

## CONTROL DE LAS TENSIONES RESIDUALES COMO HERRAMIENTA DE MEJORA DE LOS ALAMBRES DE PRETENSADO: 2. OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervías, M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,  
28040 Madrid, España.  
E-mail: jmatienza@mater.upm.es

### RESUMEN

En este artículo se resume el trabajo desarrollado por los autores durante estos últimos años para mejorar el comportamiento de las armaduras activas del hormigón pretensado mediante el control de sus tensiones residuales. En esta segunda parte se analiza la influencia que tienen las tensiones residuales en las tres propiedades mecánicas básicas para las armaduras activas (ensayo de tracción, ensayo de relajación y ensayo de corrosión bajo tensión) y cómo modificando las mismas se pueden mejorar sus prestaciones. Adicionalmente, se propone un tratamiento que genera tensiones residuales de compresión en la superficie de los alambres, mejorando su comportamiento a corrosión bajo tensión, lo cual podría ser muy útil dados los problemas de durabilidad que están afectando a las estructuras pretensadas construidas en la proximidad de ambientes agresivos (por ejemplo, agua marina).

### ABSTRACT

This paper summarizes the work done by the authors during the last years in attempting to obtain accurate measurements and simulations of the residual stresses developed in prestressed concrete wires. In this second part, the influence of residual stresses on the mechanical properties have been studied considering the three tests required by standards: tensile, stress relaxation and stress corrosion tests. Research shows that environmentally assisted cracking can be improved significantly by changing the surface residual stresses produced by wire drawing. In addition, in this study a post-drawing treatment to generate compressive residual stresses at the surface of the wires is proposed. Knowledge of residual stress profiles can be used to improve the performance of the wires by optimizing the processing.

**PALABRAS CLAVE:** Armaduras Activas, Hormigón Pretensado, Corrosión bajo tensión, Tensiones Residuales.

### 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón pretensado se descubrió en el siglo pasado y hoy en día ya empezamos a tener experiencia de estructuras pretensadas (fundamentalmente puentes) construidas hace aproximadamente medio siglo. En principio, se creyó que estas estructuras iban a ser suficientemente duraderas y con unos costes de mantenimiento despreciables. No obstante, a lo largo de los años han aparecido bastantes casos de deterioro producido por el ataque con cloruros, especialmente en la proximidad de ambientes marinos. La mayoría de estos deterioros se han producido por la corrosión y corrosión bajo tensión de las armaduras activas y pasivas de las estructuras.

Las tensiones residuales, generadas en su proceso de fabricación, influyen de forma significativa en el comportamiento mecánico de los alambres de pretensado [1], pudiendo favorecer, por ejemplo, la corrosión bajo tensión de las armaduras [1-4]. Los fabricantes conocen estos efectos dañinos y tratan de paliarlos mediante tratamientos posteriores al trefilado. El inconveniente es que la caracterización de estas tensiones sigue siendo un problema muy complicado.

En este artículo se resume el trabajo desarrollado por los autores durante estos últimos años para mejorar el comportamiento de las armaduras activas del hormigón pretensado mediante el control de sus tensiones residuales. En la primera parte [5] se han discutido las técnicas de caracterización de las tensiones residuales, mostrando que hoy en día se dispone de técnicas poderosas para afrontar este problema, tanto desde el punto de vista numérico como experimental.

En esta segunda parte se analiza la influencia que tienen las tensiones residuales en los tres ensayos mecánicos requeridos por las normas para las armaduras activas (ensayo de tracción, ensayo de relajación y ensayo de corrosión bajo tensión) y cómo modificando las mismas se pueden mejorar sus prestaciones. Para ello se han clasificado los alambres en tres grupos, en función del signo de las tensiones residuales en su superficie (tracciones, compresiones o nulas) y se ha comparado el comportamiento de los distintos grupos en los tres ensayos.

Se muestra que el control de las tensiones residuales es una herramienta fundamental para la optimización de los tratamientos y la mejora de las propiedades mecánicas de los alambres de pretensado.

## 2. EL PERFIL DE TENSIONES RESIDUALES DE LOS ALAMBRES DE PRETENSADO

A lo largo de este trabajo se ha estudiado el comportamiento de un gran número de alambres con distintos perfiles de tensiones residuales [5-11]. Atendiendo a las tensiones en su superficie (parámetro fundamental, ya que es el que se puede medir con los difractómetros de rayos X [5] disponibles hoy en muchos laboratorios y, como veremos, tiene una influencia decisiva en el comportamiento a corrosión), se pueden dividir en tres grandes grupos, según tengan en su superficie tensiones residuales de tracción, de compresión o nulas:

a) Alambres con tensiones de tracción en la superficie: Trefilados (*As Drawn*)

El proceso de fabricación por trefilado [10] de las armaduras activas genera en el alambre una gran deformación plástica que no es completamente homogénea en toda la sección, lo que origina la aparición de un perfil de tensiones residuales en el producto final, con compresiones en el centro y tracciones en la superficie, tanto en dirección axial como tangencial (Figura 1) [10].

b) Alambres sin tensiones residuales: Estabilizados (*Stabilized*)

El procedimiento industrial para eliminar las tensiones residuales consiste en someter al alambre trefilado a un tratamiento termomecánico de alivio de tensiones, propio de la industria del pretensado y conocido con el nombre de estabilizado. El estabilizado consiste en dar un tratamiento térmico al alambre durante un tiempo muy corto (del orden de segundos) manteniendo aplicada, simultáneamente, una carga de tracción importante. No obstante, los parámetros concretos del tratamiento siguen dependiendo de cada empresa. El estabilizado es un tratamiento muy eficaz para eliminar las tensiones residuales (Figura 1) y mejora de forma importante el comportamiento de los alambres en relajación. Hoy en día, ha sustituido al resto de tratamientos térmicos de alivio de tensiones y los alambres “estabilizados”, también llamados “de baja relajación”, son prácticamente los únicos alambres utilizados para las armaduras activas del hormigón pretensado [10].

c) Alambres con tensiones de compresión en la superficie: Laminados (*Rolled or Laminated*)

Para obtener compresiones en la superficie se utilizan tratamientos mecánicos superficiales (laminados, paso a través de matrices especiales,...) con efectos similares a los producidos por el tratamiento de “shot peening” en la industria aeronáutica; algo parecido a un masaje que genera una pequeña plastificación superficial y cambia completamente el perfil de tensiones residuales [10], generando tracciones en el centro del alambre e importantes compresiones en su superficie (Figura 1).

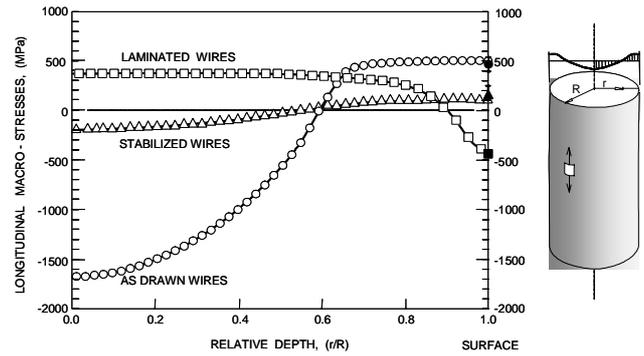


Figura 1. Forma típica de los perfiles de tensiones residuales en un diámetro del alambre inmediatamente después del procesado (Trefilado), tras un tratamiento de eliminación de tensiones (Estabilizado) y después de un tratamiento superficial (Laminado).

## 3. LAS TENSIONES RESIDUALES Y EL ENSAYO DE TRACCIÓN

Los autores han mostrado que la presencia de tensiones residuales puede modificar significativamente la curva tensión-deformación de un alambre de pretensado [12]. En un ensayo de tracción sobre un material sin tensiones residuales (Figura 2a), la probeta se va cargando de forma elástica y uniforme hasta alcanzar, en toda la sección a la vez, su límite de elasticidad, momento a partir del cual comenzará a plastificar y se perderá la proporcionalidad de la ley tensión-deformación.

La existencia de un perfil de tensiones residuales longitudinales con tracciones en la superficie y compresiones en el centro del alambre, provoca que, en el ensayo de tracción, el material comience a plastificar en la zona superficial a tensiones inferiores a las que cabría esperar para el material sin tensiones residuales (figura 2b). Esta plastificación parcial en la zona superficial hace disminuir el límite de proporcionalidad y el límite elástico convencional del alambre, sin afectar de forma importante a la tensión de rotura. Conviene llamar la atención sobre el hecho de que la plastificación en la superficie puede suceder aunque el nivel de tracciones siga siendo muy bajo en el centro del alambre, el cual incluso puede estar sometido todavía a compresiones.

Esto se ve claramente reflejado si comparamos las curvas tensión-deformación de un alambre trefilado sin ningún tratamiento posterior (nivel alto de tensiones residuales) y un alambre estabilizado, al que se le han eliminado la mayor parte de las tensiones residuales (Figura 3). El alambre con tensiones residuales pierde la linealidad antes. Se aprecia que la disminución de las tensiones residuales provoca un aumento del límite de proporcionalidad y el límite elástico mientras que la tensión de rotura se mantiene en los mismos niveles.

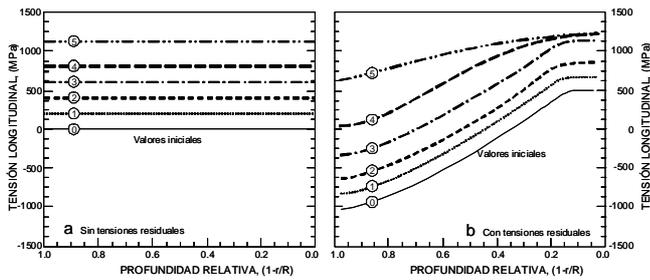


Figura 2.- Tensiones longitudinales en función de la profundidad relativa durante un ensayo de tracción: a.- Alambre sin tensiones residuales. b.- Alambre con tensiones residuales debidas al trefilado. Las tensiones en las dos figuras se corresponden con los mismos pasos de carga [12].

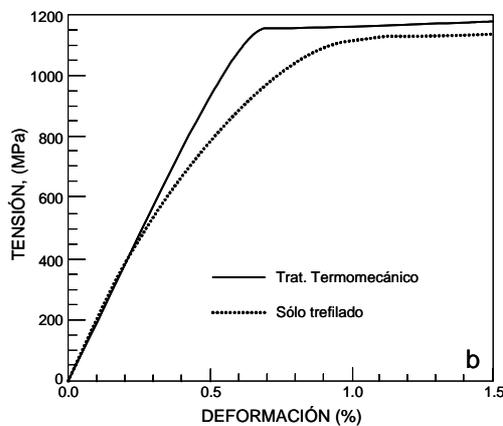


Figura 3.- Influencia de las tensiones residuales en la curva tensión-deformación de un alambre trefilado. Comparación de un ensayo de tracción de un alambre trefilado (con altas tensiones residuales) y uno estabilizado (con tratamiento termomecánico de eliminación de tensiones).

Las distintas normas internacionales (ASTM-A421-91, BS-2691, Model Code CEB-FIP, EHE-UNE 36094) [13] controlan las tensiones residuales de forma indirecta, estableciendo que los alambres de acero para pretensar deben cumplir que la relación  $\sigma_{0,2\%}/\sigma_{\max}$  entre su límite elástico al 0,2% y su tensión máxima debe estar entre 0,85-0,95. La exigencia de un límite inferior para esta relación se justificó empíricamente en que los alambres de bajo límite elástico presentan una serie de inconvenientes [12]:

- Fuertes pérdidas por relajación.
- Imprecisión en la correspondencia entre tensiones y alargamientos durante el tesado.
- Alargamientos excesivos al introducir las cargas del pretensado.

Los resultados obtenidos en este trabajo justifican la exigencia de un límite inferior para la relación  $\sigma_{0,2\%}/\sigma_{\max}$  por la necesidad de controlar el estado de tensiones residuales generado en el alambre.

En resumen, desde el punto de vista del ensayo de tracción, el mejor alambre será aquél que tenga menores tensiones residuales. La existencia de un perfil de tensiones residuales, bien sea con tracciones o con compresiones en la superficie provocará que el alambre comience a plastificar antes en algunas regiones, con la consiguiente pérdida de linealidad de la curva tensión-deformación [12].

#### 4. LAS TENSIONES RESIDUALES Y EL ENSAYO DE RELAJACIÓN

En el hormigón pretensado, las armaduras activas son las encargadas de suministrar la fuerza de pretensado al hormigón y para ello se las somete a una tensión de tracción inicial muy elevada. Sin embargo, esta tensión disminuye paulatinamente por diferentes causas, entre ellas la relajación de las armaduras. Esta pérdida de tensión se traduce en una disminución de la fuerza de pretensado y consecuentemente en una menor seguridad de la estructura. Así pues, la relajación de tensiones de las armaduras activas es muy importante en este tipo de estructuras, lo que hace que los códigos de diseño hayan propuesto unas recomendaciones para mantener estas pérdidas dentro de unos márgenes seguros.

Normalmente, las pérdidas de relajación se miden mediante unos ensayos estandarizados, cuyos resultados deben ser aportados por el fabricante para la aceptación de las armaduras. Por ejemplo, los alambres que tienen unas pérdidas inferiores al 2,5% de la tensión inicial (después de 1000 horas, cuando se someten al 70% de su resistencia a tracción) se llaman alambres de baja relajación y son los exigidos por la Norma en la actualidad [13].

Los autores han mostrado que alambres con la misma composición, microestructura y similares propiedades mecánicas, pueden tener comportamientos muy diferentes en el ensayo de relajación si sus perfiles de tensiones residuales son diferentes [14,15]. La explicación hay que buscarla en la influencia de la carga inicial. En la figura 4a se muestra las pérdidas por relajación en un alambre sin tensiones residuales (Estabilizado) al cabo de 1.000 horas, en función de la carga inicial con la que se haya solicitado al alambre. Como se puede apreciar las pérdidas son pequeñas en un rango importante de cargas iniciales, hasta que nos acercamos al límite elástico del material (85-90% de la carga de rotura), donde aumentan de forma muy importante.

Si representamos la misma figura (4.b) para alambres con tensiones residuales (Trefilado y Laminado) se puede comprobar que el comportamiento es bastante diferente. Ya no existe un quiebro significativo en torno al límite elástico del material y las pérdidas son mucho mayores que en el alambre sin tensiones residuales cuando la carga inicial es inferior al límite elástico (85% de la carga de rotura), mientras que se hacen similares a altas cargas iniciales (superiores al 90% de la carga de rotura).

La explicación se puede encontrar en la distribución de tensiones reales que hay en la sección transversal del alambre al principio del ensayo de relajación. En el caso del alambre sin tensiones residuales, la carga se distribuye uniformemente en toda la sección, por lo que el alambre estará relajando igual en todos los puntos, al estar todos cargados a la misma tensión inicial. Sin embargo, en el alambre con tensiones residuales iniciales, al cargarlo la distribución de tensiones en la sección no va a ser uniforme. El resultado es que la relajación global del alambre será la suma de las relajaciones que tenga en sus distintas zonas, que no van a estar cargadas a la misma tensión inicial. En concreto, en un ensayo normalizado (tensión inicial 70% de la carga de rotura), las zonas interiores de alambre relajarán como si la tensión inicial del ensayo fuera muy inferior al 70% y sin embargo la zona superficial lo hará como si la carga estuviera cercana al límite elástico. La suma de todas esas relajaciones nos da la relajación del alambre. Como se puede apreciar, esto explica que ya no exista un quiebro importante a cargas próximas al límite elástico, porque la tensión de plastificación ya no se alcanza a la vez en toda la sección.

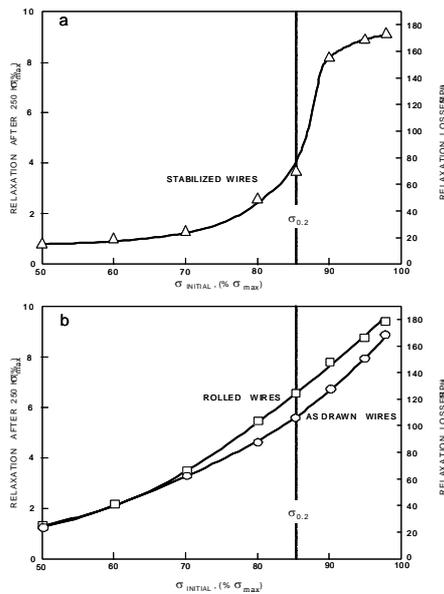


Figura 4. Pérdidas por relajación al cabo de 1000 horas, en función de la carga inicial [15].

En resumen: Dos alambres de acero con similares propiedades mecánicas (límite elástico, tensión de rotura y alargamiento bajo carga máxima) pero con diferentes niveles de tensiones residuales exhibirán comportamientos diferentes en relajación. Desde el punto de vista del ensayo de relajación, el mejor alambre será de nuevo el Estabilizado. La existencia de un perfil de tensiones residuales, bien sea con tracciones o con compresiones en la superficie provocará que aumenten sus pérdidas por relajación (Figura 5) [15].

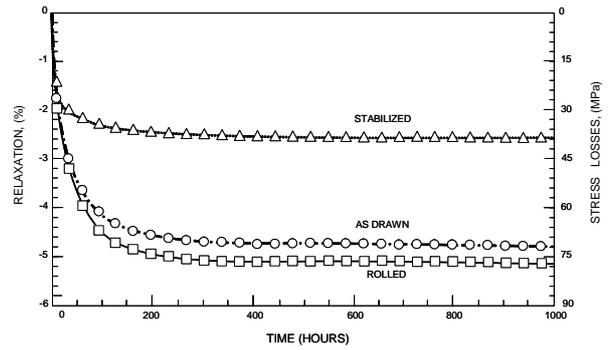


Figura 5.- Curvas de relajación para los tres tipos de alambres obtenidas en el ensayo de relajación normalizado: carga inicial 70% de la resistencia [15].

### 5. LAS TENSIONES RESIDUALES Y EL ENSAYO DE CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

El fenómeno de la corrosión bajo tensión consiste en que bajo la acción combinada de la tensión y el ambiente agresivo se generan fisuras en los alambres que pueden crecer con tensiones del orden de la tensión de trabajo y provocar la rotura de las armaduras. Se trata de una cuestión de gran importancia, tanto desde el punto de vista de la seguridad estructural, porque implica una pérdida de capacidad resistente en el material con el consiguiente riesgo de rotura catastrófica, como desde el punto de vista económico, por la necesidad del mantenimiento de los elementos dañados, lo que encarece los costes de conservación.

El ensayo en tiocianato amónico propuesto por la FIP en 1978 continúa siendo en la actualidad la única forma válida para el control y la aceptación de estos aceros, pero tiene el inconveniente de la dispersión en el tiempo de rotura. Esto se ve influenciado por la presencia de tensiones residuales en los alambres. El daño superficial que puede provocar variaciones en los tiempos de fractura por fragilización por hidrógeno debería tener una profundidad del orden de 0.1 mm o menos [4]. Las tensiones residuales existentes en esa zona tendrán una influencia fundamental al sumarse a la carga que reciba el alambre.

Se ha detectado una buena correlación entre las tensiones residuales en la superficie de los alambres y los tiempos de rotura medidos en los ensayos FIP. Los resultados obtenidos [2-4] pueden resumirse en los siguientes puntos:

- a.- Las diferencias en los tiempos de rotura en alambres perlíticos —con la misma microestructura, calidad superficial y propiedades mecánicas— parecen deberse a las diferencias en los perfiles de tensiones residuales. Los alambres inmediatamente después del proceso de trefilado tienen altas tensiones residuales de tracción en la superficie, por lo que presentan tiempos de rotura menores que los alambres del mismo tipo que han sufrido algún tratamiento posterior de eliminación de tensiones, como se muestra en la figura 6.

b.- La carga inicial en el ensayo FIP78 es del 80% de la tensión de rotura. Se trata de una carga muy alta que puede enmascarar el efecto de las tensiones residuales, porque la combinación de las cargas externas y las tensiones residuales pueden superar la tensión de plastificación en las capas más exteriores del alambre; a partir de ese momento, el aumento de la carga exterior difícilmente puede aumentar las tensiones que está soportando la piel del alambre (donde se supone que va a iniciarse la rotura) porque ya está plastificada. Este efecto se puede observar al realizar ensayos de corrosión bajo tensión con diferentes cargas iniciales (Figura 6).

c.- La dispersión en los tiempos de rotura para un mismo tipo de alambre es un problema bien conocido que genera incertidumbre en la interpretación de los resultados de los ensayos FIP78. Se conocen diversas fuentes de dispersión, entre ellas la presencia de defectos en la superficie de los alambres. Las tensiones residuales también tienen influencia en esta dispersión. En medidas experimentales de tensiones residuales realizadas por los autores se han observado diferencias del orden de 150 MPa en distintos puntos de la superficie de una misma probeta.

d.- Los resultados de los ensayos de corrosión bajo tensión muestran que el mejor tratamiento es el que genera tensiones de compresión en la superficie, provocando una mejora significativa de la durabilidad del material en condiciones agresivas (Figura 6). Esto es debido a que la zona superficial es la que determina el inicio de la fisuración y define el comportamiento final del alambre a corrosión bajo tensión. Por tanto, el mejor comportamiento se obtiene generando compresiones importantes en esa zona, que reduzcan la tensión final a que va a estar sometida la armadura. En vista de los importantes problemas de durabilidad que presentan los tendones activos de las estructuras pretensadas construidas en la proximidad de ambientes agresivos, consideramos que podría ser interesante utilizar un tratamiento de este tipo cuando se fueran a emplear en esas condiciones.

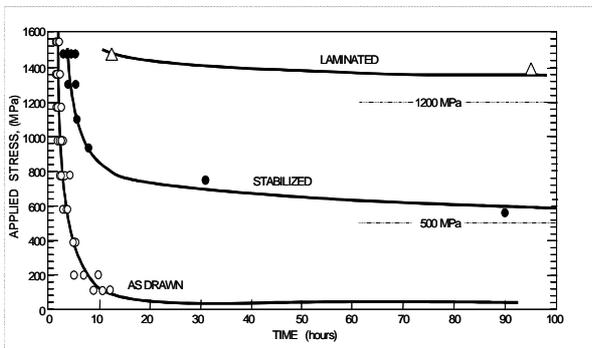


Figura 6.- Tiempos de rotura en el ensayo de fragilización por hidrógeno con tiocianato amónico FIP78 para los tres tipos de alambres, en función de la carga inicial del ensayo [3-4].

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los apartados anteriores se han resumido los principales resultados del trabajo llevado a cabo en los últimos años por los autores sobre la medida, control e importancia de las tensiones residuales en las propiedades de las armaduras activas del hormigón pretensado.

Se ha mostrado que las tensiones residuales tienen una importancia fundamental en el comportamiento mecánico de las armaduras y que, aún con sus limitaciones, hoy en día existen técnicas experimentales y numéricas para caracterizarlas.

Todo parece indicar que en los próximos años los códigos (p.ej. Model Code de la *fib*) empezarán a exigir que se midan las tensiones residuales en la superficie de los alambres, controlando que sean inferiores a un determinado valor.

En vista de los problemas de corrosión bajo tensión que siguen presentando las armaduras activas, incluso los alambres de baja relajación, la cuestión que queda entonces pendiente es si somos o no capaces de mejorar su durabilidad en entornos agresivos.

Los resultados de nuestro trabajo muestran que es posible mejorar la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión de las armaduras, induciendo tensiones residuales de compresión en la superficie. El problema es que, como vimos en los apartados 3 y 4, generar tensiones residuales, en vez de eliminarlas, empeoraría el comportamiento en el ensayo de tracción y sobre todo en el ensayo de relajación. Es decir, podríamos conseguir alambres con mucho mejor comportamiento en ambientes agresivos, pero no serían de baja relajación.

Dicho de otra forma: no se pueden optimizar todas las propiedades a la vez, porque la relajación y el ensayo de tracción dependen de lo que sucede en toda la sección del alambre, mientras que la corrosión depende de las condiciones de su superficie. Es necesario elegir el tratamiento adecuado en función de los requisitos y condiciones de trabajo que vayan a experimentar los alambres. Esto también debería ser tenido en cuenta por los pliegos de condiciones, ya que determinadas exigencias pueden resultar incompatibles.

En opinión de los autores, en vista de los problemas de durabilidad existentes, podría ser interesante preparar calidades especiales de alambre que, aunque con mayores pérdidas por relajación, aseguraran un mejor comportamiento del material a corrosión bajo tensión cuando fueran a ser utilizados en estructuras pretensadas cerca de ambientes agresivos (agua marina).

En cualquier caso, lo que parece claro es que el control de las tensiones residuales es la clave para optimizar los tratamientos y las propiedades de estos alambres.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento a los profesores L. Caballero y A. Valiente por su ayuda con los ensayos de corrosión bajo tensión y sus útiles comentarios. Este trabajo se ha financiado gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología y al Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos FEDER UPM 00.33.004, MAT2002-04343 y ENE2005-06478) y al Ministerio de Fomento (proyecto “Durabilidad de armaduras activas en estructuras de hormigón pretensado”). También desean mostrar su gratitud a D. Luis del Pozo, de EMESA TREFILERÍA S.A., por su ayuda y sus útiles comentarios y, en especial, a los profesores F. Mompeán, M. García Hernández, M. Martínez (ICMM) por su ayuda con las medidas por difracción de neutrones.

### REFERENCIAS

- [1] M. Elices, “Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires,” *Journal of Materials Science*, 39(12), pp 3889-3899, 2004.
- [2] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervías, L. Caballero, and M. Elices, “Residual stresses and stress corrosion in cold drawn eutectoid steel wires,” *Wire Journal International*, pag. 53-57, june 2007.
- [3] Atienza, J. M., Ruiz-Hervías, J., Caballero, L., and Elices, M. (2006). “Residual stresses and durability in cold drawn eutectoid steel wires.” *Metals & Materials International*, 13:2, PP 139-143, 2007.
- [4] Elices, M., Ruiz, J., and Atienza, J.M. “Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement of cold drawn wires”. *Materials and Structures*, 37, 305-309, 2004.
- [5] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervías, M. Elices. “Control de las tensiones residuales como herramienta de mejora de los alambres de pretensado: 1.Caracterización de las tensiones residuales”. *Anales de la Mecánica de Fractura*, en este número, 2008.
- [6] M.L. Martínez-Perez, F.J. Mompeán, J. Ruiz-Hervías, C.R. Borlado, J.M. Atienza, M. García-Hernández, M. Elices, J. Gil Sevillano, Ru Lin Peng and T. Buslaps, “Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction”, *Acta Materialia*, 52, pp 5303-5313, 2004.
- [7] J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervías, M.L. Martínez-Perez, F.J. Mompeán, M. García-Hernández and M. Elices, “Residual stresses in cold drawn pearlitic rods”, *Scripta Materialia*, 52, pp 1223-1228, 2005.
- [8] J. Ruiz-Hervías, J.M. Atienza, M. Elices and E.C. Oliver, “Optimisation of post-drawing treatments by means of neutron diffraction”, *Materials Science and Engineering*, in press 2008.
- [9] Ruiz-Hervías, J., Luzin, V., Prask, H., Gnaeupel-Herold, T., Elices, M. (2006). “Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods.” *Material Science and Engineering vol. 435-436*, pp. 725-735, 2006.
- [10] J.M. Atienza, “Residual stresses in cold drawn steel wires”. PhD Thesis, Polytechnique University of Madrid, Spain, 2001.
- [11] J.M. Atienza, M.L. Martínez-Perez, J. Ruiz-Hervías, F.J. Mompeán, M. García-Hernández and M. Elices, “Residual stresses in cold drawn ferritic rods”, *Scripta Materialia*, 52, pp 305-309, 2005.
- [12] Atienza, J. M., and Elices, M. “Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires.” *Materials and Structures*, 36, 548-552, 2003.
- [13] CEB-FIP (1990). *Model Code 1990*, Lausanne, (1991). ASTM-A421 (1991), EHE-UNE 36094 (1994), BS-2691 (1991)
- [14] Atienza, J.M., and Elices, M. “Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires.” *Materials and Structures*, 37, 301-304, 2004.
- [15] Atienza, J.M. and Elices M. (2007). “Role of residual stresses in the stress relaxation of prestressed concrete wires”. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19:8, pp 703-707, 2007.