

# Corrosión bajo tensión de aceros eutectoides con trefilado progresivo

E. Ovejero<sup>(\*)</sup> y J. Toribio<sup>(\*)</sup>

**Resumen** Se estudian las consecuencias de la evolución microestructural en un acero eutectoide que ha sufrido un proceso de trefilado progresivo. Esta técnica de fabricación origina una serie de cambios en la microestructura del acero: una orientación progresiva y un estiramiento de las colonias de perlita y una orientación y densificación de las láminas de perlita, reduciendo así el espaciado interlamelar. Por otra parte, los resultados experimentales de los ensayos de corrosión bajo tensión demuestran que el trefilado produce anisotropía resistente en el acero, y así la resistencia a la corrosión bajo tensión es una propiedad direccional que parece depender de la orientación de la microestructura con respecto a la dirección del trefilado. Como consecuencia, una fisura transversal tiende a cambiar su dirección de propagación para aproximarse a la del eje del alambre, y un crecimiento en modo I evoluciona hacia una propagación en modo mixto.

Palabras clave: **Corrosión bajo tensión. Aceros perlíticos. Trefilado progresivo. Anisotropía.**

## Stress corrosion cracking of eutectoid steels with progressive cold drawing

**Abstract** The consequences of the microstructural evolution in an eutectoid steel that has undergone a cold drawing process are studied. This manufacturing technique produces changes in the steel microstructure: a progressive orientation and slenderising of the pearlite colonies and an orientation and packing of the pearlite lamellae, thus reducing the interlamellar spacing. In addition, the experimental results of the stress corrosion cracking tests show that cold drawing produces resistant anisotropy in the steel and thus the stress corrosion cracking resistance is a directional property which seems to depend on the orientation of the microstructure in relation to the cold drawing direction. As a consequence, a transversal crack tends to change its propagation direction approaching the wire axis and a crack growth in mode I evolves to a mixed mode propagation.

Keywords: **Stress corrosion cracking. Pearlitic steels. Progressive cold drawing. Anisotropy.**

## 1. INTRODUCCIÓN

El acero de pretensado es un material ampliamente utilizado para el hormigón pretensado, donde es necesario el uso de aceros de elevado límite elástico que se consiguen mediante trefilado. Sin embargo, estos aceros suelen trabajar en ambientes agresivos donde se pueden desarrollar procesos de corrosión bajo tensión que incrementan el riesgo de rotura catastrófica.

En trabajos previos (1-3), se ha estudiado la fractura de este tipo de aceros en ambientes agresivos (en condiciones de corrosión bajo tensión o fragilización por hidrógeno), encontrando un compor-

tamiento anisótropo en el acero de pretensado fuertemente trefilado, con cambios en la dirección de fisuración pasando de crecimiento en modo I a propagación en modo mixto. En este artículo, se profundiza en esta línea de investigación, estudiando las etapas intermedias del proceso de trefilado, con objeto de determinar en qué momento comienza el comportamiento anisótropo asociado con la propagación en modo mixto, y relacionarlo con los cambios microestructurales operados en el acero en función del *grado de trefilado* alcanzado durante la fabricación.

## 2. MATERIALES Y MICROESTRUCTURA

Los materiales usados en este estudio han sido aceros de alta resistencia provenientes de un proce-

(\*) Dpto. de Ciencia de Materiales, Univ. de La Coruña. E.T.S.I. Caminos, Campus de Elviña, 15192-La Coruña (España).

TABLA I.– Composición química, % en masa

TABLE I.– Chemical composition, mass %

C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	V
0,80	0,69	0,23	0,012	0,009	0,004	0,265	0,060

TABLA II.– Reducción de diámetro para cada acero

TABLE II.– Diameter reduction for each steel

Acero	0	1	2	3	4	5	6
<i>D</i> (mm)	12,00	10,80	9,75	8,90	8,15	7,50	7,00
<i>D</i> / <i>D</i> <sub>0</sub>	1	0,90	0,81	0,74	0,68	0,62	0,58

so de trefilado real. Los alambres, con distinto grado de trefilado, se obtuvieron deteniendo el proceso y extrayendo muestras en distintos puntos de la cadena de fabricación. Los distintos aceros se han nombrado con subíndices del 0 al 6, que indican el número de pasos de trefilado que han sufrido. Así, el acero 0 es el producto inicial, que no ha sufrido ningún paso de trefilado, y el acero 6 representa el producto final que ha sufrido 6 etapas de trefilado con reducción progresiva de diámetro. En la tabla I se da la composición química, lógicamente la misma para todos los aceros, y en la tabla II se recogen los diámetros sucesivos a lo largo del proceso de fabricación.

La evolución microestructural de los aceros con el trefilado se ha estudiado en trabajos anteriores (4 y 5), concluyéndose que dicha técnica de fabricación origina una serie de cambios en la microestructura del acero, consistentes en una orientación progresiva y un estiramiento de las colonias de perlita (4) y una orientación y densificación de las láminas de perlita, reduciendo así el espaciado interlaminar (5). En ambos casos, la orientación se produce mediante alineación progresiva con la dirección de trefilado o eje del alambre.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Con el fin de relacionar los resultados anteriores (4 y 5) con el comportamiento en corrosión bajo tensión, se realizaron ensayos de fractura en ambiente agresivo a velocidad de deformación constante, utilizando muestras cilíndricas prefisuradas. La preparación de las muestras para los ensayos de corrosión bajo tensión se realizó mediante fisuración por fatiga de los alambres para producir una fisura transversal. La prefisuración se realizó en una máquina servohidráulica de ensayos mecánicos, de forma que el máximo factor de intensidad de ten-

siones durante la última etapa de fisuración fue  $K_{max} = 0,30 K_{IC}$ , donde  $K_{IC}$  es la tenacidad de fractura del material, y la profundidad de fisura fue  $a = 0,30 D$  en todos los casos, donde  $D$  es el diámetro del alambre. Después de la fase de prefisuración, las probetas se introdujeron en una célula electroquímica, cuyo esquema se representa en la figura 1. El potencial de trabajo fue  $E = -600$  mV ECS, para el cual se ha demostrado (1 y 2) que se produce alta susceptibilidad a la disolución anódica localizada.

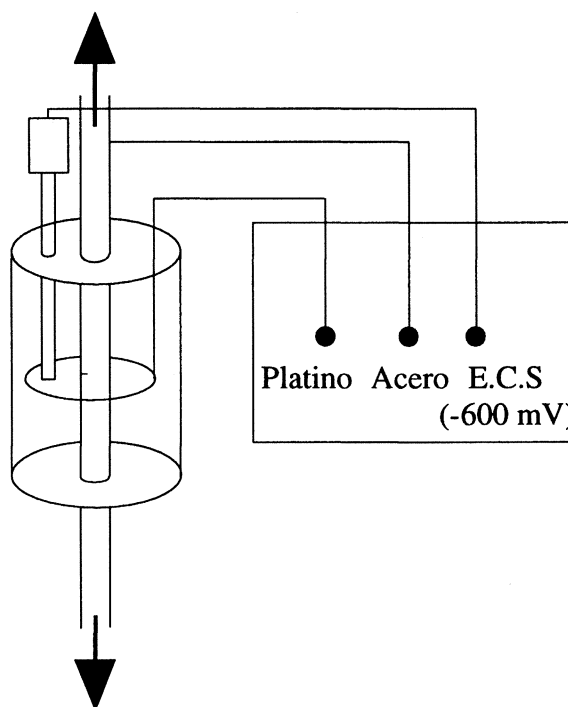


FIG. 1.— Célula electroquímica usada en los ensayos de corrosión bajo tensión.

FIG. 1.— Electrochemical cell used for the stress corrosion cracking testing.

TABLA III.— Velocidades aplicadas en los ensayos de corrosión bajo tensión

TABLE III.— Crosshead speeds applied in the stress corrosion cracking tests

D (mm)	12,0	10,80	9,75	8,90	8,15	7,50	7,00
Velocidad de la cruceta ( $\times 10^{-3}$ mm/min)	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,9	1,7

Como medio agresivo, se utilizó una disolución acuosa de 1 g/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con 0,1 g/L de HCl con pH 12,5, que reproduce las condiciones alcalinas de trabajo de un acero de pretensado cuando se encuentra en servicio rodeado de hormigón. Los ensayos de corrosión bajo tensión se realizaron a velocidad de sollicitación constante, y la velocidad de la cruceta se eligió en proporción al diámetro del alambre (Tabla III).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los resultados experimentales cabe resaltar un hecho fundamental: el comportamiento en corrosión bajo tensión de los aceros se va haciendo más anisótropo a medida que el grado de trefilado aumenta, y así una fisura transversal tiende a cambiar su dirección de propagación para aproximarse a la del eje del alambre y, por tanto, un crecimiento en modo I evoluciona hacia una propagación en modo mixto. De lo anterior cabe deducir que la susodicha orientación microestructural influye claramente sobre el comportamiento macroscópico de los aceros y, por tanto, la resistencia a la corrosión bajo ten-

sión es una propiedad direccional que depende de la orientación de la microestructura con respecto a la dirección del trefilado (*anisotropía resistente* frente a la corrosión bajo tensión).

El comportamiento anisótropo descrito puede evaluarse a través del *perfil de fractura* (topografía de la superficie de fractura). Para un acero genérico con determinado grado de trefilado, el perfil macroscópico de fractura presenta tres zonas características, tal como se muestra en la figura 2. Tras la fisura de fatiga, se produce una primera propagación en su propio plano (modo I) sobre una distancia  $x_I$ ; a continuación, la fisura cambia su dirección y se produce en modo mixto en una profundidad (medida en proyección horizontal)  $x_{II}$ ; por último, vuelve a retomar el plano original hasta la fractura. Los parámetros geométricos fundamentales son las distancias de propagación en modo I y modo mixto ( $x_I$  y  $x_{II}$ ) y la altura  $h$  y el ángulo  $\theta$  del escalón. La figura 3 ofrece un esquema de los perfiles de fractura para los diferentes grados de trefilado, y la tabla IV sus características geométricas.

En las primeras etapas de trefilado, representadas por los aceros 0 y 2 (el acero 1 se encuentra aún en fase experimental), no hay cambio en la dirección de propagación. A partir del acero 3, el perfil de fractura es distinto, pudiéndose distinguir los tres tramos ejemplificados en la figura 2. La diferencia entre estas etapas, en cuanto a la topografía, reside en que, a medida que aumenta el grado de trefilado, la distancia de propagación en modo I es cada vez menor, el cambio en la dirección de propagación se produce antes, con ángulos  $\theta$  y alturas  $h$  cada vez mayores respecto al plano de fisuración inicial, y aproximándose, de este modo, la dirección de propagación al eje longitudinal de alambre.

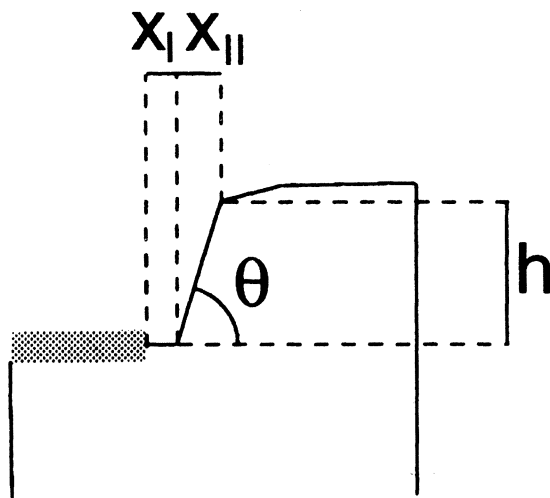


FIG. 2.— Esquema de los parámetros geométricos medidos sobre la superficie de fractura.

FIG. 2.— Scheme of the geometric parameters measured on the fracture surface.

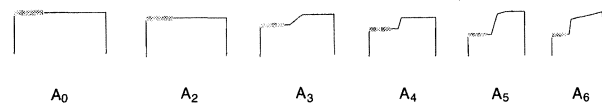


FIG. 3.— Evolución de los perfiles de las superficies macroscópicas de fractura.

FIG. 3.— Evolution of the macroscopical fracture surfaces.

TABLA IV.— Características de la superficie de fractura

TABLE IV.— Characteristics of the fracture surfaces

Acero	$D_i/D_0$	$x_I$ (mm)	$x_{II}$ (mm)	$h$ (mm)	$\theta$ (°)
0	1,00	—	—	—	0,0
1	0,90	—	—	—	—
2	0,81	—	—	—	0,0
3	0,74	0,816*	1,150*	0,6*	27,5*
4	0,68	1,052	1,400	1,5	47,0
5	0,62	0,720	1,270	2,2	60,0
6	0,58	0,185	→ 0	3,0	90,0

\* Enayo único

La explicación de este comportamiento macroscópico radica en la microestructura del material. En efecto, en la figura 4 se ofrecen las gráficas de variación de los ángulos de orientación de los niveles microestructurales (4 y 5) en las figuras 4a y 4b, y la de variación del ángulo macroscópico en la figura 4c. Esta última también muestra la evolución de la distancia de propagación en modo I y de la altura del escalón. De la observación de las tres figuras, se deduce que la progresiva orientación de los dos niveles microestructurales básicos (colonias y láminas de perlita) influye claramente en el ángulo y altura del escalón de fractura, creciente con el grado de trefilado, y en la distancia de propagación en modo I (decreciente con el mismo). Este cambio en la dirección se puede tomar como la señal de inicio del comportamiento anisótropo de estos materiales: a partir de un grado de trefilado las fisuras encuentran direcciones de propagación más favorables. La anisotropía en fractura no se hace evidente hasta una cierta etapa de trefilado (acero 3), y lo mismo ocurre con la variación del ángulo de orientación de las láminas y colonias, lo que hace suponer que los dos fenómenos están relacionados, y que el comportamiento en fractura es consecuencia, al menos en parte, de estos cambios microestructurales.

**CONCLUSIONES**

- En aceros eutectoides, los cambios microestructurales originados por el proceso de trefilado afectan al comportamiento frente a fenómenos de corrosión bajo tensión.
- La propagación de la fisura cambia de modo I, en las primeras fases del proceso de trefilado, a modo mixto en etapas posteriores (comportamiento anisótropo).
- Al aumentar el grado de trefilado, la distancia de propagación en modo I disminuye, mientras

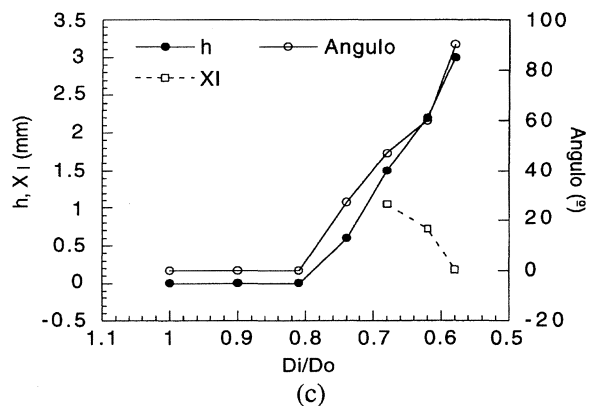
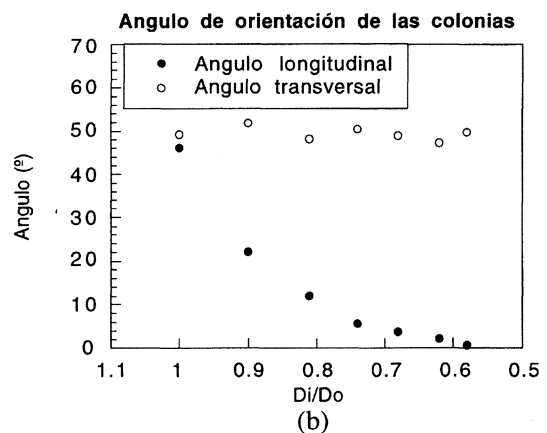
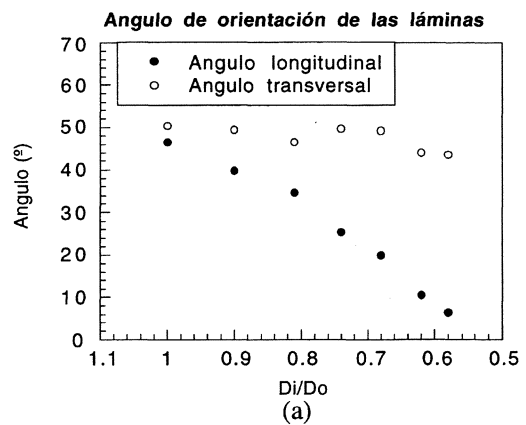


FIG. 4.— a) Variación de los ángulos de orientación de las láminas. b) Variación de los ángulos de orientación de las colonias. c) Variación del ángulo de propagación de la fisura, distancia de propagación en modo I y altura del escalón de la fractura.

FIG. 4.— a) Variation of the orientation angles of the lamellae, b) Variation of the orientation angle of the colonies, c) Variation of the propagation angle of the crack, propagation length in mode I and fracture step height.

que la altura y el ángulo del escalón de fractura aumentan.

### Agradecimiento

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 de acero.

### REFERENCIAS

- (1) PARKINS, R.N., ELICES, M., SANCHEZ-GALVEZ, V. y CABALLERO, L. *Corros. Sci.*, 22, 1982: 379-405.
- (2) LANCHÁ, A.M. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid, 1987.
- (3) TORIBIO, J. y LANCHÁ, A.M. *J. Mater. Sci.*, 31, 1996: 6.015-6.024.
- (4) TORIBIO, J. y OVEJERO, E. *Mater. Sci. Engng.*, A234-236, 1997: 579-582.
- (5) TORIBIO, J. y OVEJERO, E. *Mech. Time Dependent Mater.* (Pendiente de publicación).