

INFLUENCIA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SOBRE LA TENACIDAD DE FRACTURA DE ACEROS PERLÍTICOS TREFILADOS

M. Toledano y J. Toribio

Departamento de Ciencia de Materiales (ULC)
ETSI Caminos, Campus de Elviña, 15192 La Coruña

Resumen. En este artículo se estudia la influencia del proceso de fabricación sobre la tenacidad de fractura de aceros perlíticos con diferentes grados de trefilado. Los resultados demuestran que el trefilado progresivo afecta claramente al comportamiento en fractura del acero, de forma que los aceros fuertemente trefilados exhiben anisotropía resistente, con un cambio en la dirección de propagación para aproximarse a la del eje del alambre o dirección del trefilado. A nivel microscópico, mientras en el alambón la rotura se produce por clivaje (C) a partir de la fisura de fatiga, en los primeros estadios de trefilado aparece fractura por crecimiento y coalescencia de huecos (CCH) y a continuación C. Los aceros fuertemente trefilados, tras la propagación CCH en modo I, exhiben un escalón a unos 90° y finalmente propagación mixta CCH+C. Desde el punto de vista resistente, la tenacidad de fractura de los aceros aumenta con el trefilado.

Abstract. This paper deals with the influence of the manufacturing process on the fracture toughness of pearlitic steels with different degree of cold drawing. Results demonstrate that progressive cold drawing affects clearly the fracture performance of the materials, i.e., the most heavily drawn steels exhibit anisotropic fracture behaviour with a change in crack propagation direction which approaches the wire axis or cold drawing direction. At the microscopical level, whereas in the hot rolled bar the fracture mode is cleavage (C) from the fatigue crack, in the first stages of cold drawing the fracture mode is by micro-void coalescence (MVC) followed by C. The heavily drawn steels exhibit, after the MVC propagation in mode I, a 90°-step and finally mixed propagation by MVC+C. From the resistance point of view, the fracture toughness of the steels increases with cold drawing.

1. INTRODUCCION

El estudio de la tenacidad de fractura en materiales de alta resistencia ha sido un tema fundamental dentro de la investigación en el campo de la Mecánica de Fractura, que se ha plasmado en importantes trabajos convertidos ya en clásicos [1]. Sin embargo, a pesar del importante esfuerzo investigador en la línea anterior, constituye un punto nuevo dentro de esta temática el estudio de la influencia que el proceso de trefilado progresivo, y por consiguiente la evolución microestructural, tiene sobre la tenacidad de fractura del acero perlítico.

A este respecto, en un artículo anterior [2] se analizaron a nivel microscópico las diferencias en topografía de fractura entre aceros con distinto grado de trefilado, para lo cual se tomaron muestras de los diferentes escalones del proceso de fabricación, desde el alambón inicial sin trefilar hasta el alambre de pretensado comercial fuertemente trefilado, observándose que para los aceros sin trefilar la rotura se produce por clivaje (C) a partir de la fisura de fatiga; en los primeros estadios de trefilado aparece fractura por crecimiento y coalescencia

de huecos (CCH) y a continuación C; en los aceros fuertemente trefilados, tras la propagación CCH en modo I, aparece un escalón a unos 90° y finalmente propagación mixta C+CCH.

En este artículo se analizan en particular las implicaciones en fractura de los siguientes hechos experimentales: (i) la extensión de la zona CCH antes de la propagación por clivaje (en aceros débilmente trefilados) o antes del escalón a 90° (en aceros fuertemente trefilados); (ii) la anisotropía inherente a la presencia del propio escalón en los casos en que éste aparece; (iii) el aspecto de la curva carga-desplazamiento, con vistas a la medición de la tenacidad de fractura y al estudio de su evolución con el grado de trefilado.

2. METODO EXPERIMENTAL

Para la realización del presente trabajo se ha utilizado un acero eutectoide de alta resistencia suministrado por EMESA, cuya composición química se muestra en la

Tabla 1. Se han analizado distintos grados de trefilado asociados con los pasos intermedios del proceso de manufactura, desde el acero sin trefilar llamado alambrión (acero A0) hasta el acero de pretensar (acero A6 obtenido después de 6 pasos de trefilado y que es el producto final para comercializar). En la Tabla 2 se muestra el diámetro y la nomenclatura para todos los aceros en donde el número de pasos de trefilado aplicado a cada uno se indica por la numeración.

Tabla 1. Composición química (%), de los aceros.

C	Mn	Cr	Si	V	P	S
0.80	0.69	0.265	0.23	0.06	0.012	0.009

Tabla 2. Nomenclatura en función del diámetro.

Nomenclatura	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Diámetro (mm)	12	10.8	9.5	8.9	8.15	7.5	7

La Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas de todos los aceros ($E = 200$ GPa) destacando en particular el gran aumento del límite elástico que se produce según progresa el trefilado. En la Fig. 1 se presentan las gráficas tensión-deformación obtenidas para cada uno de los aceros medidas experimentalmente por medio del ensayo de tracción simple, donde se ve una clara mejora de las propiedades mecánicas como consecuencia del proceso de fabricación (trefilado). Este hecho garantiza que el comportamiento ingenieril del acero de pretensar es adecuado desde el punto de vista de la ingeniería estructural clásica, por ejemplo, el límite elástico del material resultante es lo suficientemente elevado para mantener su comportamiento estructural en régimen elástico. Sin embargo, las consecuencias del proceso de fabricación aún no son bien conocidas desde el punto de vista de la mecánica de fractura moderna y el análisis de la tolerancia al daño para garantizar su integridad estructural. Por eso este punto requiere una investigación más profunda que permita elucidar las consecuencias del proceso de fabricación en el comportamiento en fatiga y rotura del acero de pretensado.

Para estudiar el comportamiento en fractura en aceros hipoeutectoides con diferentes grados de trefilado se tomaron muestras cilíndricas de 30 cm a partir de los alambres suministrados por la trefilería. Las muestras fueron sometidas a fatiga axial en la dirección del alambre en una máquina de ensayo servohidráulica manteniendo la carga mínima casi nula de tal manera que las condiciones de tensión media en las que se fatigó se considera $R \approx 0$, con frecuencia de carga de 10 Hz, en control de carga y con diferentes niveles de carga máxima para cubrir distintos regímenes de propagación de la fisura por fatiga en la curva asociada con la ley de Paris. Finalmente, los aceros prefisurados por fatiga con distintas longitudes de fisura, se sometieron a una carga de tensión creciente hasta producir la fractura para una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 3

mm/min., con el fin de analizar el comportamiento en fractura de los aceros.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los aceros.

Acero	D(mm)	σ_Y (GPa)	σ_R (GPa)	P(GPa)	n
A0	12.00	0.686	1.175	2.03	5.66
A1	10.80	1.100	1.294	1.98	11.04
A2	9.50	1.157	1.347	2.00	11.68
A3	8.90	1.212	1.509	2.32	9.72
A4	8.15	1.239	1.521	2.20	11.45
A5	7.50	1.271	1.526	2.40	10.07
A6(*)	7.00	1.506	1.762	1.73	44.67
				2.34	11.49

D = Diámetro; σ_Y = Límite Elástico; σ_R = Tensión de Rotura (UTS); P,n = Parámetros de Ramberg-Osgood: $\epsilon = \sigma/E + (\sigma/P)^n$

(*) Adaptado a Ramberg-Osgood mediante dos tramos

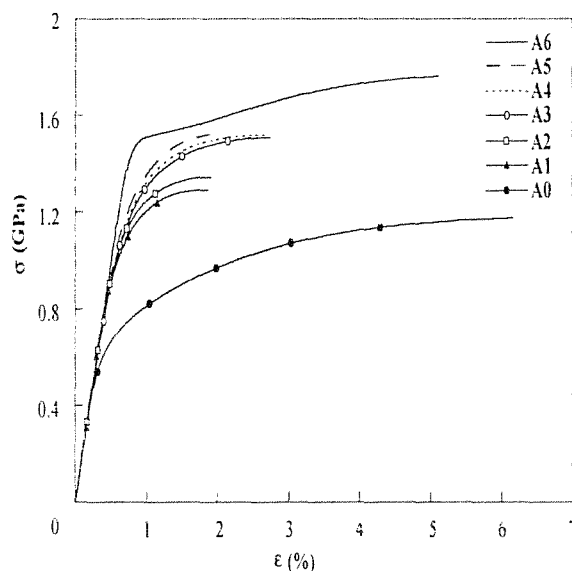


Fig. 1. Curva tensión-deformación de los aceros.

3. EVOLUCION DEL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA

3.1. Análisis fractográfico de los modos de fractura

En el proceso de trefilado del alambrión para la obtención del acero de pretensado, el acero es sometido a una intensa deformación plástica con el objeto de obtener un acero con mayor límite elástico mediante el mecanismo de endurecimiento por deformación, a través del cual se introducen de forma progresiva cambios en la microestructura del material (colonias de perlita). Considerando las colonias de perlita como estructuras

con forma elipsoidal, los resultados del análisis metalográfico [3] demuestran en primer lugar que como consecuencia del proceso de trefilado se produce la orientación de las colonias de perlita así como de las láminas de ferrita y cementita en la dirección del trefilado (eje del alambre) y en segundo lugar se produce una disminución progresiva del espaciado interlaminar, dando como resultado una microestructura más fina en comparación con la correspondiente al acero sin trefilar. Esta deformación y orientación progresiva de la microestructura con el trefilado puede considerarse como la base y el punto de partida para el análisis del comportamiento en rotura en aire observado en los aceros objeto de estudio.

El alambroón (acero A0 sin trefilar) y el primer paso del trefilado A1, muestran un comportamiento en rotura completamente isótropo, siendo el modo de fractura de tipo I (ver Fig. 2) es decir la fisura se propaga en un plano (perpendicular al de sollicitación) que coincide con el plano de propagación de la fisura por fatiga. El modo microscópico de fractura justo después de la prefisura por fatiga en ambos casos es claramente de clivaje (Fig. 3).

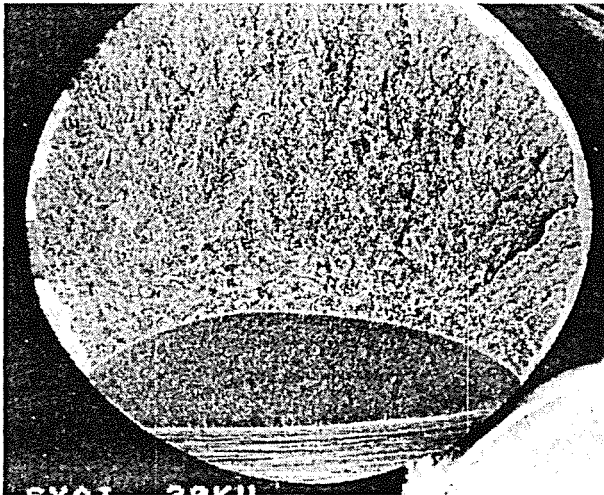


Fig. 2. Rotura en Modo I para los aceros A0 hasta A3.

En los aceros A2 y A3 se mantiene el mismo tipo de comportamiento isótropo en rotura, es decir, el modo de fractura sigue siendo de tipo I (ver Fig. 2). Sin embargo, para estos aceros el modo microscópico de rotura es claramente diferente. La fisura de rotura tras la prefisura de fatiga se produce mediante CCH (rotura dúctil) para continuar propagándose por clivaje según se indica en las Fig. 4 y 5. Los datos obtenidos para la longitud de la zona de rotura dúctil (x_m) antes de iniciarse la rotura frágil, se muestran en la Tabla 4, (utilizando la notación de la Fig. 5) donde además se observa la variación de esta longitud según avanza la rotura en la zona más profunda de la fisura por fatiga ($s = 0^\circ$) o en uno de los laterales ($s = 45^\circ$).

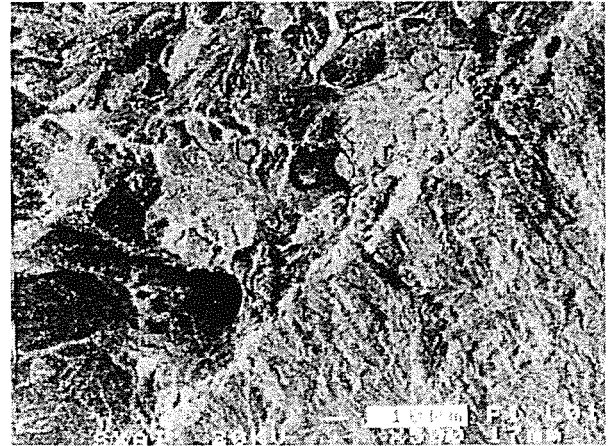


Fig. 3. Modo microscópico de rotura en los dos primeros estadios de trefilado (aceros A0 y A1).

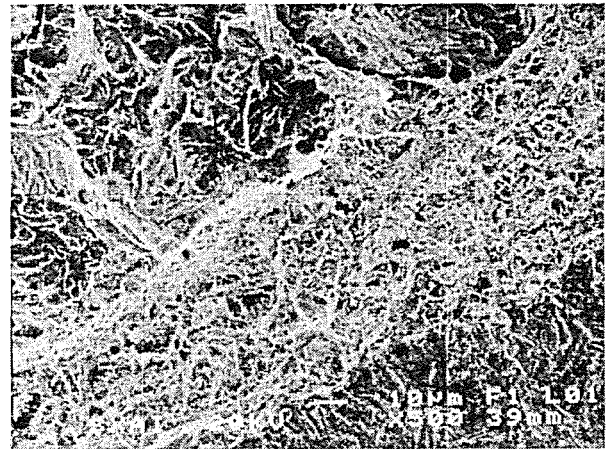


Fig. 4. Modo microscópico de rotura para los aceros A2 y A3.

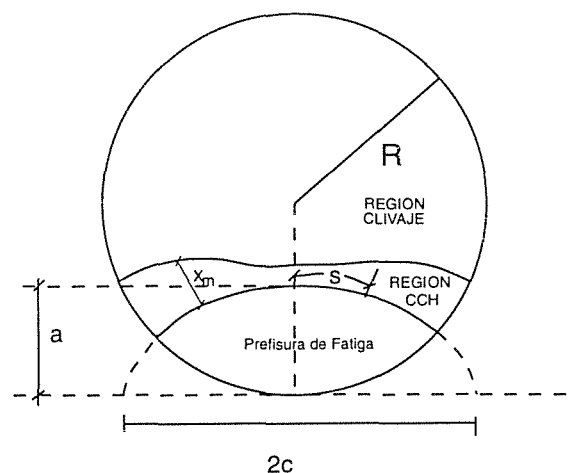


Fig. 5. Esquema de propagación de la fisura (aceros A2 y A3).

Tabla 4. Extensión de la zona CCH (x_m) en los primeros estadios de trefilado según el ángulo de propagación de la fisura. (Aceros A2 y A3).

s	A2	A3
0°	$(2.8 \pm 0.7) \mu\text{m}$	$(4.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$
45°	$(32.7 \pm 5.2) \mu\text{m}$	$(74.3 \pm 6.4) \mu\text{m}$

Los aceros fuertemente trefilados presentan un comportamiento en fractura claramente anisótropo asociado con un ángulo de desviación de casi 90° con el plano inicial de propagación para continuar creciendo la fisura en una dirección próxima a la inicial (entre 20° y 30°), produciéndose así lo que denominamos escalón de rotura (Fig 6). Según se muestra en la Fig. 7 este escalón a 90° aparece a una distancia x_s desde el borde de la fisura por fatiga, y esta distancia disminuye según aumenta el grado de trefilado (Tabla 5), de modo que en el acero que constituye el ultimo estado del proceso de endurecimiento por deformación (A6) este escalón se sitúa justo en el borde de la fisura de fatiga ($x_s = 0$). El comportamiento anisótropo descrito es consistente con trabajos anteriores en acero de pretensado [4]. Cabe destacar el carácter abrupto (a nivel mesoscópico) de la propagación de la fisura en la región x_s .



Fig. 6. Rotura en Modo II para los aceros A4 hasta A6.

Aparte del mencionado escalón, las superficies de rotura pueden ser clasificadas de la siguiente forma: antes del escalón (cuando x_s es distinto de cero) el modo de fractura es CCH al principio y después continua por CCH con facetas aisladas de clivaje. Por tanto la distancia x_s representa la extensión del crecimiento de fisura en modo I por CCH antes de producirse la propagación en modo mixto a partir del escalón a 90°, con la salvedad del acero de pretensado A6 que

representa el último estadio del proceso de trefilado para el cual dicha extensión no existe.

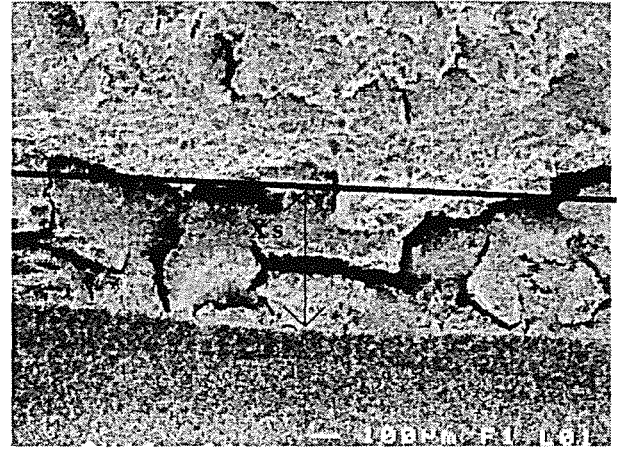


Fig. 7. Propagación de rotura en aceros A4 y A5.

Tabla 5. Distancia de la prefisura de fatiga al escalón de rotura en tracción.

Acero	x_s (mm)
A4	(0.85 ± 0.21)
A5	(0.45 ± 0.14)
A6	0

3.2. Tenacidad de Fractura

En este punto se presenta el método utilizado para evaluar la tenacidad de fractura de los distintos aceros analizados así como los resultados obtenidos.

En los ensayos de tracción axial en muestras fisuradas se registraron las variables carga-desplazamiento hasta la rotura, colocando el extensómetro (de base de medida 12,5 mm) simétricamente dispuesto con respecto a los labios de la fisura. En la Fig. 8 se muestran los resultados de los aceros A2, A4 y A6, siendo estos los más representativos obtenidos para los distintos grados de trefilado. En primer lugar se observa que para el acero A2 (y en particular para los tres primeros grados de trefilado) los materiales presentan un comportamiento casi completamente elástico-lineal hasta rotura, aumentando ligeramente la curvatura del registro según progresa el trefilado, aunque en cualquier caso la desviación con respecto a un tramo perfectamente recto es mínima. A partir del acero A3, y más marcadamente en los aceros A4, A5 y A6 el comportamiento es claramente no lineal, según se muestra en la Fig. 8. Se pone por tanto de manifiesto

el diferente comportamiento de los acero con distinto grado de trefilado.

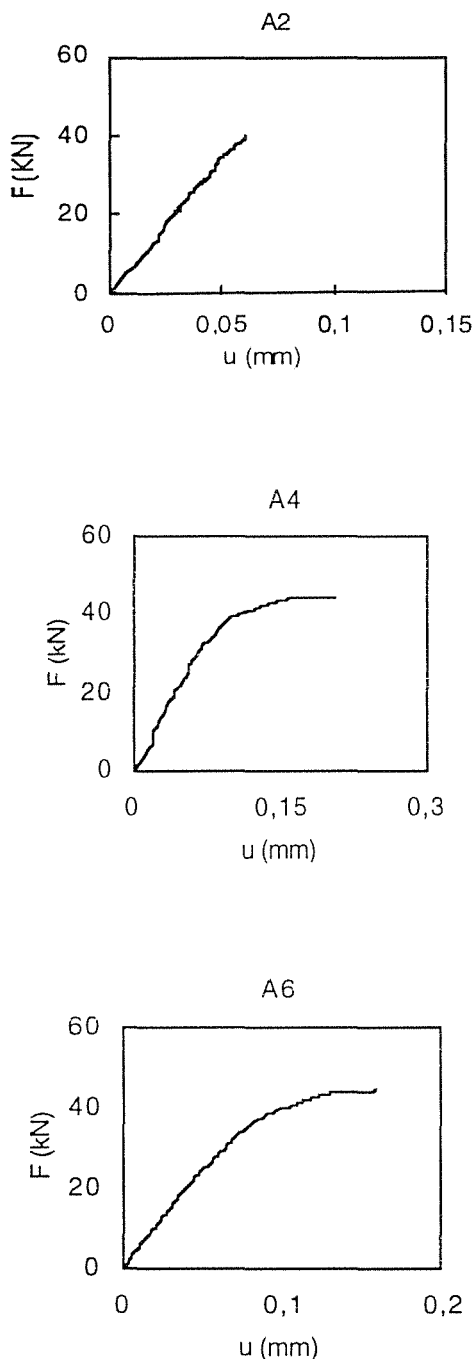


Fig. 8. Registros carga-desplazamiento hasta rotura en los aceros prefisurados.

Las diferencias observadas en la curva carga-desplazamiento (F-u) de los distintos aceros pueden atribuirse al modo de fractura en cada caso. Así, en los aceros débil o medianamente trefilados (A0-A3) la fractura es predominantemente frágil y en modo I, por lo que el registro F-u resulta prácticamente lineal. En los aceros con un grado de trefilado intermedio/alto (A4-A5-A6), la presencia del escalón a 90° puede explicar el tramo no lineal de la curva F-u, y esta hipótesis ha sido comprobada experimentalmente realizando un ensayo de

fractura con dos extensómetros situados en posiciones diametralmente opuestas, uno frente a los labios de la fisura y el otro en la parte posterior, y observando un efecto de flexión como consecuencia de la propagación en modo mixto.

Para establecer el valor de K_{IC} se ha seguido el mismo criterio en todos los casos. En primer lugar, como expresión del factor de intensidad de tensiones, se ha utilizado la solución aproximada obtenida por A. Valiente [5] al considerar una expresión uniparamétrica de K_I función de la relación profundidad de la fisura diámetro del alambre.

$$K_I = M(\xi) \sigma(\pi a)^{1/2} \tag{1}$$

donde a es la profundidad de fisura, σ es la tensión remota y $M(\xi)$ el factor de intensidad de tensiones adimensional definido como:

$$M(\xi) = \frac{[0.473 - 3.286 \xi + 14.797 \xi^2]^{1/2}}{[\xi - \xi^2]^{1/4}} \tag{2}$$

donde $\xi = a/D$ es la relación entre la longitud de fisura y el diámetro del alambre.

Con estas expresiones se procedió a la obtención de la tenacidad de fractura como valor crítico del factor de intensidad de tensiones, utilizando en todos los casos la profundidad de la fisura de fatiga (medida al proyector de perfiles tras el ensayo de fractura) y la carga máxima obtenida en dicho ensayo. De acuerdo con las consideraciones anteriores relativas a la curva F-u, en los aceros A4, A5 y A6 la utilización de la carga máxima del registro F-u supone sobrevalorar la tenacidad sin tener en cuenta que la propagación de fisura en modo mixto se inicia cuando el registro se hace apreciablemente no-lineal, es decir, para una carga claramente inferior a la máxima. Se tiene así una "pseudo-tenacidad", útil para diseño ingenieril, y calculada como si la fisura se propagase en modo I. Los valores así obtenidos para todos los aceros se dan en la Tabla 6, donde se observa que la tendencia es el aumento de la tenacidad de fractura con el grado de trefilado.

Tabla 6. Evolución de la tenacidad de fractura de un acero perlítico al aumentar el grado de trefilado.

Acero	K_{IC} (MPam ^{1/2})
A0	63
A1	61
A2	70
A3	74
A4	110
A5	106
A6	107

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento en fractura de aceros perlíticos con distinto nivel de endurecimiento por deformación (grado de trefilado) como consecuencia del propio proceso de fabricación.

Desde el punto de vista fractográfico, los resultados dependen claramente del grado de trefilado, con una transición progresiva desde C a CCH (con facetas aisladas de C) entre los extremos del proceso de trefilado (alambión y acero de pretensado).

En los aceros no trefilados o débilmente trefilados (A0 y A1) la fractura es por C. En los medianamente trefilados (A2 y A3) aparece una región de CCH de profundidad x_m y a continuación C. En los aceros con un grado de trefilado intermedio/alto (A4, A5 y A6) se produce, a una distancia x_s de la fisura de fatiga, un escalón a 90° que delimita las zonas de propagación de la fisura en modo I y en modo mixto, con topografías de fractura CCH y CCH +C respectivamente. En el caso particular del acero de pretensado (A6) $x_s = 0$.

El aspecto de la curva carga-desplazamiento en los ensayos de fractura también evoluciona con el trefilado, desde un registro prácticamente lineal en los primeros estadios del proceso hasta uno con fuerte curvatura en los últimos, pudiendo asociarse éste a un efecto geométrico de flexión a consecuencia de la propagación en modo mixto.

Desde el punto de vista ingenieril, la tenacidad de fractura de los aceros aumenta apreciablemente con el trefilado, y esta mejora de propiedades es consecuencia en parte de la propia anisotropía resistente asociada con la orientación progresiva de la microestructura durante el proceso de fabricación.

Agradecimientos

Los autores desean hacer constar su agradecimiento por la financiación recibida de la CICYT (Ref. MAT97-0442) y la Xunta de Galicia (Refs. XUGA - 11801B95 y XUGA 11802B97. También agradecen a EMESA TREFILERIA S.A. el suministro del material para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] M. Elices, Fracture of steels for reinforcing and prestressing concrete. In *Fracture Mechanics of Concrete: Structural Application and Numerical Calculation* (Edited by G.C. Sih and A. DiTommaso), pp. 226-271, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1985).
- [2] M. Toledano y J. Toribio, Fatiga y fractura de aceros perlíticos con diferentes grados de trefilado. *Anales de Mecánica de la Fractura*, **14**, 267-272 (1997).
- [3] J. Toribio, E. Ovejero y M. Toledano. Microstructural bases of anisotropic fracture behaviour of heavily drawn steel. *International Journal of Fracture* (In press).
- [4] M.A. Astiz, A. Valiente, M. Elices and H.D. Bui, Anisotropic fracture behaviour of prestressing steels. In *Life Assessment of Dynamically Loaded Materials and Structures-ECF5* (Edited by L. Faria), pp. 385-396, EMAS, West Midlands, U.K. (1984).
- [5] A. Valiente, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (1980).