados a cabo con armaduras fisuradas de los tres tipos de la tabla 1 [8,9]. La comparación puede observarse en la figura 7, donde se ha representado la carga de rotura experimental frente a la profundidad de fisura, la primera referida a la carga dada por la ecuación (7) (carga de agotamiento plástico en ausencia de fisura) y la segundo al diámetro de la armadura. Junto a estos datos experimentales se han representado también la curva de agotamiento plástico de la figura 6 y las curvas de rotura frágil correspondientes a las armaduras 2 y 3 (la de la armadura 1 estaría por encima de la de la armadura 2).

La figura 7 confirma que la tolerancia al daño de la armadura 3 está determinada por la rotura frágil, dando lugar con ello a que fisuras de menos de 1 mm de profundidad en una barra de 36 mm de diámetro reduzcan la capacidad resistente de la barra en más del 50 %. En cambio, las armaduras 1 y 2 llegan a soportar cargas superiores a la de agotamiento plástico, a pesar de haber sido ésta calculada con la resistencia a tracción del material. Esta aparente contradicción se debe a que la carga de agotamiento plástico representada en la figura 7 corresponde a fisuras de frente recto y las generadas por fatiga para la realización de los ensayos de las armaduras 2 y 3 eran lúnulas semielípticas con excentricidades un orden de magnitud superior a la que permitiría atribuirles frente recto. A igualdad de profundidad, el área de una fisura con frente recto es mayor que la de una fisura elíptica, y conse-

cientemente la carga de agotamiento plástico es menor. Por tanto, para las armaduras 1 y 2 fisuradas y ensayadas a rotura, la curva de la figura 7 sólo aporta una cota inferior de la carga de agotamiento plástico. Así pues, la conclusión de que la tolerancia al daño de estas armaduras está determinada por el agotamiento plástico es poco aventurada y su estimación cuantitativa considerando fisura de borde recto sería incluso conservadora.

El efecto del tamaño sobre la tolerancia al daño se hace patente con los datos de la tabla 1 y de la figura 7. La armadura 2 se fabrica también en diámetros comparables a los de la armadura 3 (lo que ha permitido medir su tenacidad de fractura), y para tales diámetros el valor del factor $K_C/(\sigma_Y \sqrt{D})$ es del orden de 0,4. De acuerdo con la figura 6, el mecanismo de fallo determinante de tolerancia al daño sería la rotura frágil en lugar del agotamiento plástico, lo que supone una fuerte disminución de dicha tolerancia si se evalúa en términos de la carga máxima soportada por la armadura. No obstante, el paso de un mecanismo de fallo a otro tendría lugar para tamaños de fisura apreciables y por tanto de más fácil control.

5. TOLERANCIA AL DAÑO EN ARMADURAS ACTIVAS ENTALLADAS

Las entallas representan un tipo de daño menos severo que las fisuras porque, a diferencia de éstas, la pérdida de sección resistente que conllevan se produce de manera gradual a través de la transición definida por el perfil de

la entalla: la transición es tanto más suave cuanto menor sea la curvatura del perfil de la entalla y la entalla producirá los mismos efectos a medida que el radio de curvatura del perfil se haga más pequeño.

Un tipo de entalla muy apropiado para evaluar la tolerancia al daño de las armaduras activas es la entalla axilsimétrica de la figura 8, aún cuando es poco representativa de los daños de este tipo que pueden darse en la práctica. La carga de agotamiento plástico de un sólido como el de la figura 8 se deduce a partir de los campos de tensiones propuestos para el cuello de estricción de una probeta cilíndrica [10, 11, 12] y de la predicción teórica de la evolución del perfil de entalla con la deformación plástica [13].

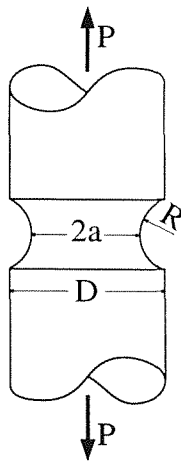


Figura 8. Probeta entallada para evaluar la tolerancia al daño en armaduras activas

La carga de agotamiento P_Y resultante es válida para un sólido plástico con endurecimiento y viene dada en función de la resistencia a tracción del material R_m según la expresión:

$$P_Y = \pi a^2 R_m f\left(\frac{a}{R}\right) \quad (8)$$

donde las dimensiones a , R y D tienen el significado indicado en la figura 8 y la función $f(\bullet)$ depende de la distribución de tensiones empleada, aunque en todos los casos tiende a la unidad para valores grandes del cociente R/a , es decir, para entallas poco agudas. La distribución de tensiones del cuello de estricción no es aplicable a perfiles de entalla agudos, y para valores pequeños del cociente a/R , la ecuación (8) ha de ser sustituida por la carga de agotamiento plástico debida a una fisura ($R = 0$) [2]:

$$P_Y = 2,85\pi a^2 R_m \quad (9)$$

La carga de rotura frágil de un sólido entallado no puede predecirse a partir de una propiedad mecánica como la tenacidad de fractura, y en consecuencia no es posible emplear esta carga en la evaluación de la tolerancia al daño de sólidos entallados. La referencia disponible para llevar a cabo dicha evaluación mediante el tipo de probeta de la figura 8, es la carga de agotamiento plástico dada por las ecuaciones (8) y (9). En la figura 9 se ha representado dicha carga para los valores extremos de la función $f(\bullet)$, 2,85 y 1, en función de la pérdida porcentual de sección de la armadura debida a la entalla. La unidad de carga empleada P_0 es la capacidad resistente de la armadura sin entalla:

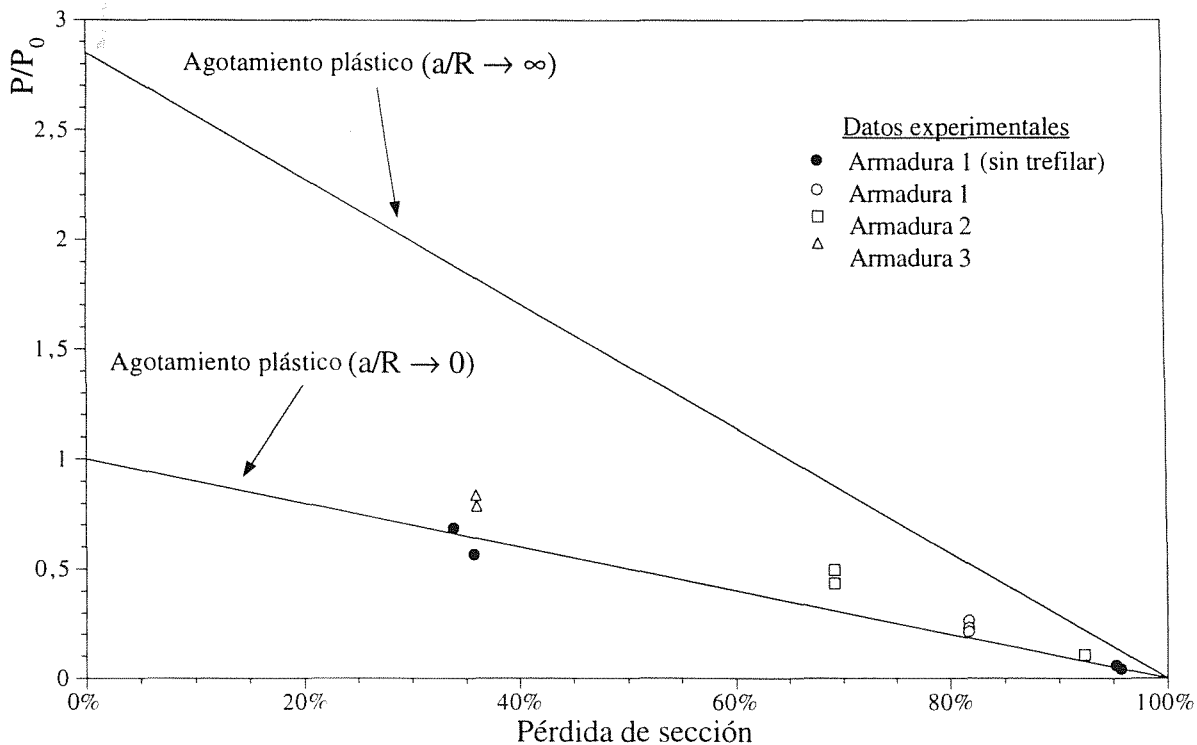


Fig. 9. Tolerancia al daño de armaduras entalladas.

$$P_0 = \frac{\pi}{4} D^2 R_m \quad (10)$$

También se han representado en la figura 9 datos experimentales de las armaduras de la tabla 1 obtenidos ensayando probetas con entallas del tipo de la figura 8 para diferentes valores del cociente a/R (en el caso de la armadura 3 el diámetro se redujo a 6,25 mm). Se han incluido junto a estos datos los de una armadura de acero eutectoide trefilado ensayada en una fase intermedia del proceso de fabricación, después de la laminación en caliente y antes del estirado en frío [14].

Los resultados de la figura 9 ponen de relieve que la tolerancia al daño por entalla en las tres armaduras estudiadas es suficiente para no franquear la barrera del agotamiento plástico, lo cual no sucede con la armadura sin trefilar. Sin embargo, en esta figura no está tenido en cuenta el efecto del radio del perfil de entalla sobre el agotamiento plástico, y por ello en la figura 10 se han representado las mismas cargas que en la figura 9 frente al cociente R/a , empleando en la ecuación (8) la función $f(\bullet)$ de Bridgman:

$$P_Y = \pi a^2 R_m \left(1 + 2 \frac{a}{R}\right) \ln\left(1 + \frac{R}{2a}\right) \quad (11)$$

y adoptando como unidad de carga la capacidad resistente que tendría la armadura si su diámetro fuese el de la sección mínima y estuviese libre de entallas.

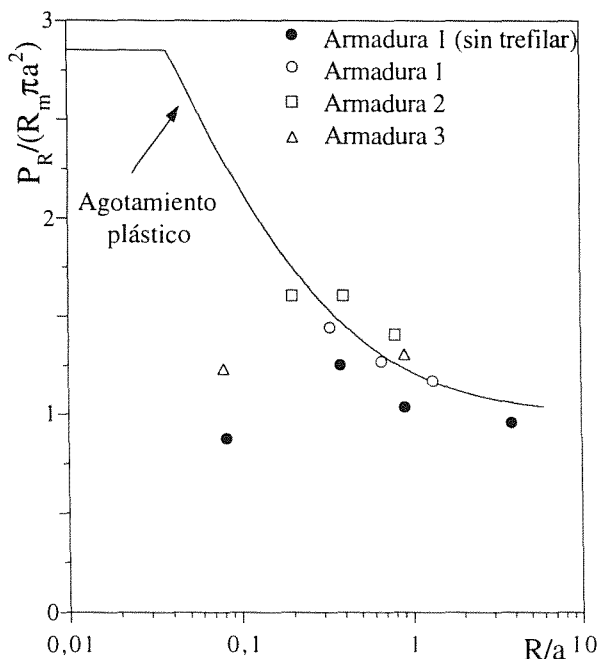


Fig. 10. Tolerancia al daño de armaduras entalladas.

La figura 10 ilustra más acerca de la tolerancia al daño que la figura 9. La de la armadura sin trefilar es siempre inferior a la que determina la carga de agotamiento plástico y la diferencia se acentúa cuando la entalla se transforma en fisura al disminuir el cociente R/a . Las de las

armaduras 1 y 2 están determinadas por la condición de agotamiento plástico, pero la de la armadura 3 se aparta marcadamente de esta tendencia para entallas agudas. Esta diferencia entre la armadura 3 y las armaduras 1 y 2 es consistente con la observada en la figura 7. Por otra parte, la comparación de las dos armaduras de acero eutectoide, una trefilada y otra sin trefilar, pone de manifiesto el efecto favorable del trefilado sobre la tolerancia al daño, en cuanto que reduce la fragilidad del acero.

6. TOLERANCIA AL DAÑO EN ARMADURAS ACTIVAS CON CARGA LATERAL

Las fuerzas ejercidas sobre la superficie lateral de las armaduras activas constituyen una fuente inevitable, aunque indeseada, de daño. Los cambios de dirección de las armaduras en las proximidades de los anclajes y en las vainas se producen a expensas de empujes laterales que en ocasiones pueden ser muy importantes. Los propios sistemas de sujeción (cuñas y roscas) producen fuertes cargas laterales sobre las armaduras.

Las fuerzas transversales reducen la capacidad resistente de las armaduras en dirección longitudinal por el estado triaxial de tensiones que originan ambos tipos de fuerza actuando conjuntamente. La triaxialidad del estado tensional favorece la rotura frágil y modifica el mecanismo de agotamiento plástico de las armaduras que se produce en estado uniaxial. La evaluación de la tolerancia al daño por carga lateral en armaduras activas es compleja por la diversidad de formas que puede revestir la carga lateral y, como en el caso de las entallas, por la ausencia de un criterio de rotura frágil que permita determinar la correspondiente carga de rotura. No obstante, la referencia [15] proporciona datos experimentales de rotura de armaduras activas bajo carga lateral y un mecanismo de agotamiento plástico desarrollado para el sistema de carga lateral empleado en la experimentación.

El equipo experimental estaba compuesto por dos máquinas de ensayos mecánicos, una convencional para aplicar la carga de tracción longitudinal sobre la armadura, y otra de tamaño reducido para aplicar simultáneamente la carga de compresión lateral. El peso de esta segunda máquina se compensaba mediante una polea y un contrapeso para que se mantuviese solidariamente unida a la armadura ensayada por efecto de la compresión transversal. El actuador era un microcilindro oleohidráulico presurizado estáticamente a presión constante para mantener la misma carga lateral durante todo el ensayo. Dicha carga se aplicaba en dos generatrices opuestas de la armadura, apoyando una de ellas sobre una superficie plana y la otra sobre una armadura idéntica cruzada perpendicularmente.

La figura 11 muestra el mecanismo de agotamiento plástico propuesto, consistente en una banda de deslizamiento que forma 45° con la dirección longitudinal de la ar-

madura y emerge de ésta junto al punto de aplicación de la carga lateral. La carga de agotamiento plástico P_Y es función de la carga lateral Q conforme a la relación:

$$P_Y = P_0 - \frac{1}{2}Q \quad (12)$$

donde P_0 es la capacidad resistente de la armadura sin daño ni carga lateral, dada por la ecuación (9).

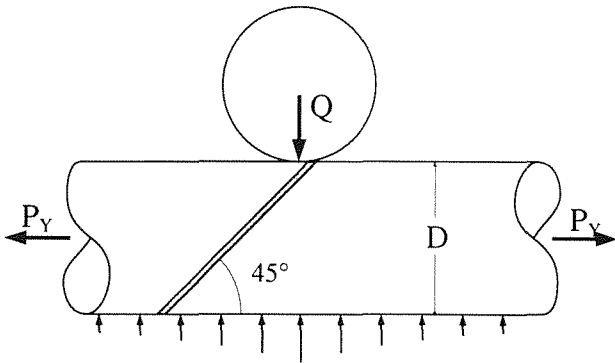


Fig. 11. Agotamiento plástico de una armadura con carga lateral.

Los resultados experimentales de fallo de armaduras activas bajo carga lateral de la referencia [15] corresponden a dos armaduras de acero eutectoide trefilado cuyas características más significativas (diámetro D , límite elástico al 0,2%, $R_{p0.2}$, y resistencia a tracción, R_m) se indican en la tabla 2. Las cargas de rotura registradas en los ensayos se han representado gráficamente en la figura 12 frente a la carga lateral aplicada. También se ha representado la ecuación (11), empleando en ambos ejes la capacidad resistente de la armadura sin daño, P_0 , como unidad de carga.

Tabla 2. Características de armaduras activas.

	Armadura 4	Armadura 5
D (mm)	3,5	5
$R_{p0.2}$ (MPa)	1550	1610
R_m (MPa)	1640	1810

Los resultados de la figura 12 indican que la tolerancia al daño de las dos armaduras está determinada por la carga de agotamiento plástico.

7. CONCLUSIONES

Los distintos tipos de daño examinados (fisuración, entallas y carga lateral) en relación con la tolerancia al daño de las armaduras activas indican que dicha tolerancia es óptima en general, ya que las armaduras afectadas por daños fallan por agotamiento plástico y la tolerancia está determinada por la carga que produce este mecanismo de fallo. La situación cambia cuando las armaduras están fi-

suradas o presentan daños equivalentes a fisuras. La tenacidad de fractura y el diámetro son en este caso las características determinantes de que la tolerancia sea óptima en el sentido anteriormente indicado o esté muy alejada de dicho óptimo. La combinación más desfavorable es la de gran diámetro y baja tenacidad, combinación que según los datos disponibles se produce en las barras hipoeutectoides conformadas en frío. En los alambres eutectoides estirados en frío no se da esa combinación, ya que el proceso de trefilado no sólo conduce necesariamente a bajos diámetros, sino que mejora la tenacidad. Finalmente, en las armaduras hipoeutectoides templadas y revenidas de gran diámetro se da una combinación intermedia de tenacidad y diámetro que origina una tolerancia al daño cercana a la óptima para niveles de daño moderados.

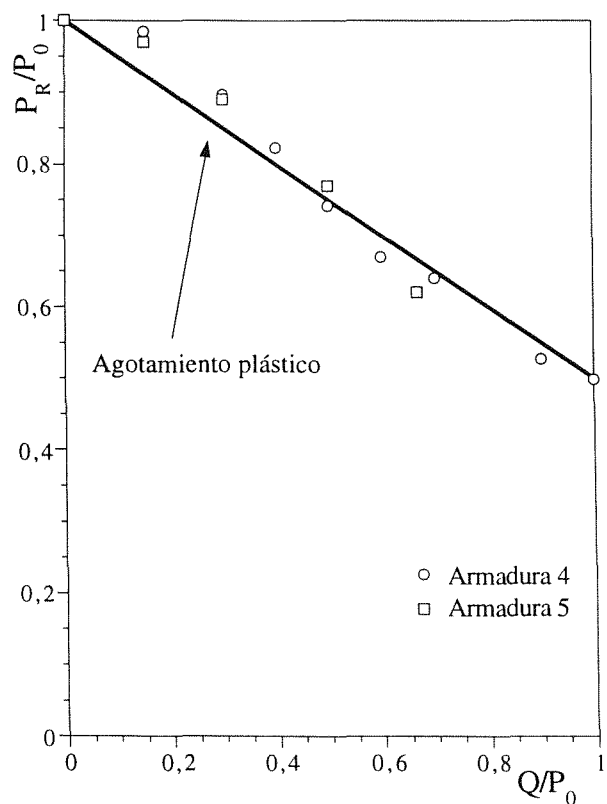


Fig. 12. Tolerancia al daño de armaduras con carga lateral.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la financiación recibida de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) a través del proyecto MAT99-0921, y la ayuda prestada por el profesor D. Francisco Javier Gómez Sánchez en la obtención de datos experimentales.

10. REFERENCIAS

[1] Comité Europeo de Normalización (CEN), 'European Prestandard ENV 1993-1-1/A1: Eurocode 3: Design of Steel Structures', Comité Europeo de

Normalización, Bruselas (1994).

- [2] Miller, A. G. "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects", *Int. J. Pres. Ves. & Piping* **32**, 197-327 (1988).
- [3] Green, A. P. y Hundy, B. B. "Initial Plastic Yielding in Notch Bend Bars", *J. Mech. Phys. Solids*, **4**, 128-144 (1956).
- [4] Tada, H., Paris, P e Irwin, G. "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corporation, St. Louis, Missouri, USA (1985).
- [5] Elices, M. "Problemas de corrosión bajo tensión en el hormigón pretensado", *Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección*, **14**, 21-33 (1983).
- [6] Elices, M. "Patología y terapéutica de las armaduras activas en el hormigón pretensado", *Informes de la Construcción*, **396**, 1-18 (1988).
- [7] Valiente, A. "Criterios de fractura para alambres". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (1980).
- [8] Valiente, A., Elices, M. y Astiz, M.A., "Tenacidad de fractura del acero de pretensar", *Hormigón y Acero*, **168**, 151-158 (1988).
- [9] Valiente, A. y Elices, M. "Premature Failure of Prestressed Steel Bars" *Engineering. Failure Analysis*, **5**, 219-227 (1998).
- [10] Bridgman, P.W., "Studies in large plastic flow and fracture". Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts, USA) (1964).
- [11] Davidenkov, N. N. y Spiridonova, N. I. "Analysis of Tensile Stress in the Neck of an Elongated Test Specimen", *Proc. A. S. T. M.* **46**, 1147-1158 (1946).
- [12] Eisenberg, M. A. y Yen, C. F. "An Anisotropic Generalization of the Bridgman Analysis of Tensile Necking", *J. Eng. Mat. Tech.* **105**, 264-267 (1983).
- [13] Valiente, A. "Inestabilidad plástica y resistencia a tracción de barras cilíndricas entalladas". *Anales de Mecánica de la Fractura*, **8**, 70-76 (1991).
- [14] Toribio, J. y Elices, M. "Un criterio de fractura para alambres entallados" *Anales de Mecánica de la Fractura*, **4**, 119-134 (1987).
- [15] Valiente, A. y Elices, M. "Sensibilidad del acero de pretensar a los esfuerzos transversales", *Hormigón y Acero* **168**, 145-150 (1988).