

Influencia de la microestructura en el comportamiento en fatiga de aceros perlíticos

M. TOLEDANO¹, R. RODRÍGUEZ², S. FERNÁNDEZ¹

¹Universidad da Coruña, ETSI Caminos, Campus de Elviña, 15192 A Coruña;

²Universidad da Coruña, ES Marina Civil, 15011 A Coruña

Este artículo pretende poner de manifiesto la influencia que los cambios microestructurales inducidos en un acero hipoeutectoide mediante un proceso de trefilado, tienen sobre la velocidad de crecimiento de fisuras sub-críticas, desarrolladas por sollicitación cíclica con amplitud de carga constante. El análisis microestructural ha sido realizado a dos niveles: la colonia perlítica (primer nivel) y la microestructura laminar de la perlita (segundo nivel microestructural). El análisis del comportamiento en fatiga se ha centrado en la región II del régimen de propagación de fisuras por fatiga, en donde la velocidad de crecimiento de fisuras, da/dN , está controlada por la amplitud del factor de intensidad de tensiones, K , según queda descrito por la ley de Paris. Los resultados obtenidos muestran que la mejora en el comportamiento en fatiga de los aceros, en la zona de crecimiento estable de la fisura, se relaciona con el alineamiento de las colonias perlíticas en la dirección del trefilado, encontrando una relación lineal entre la constante de proporcionalidad de la ley de Paris (propiedad mecánica) con el ángulo de alineación de la microestructura.

Palabras claves: Fatiga, Ley de Paris, Trefilado, Acero perlítico, Microestructura

The influence of microstructure in the fatigue behaviour of pearlitic steels

This article accounts the relationship between the microstructure of pearlitic steels (influenced by the cold-drawn manufacturing process) and the growing rate of sub critical cracks, produced by a cyclic-constant amplitude load. The microstructural study is performed in two levels: the pearlitic colony (first level) and the pearlitic lamellar microstructure (second microstructural level). The analysis of the fatigue behaviour was focused on the region II of the fatigue crack propagation regime, in which the crack growing rate per cycle, da/dN , is controlled by the amplitude of the stress intensity range, as described by Paris law. The enhancement of the fatigue behaviour, in the stable growing zone, is related with the progressive orientation of the pearlitic colonies in the cold drawing direction, showing a linear relation between the intersect parameter of the Paris law (mechanical property) and the alignment angle of the microstructure.

Keywords: Fatigue, Paris Law, Cold Drawing, Pearlitic steel, Microstructure

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la ingeniería estructural, y en particular en ingeniería civil, el alambre fisurado bajo sollicitación cíclica representa un reto muy importante de estudio, pues numerosos elementos estructurales consistentes en alambres, cables, cordones, tendones u otros componentes, trabajan bajo sollicitaciones oscilantes de tracción en la dirección del propio eje. En estas condiciones de servicio, existe un alto riesgo de aparición y propagación de fisuras por fatiga originadas por las acciones mecánicas.

En la mayoría de estos componentes estructurales las tensiones de servicio son menores que las tensiones de cedencia, y la propagación de grietas por fatiga transcurre en el cuerpo deformado elásticamente, de manera que la aplicación de los principios de la Mecánica de la Fractura es válida para caracterizar el comportamiento de los materiales en fatiga (1). Según esta disciplina, la vida útil de los componentes, dependerá de la velocidad de crecimiento de fallas, expresada como da/dN (cambio en el tamaño de fisura con respecto al número de ciclos de carga), desde un tamaño subcrítico hasta el tamaño crítico, y esto ocurrirá cuando el intervalo del factor de intensidad de tensiones aplicado K , alcance el valor de la tenacidad de fractura, K_{IC} (2).

Los aceros estructurales de alta resistencia utilizados comúnmente en aplicaciones de ingeniería civil (por ejemplo, en hormigón de pretensado) se obtienen mediante un proceso de mecanizado en frío denominado trefilado, mediante el cual se inducen en el material fuertes cambios microestructurales (3-4), destinados principalmente

a mejorar la resistencia del material elevando notablemente el límite elástico. También ha sido ampliamente estudiado los efectos de los parámetros microestructurales en la tenacidad de fractura (5). Sin embargo, las consecuencias del proceso de fabricación en relación con la evolución del comportamiento a fatiga y su vinculación con los cambios microestructurales no son del todo conocidas.

En este estudio se intenta proporcionar las bases microestructurales del comportamiento en fatiga para aceros pretensados de alta resistencia, analizando la relación entre las peculiaridades microestructurales inducidas por el trefilado en las distintas hileras de deformación, y los cambios asociados a la velocidad de propagación de fisuras de fatiga en la región de crecimiento estable (región II), utilizando para ello el análisis metalográfico y los principios de la Mecánica de la Fractura.

2. MATERIAL

Para este trabajo se ha utilizado un acero hipoeutectoide suministrado por EMESA Trefilería. La composición química se da en la Tabla I. Macroscópicamente, el proceso de trefilado consiste en una reducción progresiva del diámetro del alambre debido tanto a las tensiones axiales, como a las tensiones de compresión transversal a las que es sometido en cada una de las matrices de deformación. Esta reducción

de la sección es la que se utiliza en el artículo para caracterizar los estados intermedios del proceso de fabricación.

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO EN %.

C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Al
0.80	0.69	0.23	0.012	0.009	0.265	0.06	0.004

Con objeto de analizar la evolución de la microestructura y del comportamiento en fatiga del acero, se han tomado muestras de cinco pasos del trefilado, aparte del material original (alambroón, procedente de la acería, sin tratamiento de trefilado) y del producto comercial (acero de pretensado de alta resistencia). En la Tabla II se indica la nomenclatura, reducción de sección total (en tanto por ciento), límite elástico y tensión de rotura de cada una de las muestras tomadas. De estos datos se observa que con el proceso de trefilado se consigue de manera progresiva una mejora notable de las propiedades mecánicas (aumento del límite elástico), siendo este el principal objetivo del tratamiento mecánico de conformado en frío.

TABLA II. NOMENCLATURA, REDUCCIÓN ACUMULADA DE SECCIÓN (Acc), Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS.

Paso	Acc (%)	σ_y (GPa)	σ_r (GPa)
Alambroón	0	0.686	1.175
1	19	1.100	1.294
2	34	1.157	1.347
2	45	1.212	1.509
4	53.9	1.239	1.521
5	60.9	1.271	1.526
Pretensado	66	1.506	1.762

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La primera parte de este programa experimental se ha centrado en el análisis metalográfico de la evolución microestructural del acero. Dada la composición hipoeutectoide del material, la microestructura está constituida por colonias de perlita en una matriz de ferrita. El estudio se ha centrado en la colonia de perlita (primer nivel microestructural) y en la microestructura de la perlita laminar (segundo nivel), que consiste en láminas alternas de ferrita ($Fe-\alpha$, material dúctil a temperatura ambiente) y cementita (Fe_3C componente frágil). Los detalles de la estructura perlítica han sido puestos de manifiesto en muestras pulidas y atacadas con Nital al 2%, seguido por análisis en microscopio óptico invertido y electrónico de barrido (SEM). En la Fig. 1 se muestra una imagen de la colonia perlítica vista al SEM.

La segunda parte experimental ha consistido en caracterizar el comportamiento de la velocidad de crecimiento de fisura cuando se propaga de manera estable. En este régimen, la ecuación que describe el aumento de la longitud de fisura con el número de ciclos (da/dN) frente al intervalo de oscilación del factor de intensidad de tensiones (K) se conoce como ley de Paris y se expresa de la forma:

$$da/dN = C(K)^m$$

donde C y m son constantes del material que dependen del medio y del tratamiento termomecánico.

En particular, estos ensayos de fatiga se han diseñado con el objeto de calcular experimental los parámetros C y m de la Ley de Paris para cada uno de los aceros que representa un grado de trefilado. Los resultados obtenidos con estos ensayos, es decir, la evolución que se constate que sufren estos parámetros característicos del material, permitirá sentar las bases para analizar con más detalle la relación entre las propiedades macroscópicas del material, características de su comportamiento en fatiga, y su microestructura.

3.1. Caracterización Microestructural

El primer nivel microestructural de los aceros es la colonia de perlita, entendida como un conjunto de láminas con la misma orientación. Para analizar la evolución de la colonia de perlita se ha elegido un modelo geométrico elipsoidal, mediante el cual, es posible cuantificar, a través de sus ejes, tanto el tamaño de la colonia, como los ángulos de orientación de la colonia de perlita en relación con las direcciones principales del alambre, longitudinal (L) y transversal (T). Gráficamente el esquema utilizado se muestra en la Fig. 2. En la sección L (S-L), se ha medido el semieje mayor, c, y menor, a', y la orientación θ , definida por el ángulo que forma el eje del alambre (dirección Z) y el eje mayor del elipsoide (L1). Por lo tanto, el ángulo θ representa el alineamiento de la colonia de perlita con la dirección del trefilado. En la sección T (S-T), el ángulo de orientación ϕ se mide entre la dirección X del plano de la imagen y una línea de ensayo definida por el eje mayor (L2) de la sección elíptica. La medida del ángulo ϕ nos permite evaluar la posible torsión que hayan experimentado las colonias de perlita en el proceso de trefilado. En S-T, los parámetros b y a representan los semiejes mayor y menor de la elipse respectivamente.

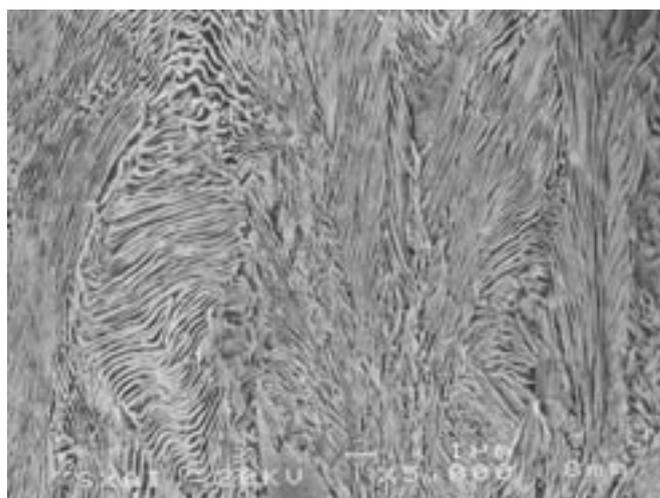


Fig. 1. Microestructura del acero perlítico hipoeutectoide (X 40).

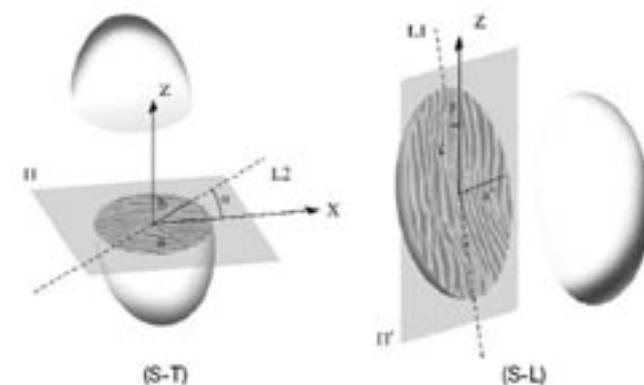


Fig. 2. Modelo elipsoidal de la colonia de perlita según las secciones longitudinal (S-L) y transversal (S-T).

3.2. Propagación de Fisuras de Fatiga

La geometría de análisis es un alambre cilíndrico, en el que se ha mecanizado una entalla superficial, contenida en un plano transversal al eje del alambre, (o dirección de sollicitación) con objeto de localizar inicialmente el lugar de propagación de la grieta y facilitar el crecimiento rápido de la fisura simulando un defecto en el material.

Para la fisuración de las muestras se ha empleado una máquina servohidráulica Instron 8516 con una célula de carga de 100kN. Los ensayos de fatiga se realizaron con una onda senoidal a tracción a 10 Hz de frecuencia y con una razón de carga constante de $R = 0.1$. Se ensayaron como mínimo tres probetas para cada paso del trefilado. Dada la peculiaridad de la geometría ensayada, se utilizó la siguiente expresión para el cálculo del factor de intensidad de tensiones (6):

$$K_I = M(a/D)\sigma\sqrt{\pi a} \quad [1]$$

donde es la tensión axial remota, a la longitud de grieta, D el diámetro del alambre y $M(a/D)$ es una función adimensional dada por:

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

El proceso de fisuración consistió en aplicar varios bloques de carga ($\Delta\sigma$) de amplitud decreciente, comenzando a fisurar con valores de K entre $30\text{MPam}^{1/2}$ y $40\text{MPam}^{1/2}$ y terminando los ensayos para cada alambre con valores entre $12\text{MPam}^{1/2}$ y $15\text{MPam}^{1/2}$. Para medir el frente de la fisura semi-elíptica en el interior del material se colocaron unas galgas extensiométricas entre los extremos de la entalla mecanizada, y se utilizaron las gráficas de flexibilidad normalizada frente a longitud de fisura normalizada obtenidas por el método de conformidad (7).

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los análisis metalográficos demuestran que el primer efecto del trefilado es una progresiva orientación de la colonia de perlita con su eje principal aproximándose al eje del alambre o dirección del trefilado, y estos efectos parecen ser predominantes en los primeros pasos del proceso de fabricación. Los datos del ángulo β , que refleja el alineamiento de la colonia perlítica con la dirección del trefilado, han sido ajustados por una curva exponencial, según se muestra en la Fig. 3. En esta figura también se presentan los valores medidos para el ángulo α , sin que se aprecie ninguna variación significativa.

El segundo efecto del trefilado es un alargamiento de la colonia perlítica, que da lugar a un aumento del eje principal, $2c$, y una ligera reducción de los ejes secundarios, $2a$ y $2b$ (perpendiculares al anterior). Este efecto parece ser predominante en los últimos estadios del conformado, como puede verse en la Fig. 4. También merece destacar que los valores numéricos de las medidas del eje menor de las secciones elípticas L y T son muy parecidas, lo que indica que la colonia puede ser considerada como axisimétrica, siendo el eje de simetría el correspondiente a la dimensión $2c$.

Ambos efectos, la orientación y el alargamiento, tienden a aumentar el empaquetamiento de la sección transversal de la colonia, en particular en el acero de alta resistencia (último pasos del trefilado), promoviendo el desarrollo de una elevada anisotropía en el material (8).

El segundo nivel microestructural lo constituyen las láminas de la perlita. El espaciado interlaminar fue determinado midiendo, en las imágenes obtenidas con SEM, la mínima distancia entre láminas en varias colonias (al menos en diez). Los datos obtenidos, representados en la Fig. 5, corroboran los obtenidos por otros autores (9), según los

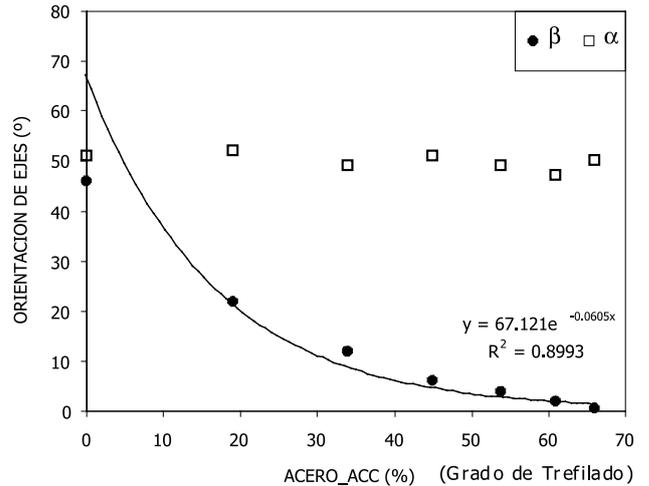


Fig. 3. Orientación de los ángulos y de la colonia de perlita para diferentes grados de trefilado.

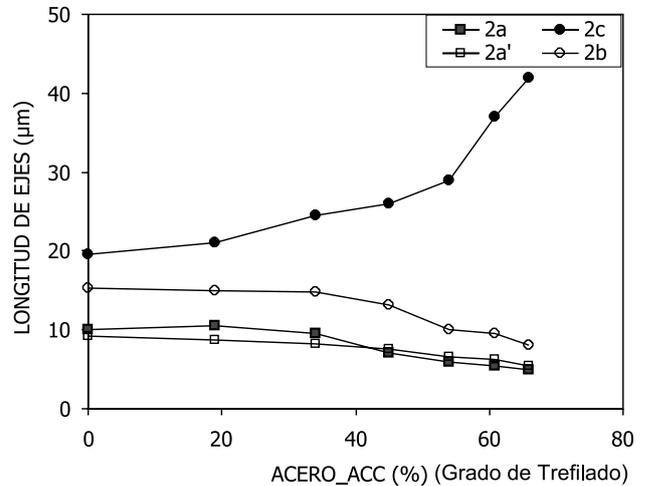


Fig. 4. Dimensiones de la colonia de perlita. (Datos ajustados por una línea de tendencia).

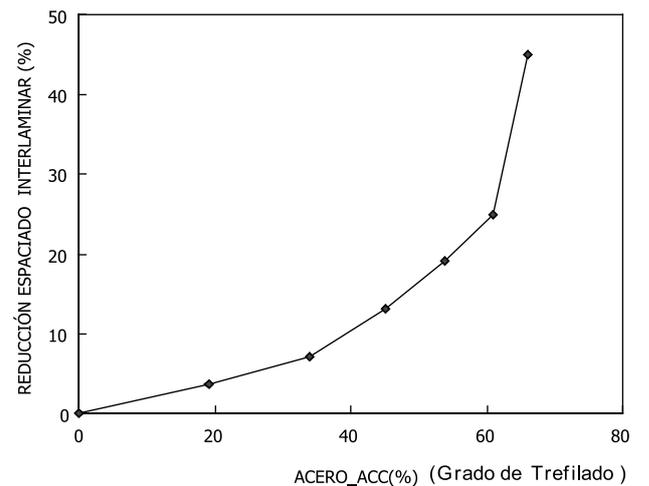


Fig. 5. Reducción progresiva del espaciado laminar en función del grado de trefilado. (Datos ajustados por una línea de tendencia).

cuales el refinamiento de la estructura perlítica está ligado al aumento del límite elástico y resistencia en el material. En nuestro caso, hemos comprobado que el proceso de trefilado que supone un aumento notablemente del límite elástico y de la resistencia del material, según se puso de manifiesto en la Tabla II, tiene asociado a nivel microestructural la reducción del espaciado interlaminar.

De los ensayos de sollicitación cíclica a tracción se han determinado los parámetros C y m de la ley de Paris a partir del análisis de la regresión lineal de la gráfica log (da/dN) vs. log (K), obtenida para cada acero, según se muestra en la Fig. 6.

El factor exponencial m, indicativo de la tasa de crecimiento de la fisura y por tanto de la resistencia a la propagación de grietas por fatiga se mantiene constante con el proceso de trefilado, resultando un valor medio de 2.7. En la Fig. 7 se muestran los valores experimentales de C, y la curva exponencial de ajuste de los datos. Para este parámetro se observa una fuerte dependencia con los cambios microestructurales provocados por el trefilado, oscilando estos valores entre 2.5.10⁻¹¹ para el alambrión (en el eje de abscisas corresponde al acero con reducción acumulada de sección del 0%) y 3.9 10⁻¹² en el acero de alta resistencia (en el eje de abscisas corresponde al acero con reducción acumulada de sección del 66%). Esta disminución es indicativa de que para un mismo estado tensional de sollicitación (K), la tasa de crecimiento estable de la fisura por fatiga será menor en un estado de trefilado mayor.

El estudio fractográfico realizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de las superficies de fractura de los distintas probetas, ha puesto de relieve la presencia de estrías de fatiga orientadas en la dirección de avance de la fisura, con aspecto similar a una fractura por cuasi-clivaje. Sin embargo, no se aprecia diferencia en el tamaño de las estrías según avanza el proceso de trefilado. En la Fig. 8 se presenta una imagen característica de las estrías de fatiga que se generan en los aceros estudiados.

Como resultado de este estudio se puede considerar que la disminución en la velocidad de crecimiento de fisuras con el aumento del grado de trefilado en aceros perlíticos puede atribuirse a dos factores microestructurales: a) reducción del espaciado interlaminar provocada por la disolución de la fase de carburo que tiene lugar en el proceso de trefilado debido a las altas deformaciones plásticas (10) y b) el alineamiento de la colonia perlítica paralela al eje del alambre, que favorece el desarrollo de una fuerte anisotropía axial, aumentando con

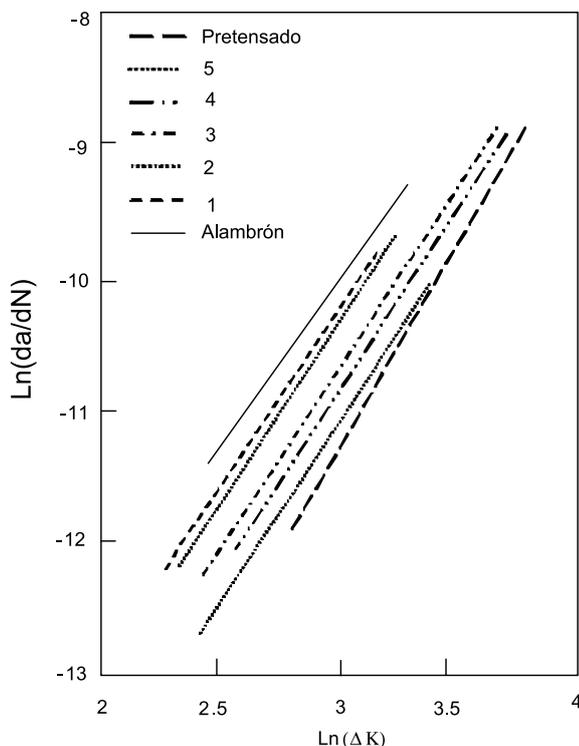


Fig. 6. Gráfica bilogarítmica de la velocidad de crecimiento de fisura de fatiga frente al incremento del factor de intensidad de tensiones para los distintos grados de reducción de sección analizados.

ello la resistencia del material al desarrollo de fisuras en modo I. La dependencia lineal entre el ángulo beta, de alineamiento de la colonia perlítica, y el parámetro C de proporcionalidad de la ley de Paris se puede expresar de la forma:

$$C(\text{Acc}, \beta) = 0.35 \cdot 10^{-11} \cdot \text{Acc} \cdot \beta \quad [3]$$

donde Acc es la reducción acumulada de sección y β es el ángulo de alineamiento de la colonia con el eje del alambre. En la Fig. 9 se muestra la correlación entre ambos datos, presentando los valores de C experimental los obtenidos de la expresión [3], para cada estado de trefilado.

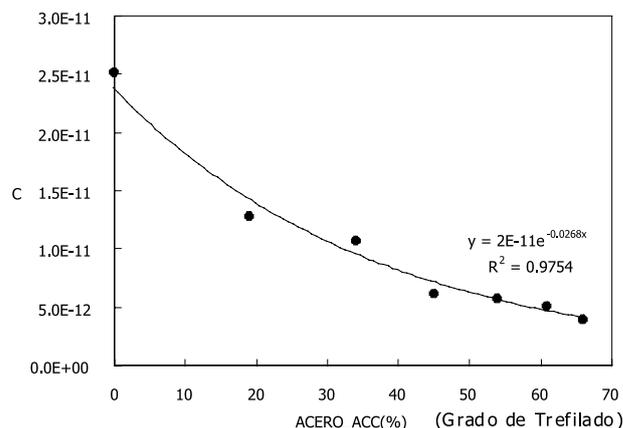


Fig. 7. Evolución del coeficiente C de Paris con el grado de trefilado.

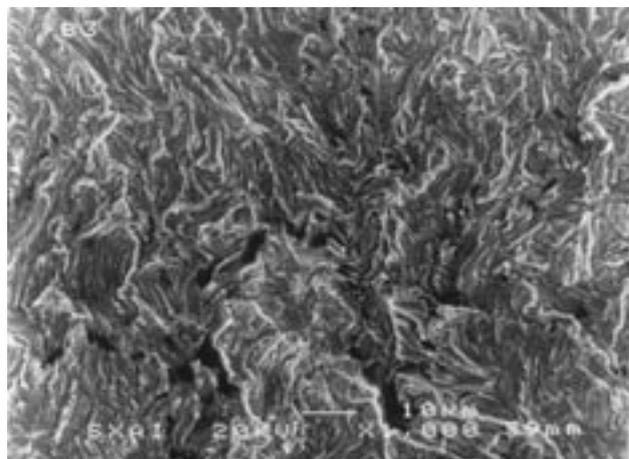


Fig. 8. Imagen de superficie de fractura por fatiga en acero perlítico (X 1000).

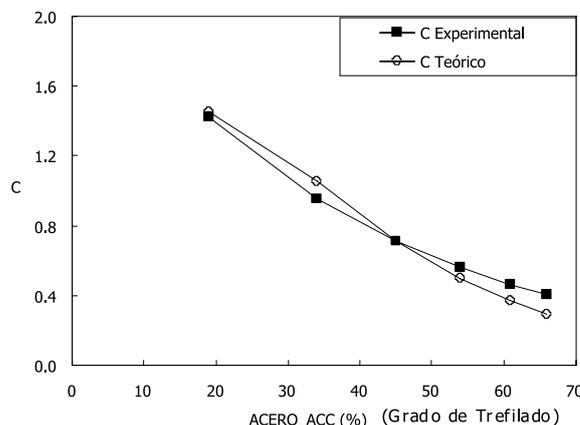


Fig. 9. Comparación entre datos experimentales y teóricos para el valor de C.

5. CONCLUSIONES

Con independencia de la anisotropía de origen microestructural producida por el trefilado, la propagación de fisuras por fatiga se produce en modo I, en un plano normal al de la tensión aplicada.

Los cambios microestructurales inducidos en el proceso de trefilado tienen un efecto muy significativo en el crecimiento estable de fisuras de fatiga, afectando al parámetro de proporcionalidad C de la Ley de Paris.

El proceso de trefilado mejora el comportamiento en fatiga del material, disminuyendo la velocidad de propagación de fisuras y aumentando por consiguiente la vida útil de la estructura.

Se postula la existencia de una relación lineal entre el parámetro C de la ley de Paris, relativo a la propagación de fisuras de fatiga, y el ángulo, parámetro de la microestructura, que caracteriza la orientación progresiva de la colonia de perlita con el trefilado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a EMESA TREFILERÍA S.A. (Grupo Aceralia), por el suministro del acero utilizado en el programa experimental.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. M. Elices, J. Llorca, y M.A. Astiz. «Fatigue of steels for concrete reinforcement and cables», pp. 191-220 en *Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures*, (Ed. Carpinteri), Elsevier Science B.V. (1994).
2. J. Toribio y M. Toledano. «A fracture criterion for prestressing steel cracked wires», pp. 947-954 en *Advances in Steel Structures, Vol. 2, Second International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'99)*, Hong Kong (China).
3. J.D. Embury y R.M. Fisher. «The structure and properties of drawn pearlite». *Acta Metall.* 14, pp.147-159, (1966).
4. W.J. Nam y C.M. Bae. «Void initiation and microstructural changes during wire drawing of pearlitic steels» *Mater. Sci. and Engin. A*, 203: 1-2, pp. 278-285, (1995).
5. J. Toribio, E. Ovejero y M. Toledano. «Effect of microstructure on anisotropic fracture behaviour of heavily drawn steel», *CSME Forum Vol. 2: The Mechanics of Solids and Structures Materials Technology*, pp. 145-148, (1998) Toronto (Canadá).
6. A. Valiente. «Criterios de fractura para alambres». Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (1980).
7. T.V. Duggan y M.W. Proctor «The measurement of crack length and shape during fracture and fatigue», *Engineering Materials Advisory Services (EMAS)*, pp. 1-7, Cradlwey Heath, Warley, East Midlands, U.K. 1980.
8. J. Toribio y M. Toledano. «Anisotropic fracture behaviour of eutectoid steels with different degrees of drawing». *Fracture from Defects/ECF12*, pp. 685-690. EMAS, West Midland, U.K (1998).
9. J.M. Hyzack y I.M. Bernstein. «The role of microstructure on the strength and toughness of fully pearlitic steels». *Metall. Trans.*, A7, pp.1217-1224 (1976).
10. J.Languillame, G. Kapelski y B. Baudalet, «Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires», *Acta Materiala*, 45:3, pp. 1201-1212 (1997).

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

