

ESTUDIO CINEMATICO DE LA FRAGILIZACION POR HIDROGENO
EN ALAMBRES ENTALLADOS

J. TORIBIO Y M. ELICES

Departamento de Física y Física de Materiales
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID
ESPAÑA

RESUMEN

Se presenta un criterio de fractura en ambiente de hidrógeno para alambres entallados. Consiste en una generalización, a partir de consideraciones cinemáticas, del criterio basado en la tensión efectiva o equivalente de Von Mises.

El trabajo incluye ensayos de fractura en ambiente de hidrógeno sobre probetas entalladas de geometría variable, así como el estudio fractográfico de las superficies de rotura mediante microscopía electrónica de barrido. El análisis elasto-plástico utilizando elementos finitos permite conocer en todo instante la relación entre las velocidades de deformación local y remota, así como el estado tenso-deformacional en rotura.

Los resultados obtenidos demuestran que el criterio de la tensión efectiva es generalizable a la fractura en ambiente de hidrógeno. En este caso el parámetro de fractura (característico del material) depende también de la velocidad de deformación local en el fondo de la entalla.

ABSTRACT

A notched wire fracture criterion in hydrogen environment has been obtained. It is a generalization, made from kinematic assumptions, of the criterion based on Von Mises effective stress.

The work includes fracture tests in hydrogen environment with notched wire of changing geometry, and a fractographic study of fracture surfaces through scanning electronic microscope. The elastoplastic analysis using finite element allows to obtain the relation between the local and remote strain rate, and also the strain and stress state in fracture.

The results show that the effective stress criterion is suitable in hydrogen environment. In this case the fracture critic parameter (a characteristic of the material) also depends on local strain rate in the notch tip.

1. INTRODUCCION

El objetivo del trabajo es el establecimiento de un criterio de fractura en ambiente agresivo (hidrógeno) para aceros de alta resistencia ante la presencia de entallas. Se adoptará el criterio de la tensión efectiva, ya obtenido en ambiente inerte [1] , [2], como punto de partida, y se expresará el parámetro crítico de fractura del material en función de las variables cinemáticas locales (*formulación cinemática*). Son estas variables las que controlan la cantidad de hidrógeno que penetra en el material, y su consiguiente efecto fragilizador.

La investigación es de gran interés, pues el estudio experimental de los procesos de corrosión bajo tensión se realiza frecuentemente sobre probetas entalladas, que se ensayan en ambiente agresivo a velocidad de deformación constante [3]. Esta velocidad se establece empíricamente en cada caso, y es deseable disponer de criterios que relacionen los parámetros mecánicos del ensayo con la difusión del hidrógeno en la probeta.

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1 Material, geometría y sollicitación

La investigación se centra en un acero eutectoide, ferrítico-perlítico, obtenido por laminación en tren continuo. La curva tensión-deformación del acero se da en la Fig. 1, en la que también se ofrece la modelización por Ramberg-Osgood:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{199000} + \left(\frac{\sigma}{2100}\right)^{4.9} \quad ; \quad \sigma \text{ en MPa} \quad (1)$$

La geometría analizada consiste en un cilindro recto de base circular con una entalla coaxial (Fig. 2). Debido a la simetría cilíndrica del problema únicamente es necesario analizar la sección de la Fig. 3. Se han adoptado cuatro geometrías que cubren todo el espectro de formas. Sus dimensiones son:

Geometría	R/D	C/D
A	0.034	0.099
B	0.047	0.391
C	0.364	0.093
D	0.400	0.396

La sollicitación es de tracción, con desplazamientos impuestos

en los extremos de la probeta.

2.2 Condiciones electroquímicas

Las condiciones electroquímicas adoptadas en todos los ensayos son:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 12.5 \\ E &= -1200 \text{ mV (E.C.S.)} \end{aligned}$$

que corresponden al dominio de inmunidad del diagrama de Pourbaix para el hierro en presencia de agua, por debajo de la línea de descarga del hidrógeno. La acción del entorno sobre la muestra es entonces únicamente una fragilización. Se descarta la disolución de material, propia de potenciales anódicos. El potencial elegido, catódico, es el que produce mayor efecto fragilizador en el metal [4], [5]. Las condiciones de pH son las que se han medido en las armaduras de acero en contacto con el hormigón [6], [7].

3. ENSAYOS DE FRACTURA EN AMBIENTE AGRESIVO

El esquema de montaje aparece en la Fig. 4. El potencial constante de -1200 mV E.C.S. se ha impuesto mediante un potenciostato, al que se conectan los tres electrodos: el de trabajo (probeta), el de referencia (E.C.S.) y el contraelectrodo de platino. A fin de localizar la penetración de hidrógeno se cubrió con laca anticorrosiva toda la superficie de la muestra a excepción de la entalla.

Los ensayos se han realizado con distintas velocidades de sollicitación. Se han llevado a cabo 26 ensayos en total. Los resultados se muestran en la Fig. 5. Se representa en el eje horizontal el tiempo hasta rotura (duración del ensayo) en escala logarítmica, y en el eje vertical el cociente entre la carga de rotura en aire F_c y la carga de rotura en ambiente agresivo F_{cc} . Aquella se obtuvo realizando, para cada geometría, dos ensayos de fractura en aire [1], [2].

Un primer análisis cualitativo de los resultados experimentales permite ya enunciar las consideraciones siguientes:

- Aún en ensayos muy breves el efecto fragilizador del hidrógeno es importante (apreciable reducción de la carga de rotura).
- En ambiente agresivo sobreviene siempre la rotura en plena rama ascendente de carga. Como consecuencia, la geometría D muestra una partida importante de ductilidad respecto al ensayo de ambiente inerte.
- Para velocidades de ensayo muy lentas (ensayo cuasi-estático) la carga de rotura tiende a un valor asintótico.

4. ANALISIS FRACTOGRAFICO

En los ensayos en ambiente de hidrógeno aparece un modo microscópico de fractura no tradicional, que se ha dado en llamar TTS (*tearing topography surface*) ([8], [9]). En la presente investigación se ha interpretado como zona crítica o zona de fractura. Se ha comprobado que al disminuir la velocidad de deformación aumenta la profundidad de la zona TTS (Fig. 10).

La Fig. 6 muestra los *modos de fractura macroscópicos* (lugar de iniciación y forma de la rotura) y *microscópicos* (mecanismo de fractura, a partir de la topografía observada al microscopio electrónico). La superficie de fractura en ambiente agresivo está constituida, en todos los casos, por una pequeña zona TTS (a veces microscópica) y una gran región de cuasi-clivaje. En la primera se inicia la rotura, mientras que en la segunda se produce la propagación brusca con carácter frágil.

Los ensayos de fractura en ambiente agresivo presentan tres características diferenciadas respecto a los realizados en ambiente inerte [1], [2]:

- Fractura plana e iniciada en la periferia en todos los casos.
- Desaparición casi total del mecanismo de coalescencia de huecos, sustituido por un mecanismo de cuasi-clivaje.

5. ESTUDIO DE LA DIFUSION

La difusión del hidrógeno en el metal está gobernada por las Leyes de Fick, modificadas para incluir un término dependiente de la tensión hidrostática [10], [11]:

$$J = - D^* \text{grad } c + M c \text{ grad } \sigma \quad (2)$$

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D^* \Delta c - M \text{ grad } c \cdot \text{grad } \sigma - M c \Delta \sigma \quad (3)$$

donde σ es la tensión hidrostática ($\sigma = \text{tr } \sigma/3$), D^* el coeficiente de difusión y M un segundo coeficiente función del anterior:

$$M = \frac{D^* V^*}{RT} \quad (4)$$

siendo V^* el volumen parcial molar de hidrógeno, R la constante de los gases perfectos y T la temperatura absoluta.

La concentración de equilibrio del hidrógeno dentro del metal es la solución estacionaria de la ecuación diferencial anterior:

$$c = c_0 \exp\left(\frac{V^*\sigma}{RT}\right) \quad (5)$$

donde c_0 es la concentración de equilibrio en ausencia de tensión. La concentración de hidrógeno en el caso estacionario (5) es función unívoca de la tensión hidrostática. En ensayos cuasi-estáticos (suficientemente lentos) la situación se aproxima a la estacionaria. En este caso, el punto crítico (máxima concentración de hidrógeno) coincide con el punto de tensión hidrostática máxima, a partir del cual se inicia la fractura.

6. ANÁLISIS TENSIONAL

Para conocer los valores de las variables internas en la situación de fractura se han modelizado, mediante el método de los elementos finitos en régimen elasto-plástico, los ensayos de fractura en ambiente agresivo. Con el fin de no modelizar cada uno de los 26 ensayos se han agrupado éstos por tipos, a partir de los resultados expuestos en la Fig. 5. Cada tipo de ensayo se representa con la letra correspondiente a su geometría y con un subíndice igual a $100 F_{cc}/F_c$, cien veces el cociente entre carga de rotura en ambiente agresivo y carga de rotura en aire.

Los resultados del cálculo se ofrecen en la Fig. 11, y se analizarán en la sección 8 (formulación del criterio de fractura), donde se ofrece la relación adimensional entre la tensión efectiva crítica en ambiente inerte y la misma en ambiente agresivo.

Del cálculo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La profundidad x_s del punto en el cual la tensión hidrostática es máxima, fundamental en la difusión de hidrógeno y por tanto en el proceso fragilizador, es una característica de la geometría: permanece constante a lo largo del proceso de carga. (Fig. 7).
- La profundidad de la zona TTS asintótica coincide con la del punto de tensión hidrostática máxima. Se entiende por zona TTS asintótica la que se obtiene de ensayos cuasi-estáticos, en los que la velocidad de sollicitación es lo suficientemente reducida como para conseguir en todo momento la concentración de equilibrio en cada punto (5).

La Fig. 8 muestra la zona TTS (de profundidad x_T), la distribución de tensión hidrostática σ y el punto de tensión hidrostática máxima (de profundidad x_s). En la Fig. 10 se representa el tamaño de la zona TTS en función de la duración del ensayo (geometrías A y C). La recta horizontal señala gráficamente la profundidad x_s .

- Las consideraciones anteriores confirman que la difusión es el mecanismo fundamental de transporte de hidrógeno dentro del metal. En efecto, la zona TTS es la zona dañada por el hidrógeno y su profundidad está condicionada por la distribución de tensión hidrostática, que gobierna el fenómeno de difusión según las Leyes de Fick modificadas [2] y [3].

7. ESTUDIO CINEMATICO DE LA TRACCION SOBRE UN ALAMBRE ENTALLADO

La formulación cinemática del criterio de fractura en ambiente agresivo requiere conocer la velocidad de deformación en el fondo de la entalla (local), puesto que el efecto fragilizador del hidrógeno, y por tanto su influencia en el parámetro crítico del material, depende de esa velocidad de sollicitación. Se hace necesario entonces relacionar las velocidades de deformación local y remota.

Esta relación ha sido obtenida en investigaciones anteriores [1]. Los resultados generales se dan en la Fig. 9, en la cual la velocidad de deformación local es:

$$\dot{\epsilon}_B = \frac{\dot{u}_B}{B} = \frac{u_B^{i+1} - u_B^i}{B\Delta t} \quad (6)$$

donde B es la base de medida local (se adopta $B=0.01 D$), u_B el corrimiento relativo entre sus extremos, los superíndices (i, i+1) dos escalones de carga consecutivos separados por un intervalo temporal Δt .

Se ha definido la velocidad de deformación remota mediante:

$$\dot{\epsilon}_L^* = \frac{\dot{u}_L}{D} = \frac{u_L^{i+1} - u_L^i}{D\Delta t} \quad (7)$$

donde L es la base de medida remota, u_L el corrimiento relativo entre sus extremos y D el diámetro de la probeta (dimensión característica).

8. FORMULACION DEL CRITERIO DE FRACTURA

El criterio de fractura en ambiente agresivo será el obtenido en ambiente inerte [1], [2], donde ahora el parámetro crítico de fractura del material dependerá de la magnitud de la agresión del entorno: *la rotura se producirá cuando la tensión efectiva alcance un valor crítico sobre una distancia crítica, característica de la microestructura del material y dependiente de la cantidad de elemento agresivo (hidrógeno) que*

haya penetrado dentro del mismo. La zona crítica o de fractura es en ambiente agresivo la zona TTS.

Se formula matemáticamente mediante

$$(\bar{\sigma})_m = \bar{\sigma}_{cc} \quad \text{sobre } x_T \quad (8)$$

donde la primera es la tensión efectiva media en la región de fractura (zona TTS),

$$(\bar{\sigma})_m = \frac{1}{\pi(a^2 - r_T^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_T}^a \bar{\sigma}(r, 0) r \, dr \, d\theta \quad (9)$$

y, con un error inferior al 1%, a través de [1]:

$$(\bar{\sigma})_m \approx \bar{\sigma}(a - x_T/2, 0) \quad (10)$$

Los valores numéricos de $\bar{\sigma}(r, z)$ en la zona de fractura se obtienen del cálculo por elementos finitos. Se ha realizado una interpolación del tipo $C_1 r z + C_2 r + C_3 z + C_4$ en el elemento finito en el que se inicia la rotura, a partir de los valores de la tensión efectiva en los cuatro puntos de Gauss de ese elemento. Como la fractura se produce en el plano $z = 0$, basta conocer $\bar{\sigma}(r, 0)$, que con la interpolación adoptada es una función lineal $C_2 r + C_4$.

El objetivo de la formulación cinemática es obtener la tensión efectiva crítica $\bar{\sigma}_{cc}$ en función de la velocidad de deformación local en el fondo de la entalla $\dot{\epsilon}_B$, calculable a partir de los ábacos de la Fig. 9. En primera aproximación se sustituye esta variable, dependiente de la coordenada y del tiempo, por su valor medio espacial y temporal $(\dot{\epsilon}_B)_m^m$. Para relacionar $\bar{\sigma}_{cc}$ y $(\dot{\epsilon}_B)_m^m$ se utilizan los resultados de los ensayos en ambiente agresivo (Fig. 5), de los cuales se obtiene una relación:

$$F(F_{cc}, t_c, x_s) = 0 \quad (11)$$

entre la carga de rotura F_{cc} , la duración de ensayo t_c y la geometría. A partir de (11) se puede obtener la siguiente:

$$F(\bar{\sigma}_{cc}, \dot{\epsilon}_L^*, x_s) = 0 \quad (12)$$

entre la tensión efectiva crítica $\bar{\sigma}_{cc}$, la velocidad de deformación remota $\dot{\epsilon}_L^*$ y la profundidad del punto de tensión hidrostática máxima x_s . Estas variables están unívocamente ligadas, respectivamente, a la carga de rotura F_{cc} , la duración de ensayo t_c y la geometría (A, B, C, D). Las variables geométricas se han sustituido por una sola dimensión característica: la profundidad del punto de tensión hidrostática máxima, fundamental en difusión. La coherencia de esta hipótesis quedará patente al obtenerse una única curva universal para todas las geometrías.

Por otra parte se dispone de los resultados numéricos del estudio cinemático (Fig. 9), que permiten sustituir la velocidad de deformación remota por la local (variable realmente representativa). Se llega entonces a

$$F(\bar{\sigma}_{cc}, (\dot{\epsilon}_B)_m^m, x_s) = 0 \quad (13)$$

y adimensionalizando:

$$F\left(\frac{\bar{\sigma}_{cc}}{\sigma_c}, \frac{(\dot{\epsilon}_B)_m^m, x_s^2}{D^*}\right) = 0 \quad (14)$$

en la cual $\bar{\sigma}_{cc}$ es la tensión efectiva crítica en ambiente agresivo, σ_c la misma en ambiente inerte, $(\dot{\epsilon}_B)_m^m$ la velocidad de deformación local (media espacial y temporal), x_s la profundidad del punto de tensión hidrostática máxima (característica de la geometría) y D^* el coeficiente de difusión.

En la Fig. 11 se representan gráficamente ambas variables adimensionales. Debe resaltarse que cada punto es ya un promedio de varios ensayos (en total 26). El ajuste resulta excelente para todas las geometrías, sin que se observe tendencia específica en ninguna de ellas. Las dispersiones son siempre inferiores al 3% (eje vertical). La formulación cinemática del criterio de fractura resulta así totalmente coherente, y la geometría puede representarse por una única variable x_s a efectos de fragilización por hidrógeno.

Cabe resaltar además las siguientes conclusiones:

- La tensión efectiva es un parámetro de fractura también en ambiente agresivo. El criterio de fractura así obtenido incluye el criterio en ambiente inerte cuando la velocidad de deformación tiende a infinito o los coeficientes de difusión tienden a cero.
- La velocidad de deformación local es la variable que gobierna el fenómeno de fragilización.
- En ensayos a velocidad de sollicitación constante sobre probetas entalladas la velocidad de deformación local varía a lo largo del proceso de carga, pero sus promedios temporales resultan representativos.
- La Fig. 11 ofrece por primera vez resultados cuantitativos (expresados en velocidad de deformación local), y no puramente cualitativos (en velocidad de deformación remota) para ensayos en ambiente agresivo.

9. CONCLUSIONES

- 1) Se ha obtenido una **relación entre los modos de fractura macroscópicos**

(lugar de iniciación y forma de la rotura) y **microscópicos** (mecanismo de fractura, a partir de la topografía observada al microscopio electrónico). Como se aprecia en la Fig. 6, la rotura es siempre *periférica plana*. El mecanismo de fractura consiste en *cuasi-clivaje*, con zona TTS en su inicio.

- 2) **La zona TTS**, nuevo modo microscópico de fractura no tradicional, se ha **interpretado como zona crítica o zona de fractura en procesos de fragilización por hidrógeno**.
- 3) Se ha obtenido un **criterio de fractura en ambiente agresivo para alambres entallados de acero de alta resistencia**: *la rotura se producirá cuando la tensión efectiva o equivalente alcance un valor crítico sobre una distancia crítica. Los parámetros críticos del material dependen de la cantidad de elemento agresivo (hidrógeno) que haya penetrado. La zona crítica o de fractura es la zona TTS. La tensión efectiva crítica se ha relacionado con la velocidad de deformación local en el fondo de la entalla (formulación cinemática). El criterio en ambiente inerte resulta un caso particular cuando la velocidad de deformación tiende a infinito (ataque nulo).*

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica por la ayuda financiera prestada a través de la Subvención 0-511/84.

REFERENCIAS

- [1] TORIBIO, J. "Fractura elastoplástica de alambres entallados". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. (1987).
- [2] TORIBIO, J., ELICES, M. "Un criterio de fractura para alambres entallados". Primeras Jornadas Ibéricas de Fractura. (1987).
- [3] UGIANSKY, G.M., PAYER, J.H. "Stress corrosion cracking. The slow strain rate technique". ASTM STP665 (1979).
- [4] CABALLERO, L., "Corrosión bajo tensión en aceros eutectoides trefilados y en aceros hipoeutectoides, térmicamente tratados". Universidad Complutense. Madrid (1985).
- [5] LANCHÁ, A.M., ELICES, M. "Influencia en corrosión bajo tensión de la orientación de las colonias de perlita en un acero eutectoide". 6ª Asamblea del C.E.N.I.M. Madrid (1985).
- [6] ELICES, M. "Fracture of steels for reinforcing and prestressing concrete. Fracture Mechanics of concrete". (Edited by G.C. Sih).

Martinus Nijhoff Publishers, pp. 226-271 (1985).

- [7] PARKINS, R.N. et al. "Environment sensitive cracking pre-stressing steels". Corrosion Science, Vol. 22, n° 5, pp. 379-405 (1982).
- [8] THOMPSON, A.W, CHESNUTT, J.C. "Identification of a Fracture Mode: The Tearing Topography Surface". Met. Trans., Vol. 10A, pp. 1193-1196 (1979).
- [9] COSTA, J.E., THOMPSON, A.W, "Hydrogen Cracking in Nominally Pearlitic 1045 Steel". Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, pp. 1315-1318 (1982).
- [10] VAN LEEUWEN, "The kinetics of hydrogen embrittlement: a quantitative diffusion model". Eng, Fract. Mech., Vol. 6, pp. 141-161 (1974).
- [11] ASTIZ, M.A. "Hydrogen diffusion analysis in metals" (en vías de publicación). (1986).

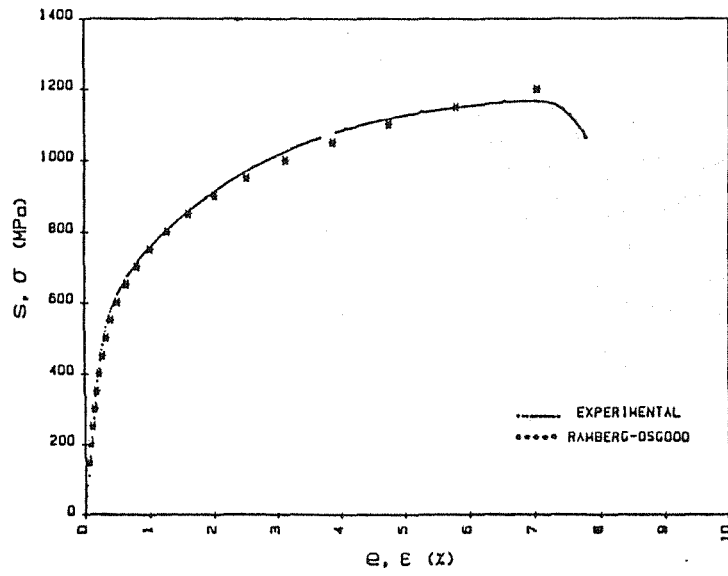


Fig. 1. Curva tensión-deformación del material

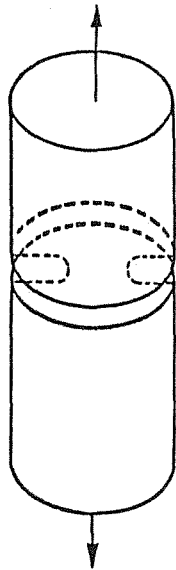


Fig. 2. Geometría

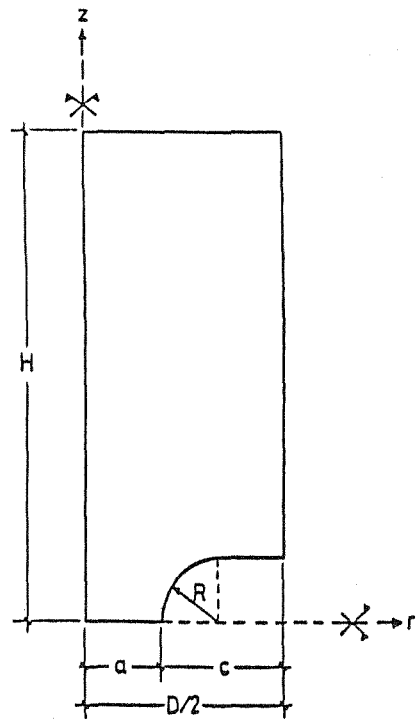


Fig. 3. Dimensiones

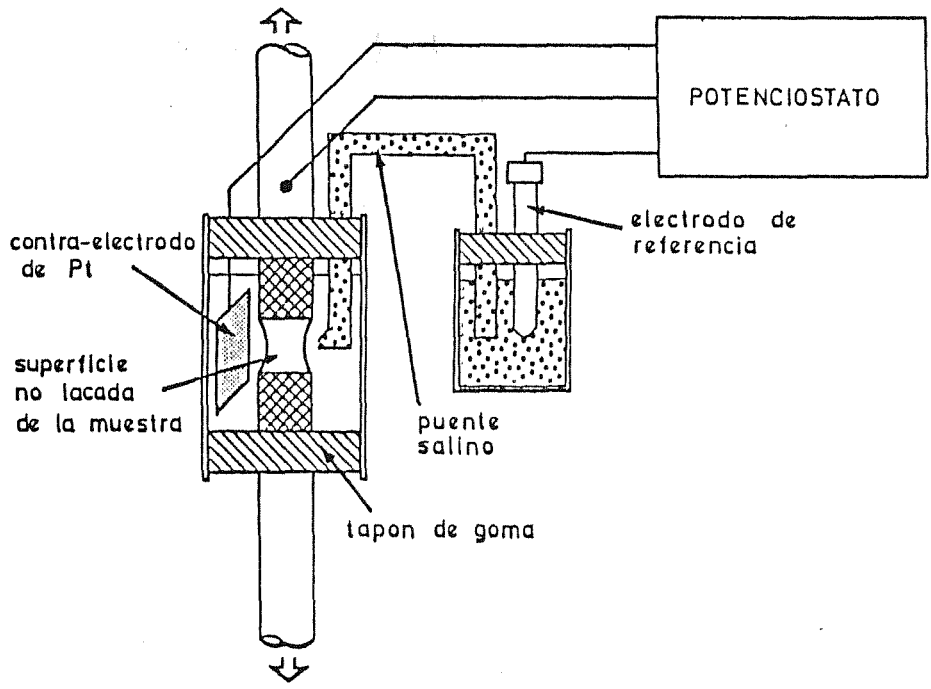


Fig. 4. Dispositivo experimental

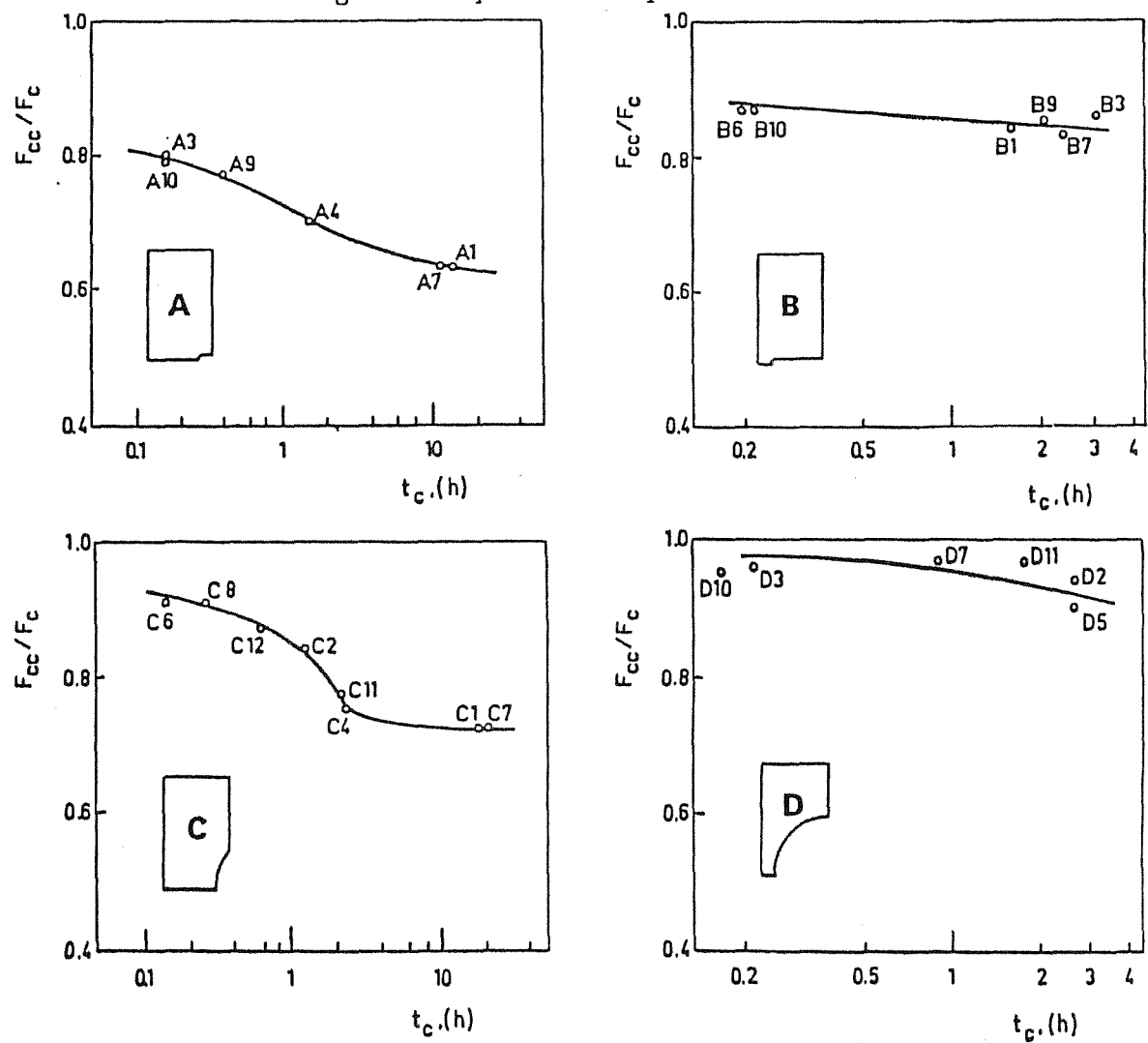
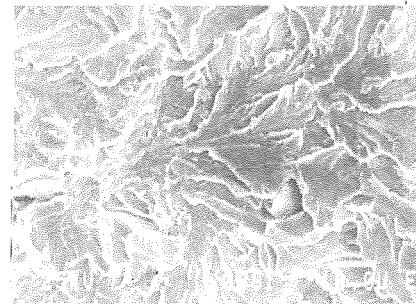
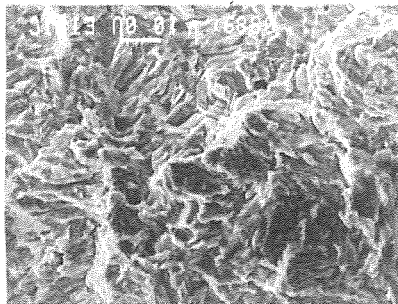
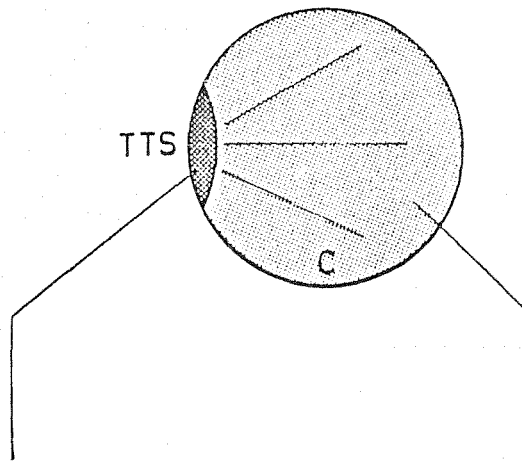
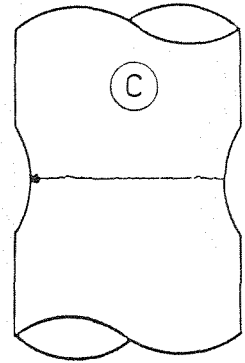
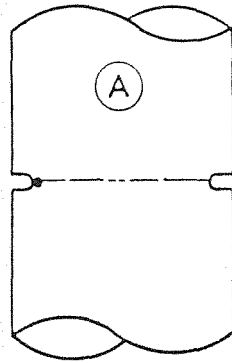


Fig. 5. Resultados de los ensayos de fractura



TTS \equiv Tearing Topography Surface C \equiv Cuasi-clivaje

Fig. 6. Superficies de fractura

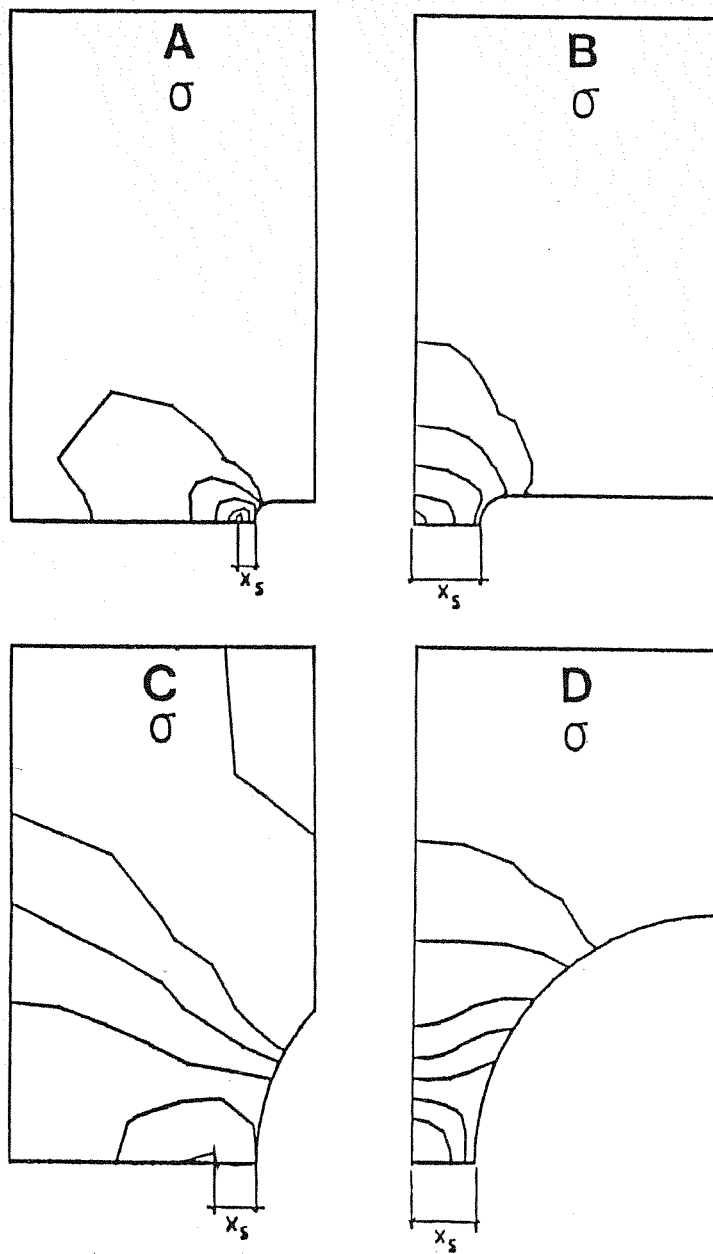


Fig. 7. Profundidad del punto de tensión hidrostática máxima

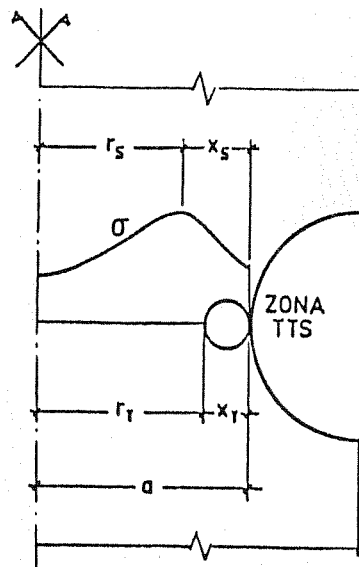


Fig. 8. Zona TTS y distribución de tensión hidrostática

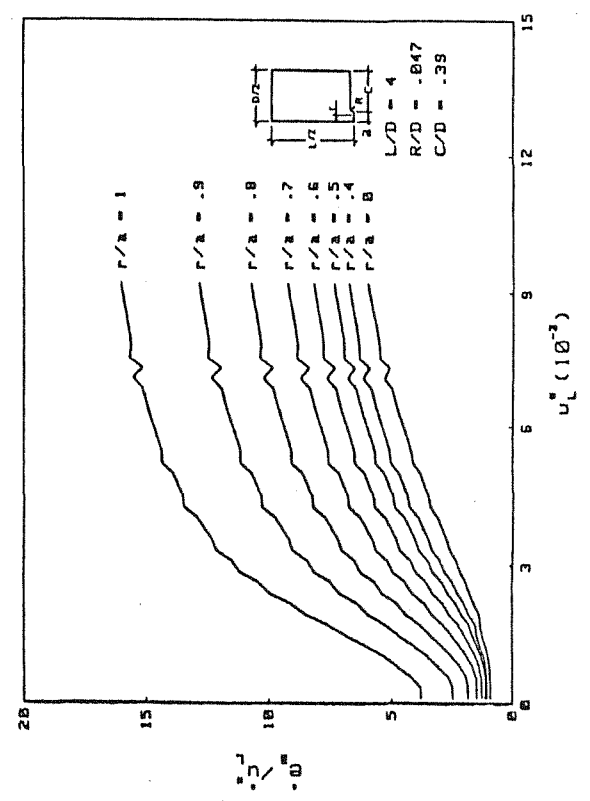
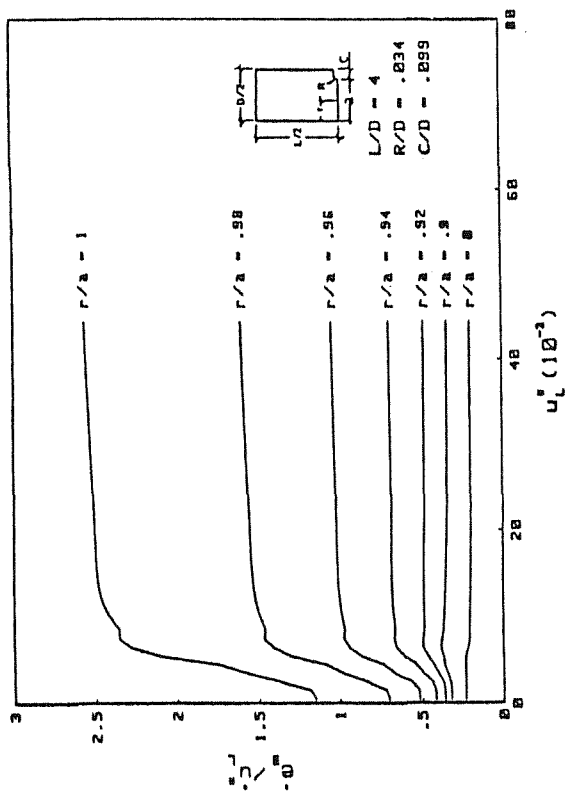
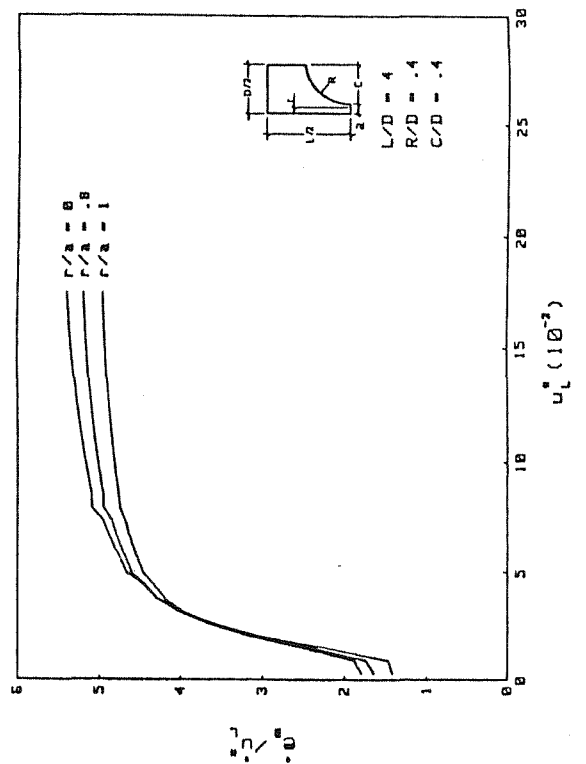
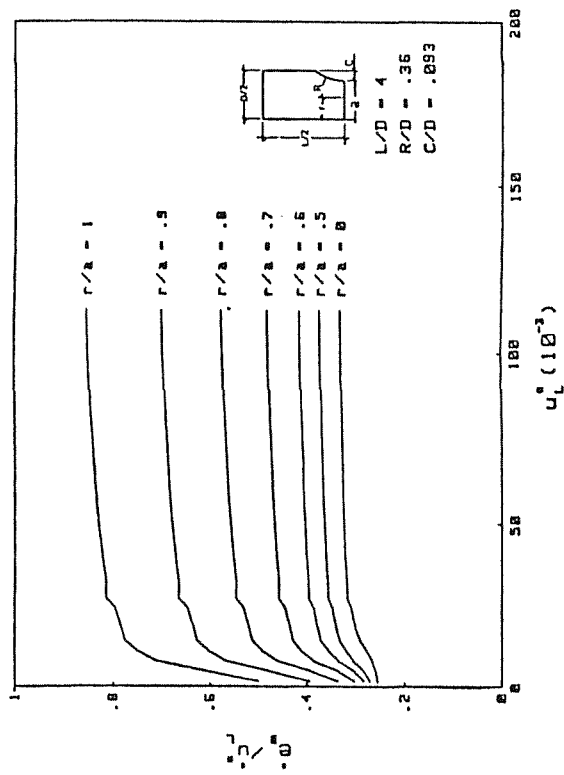


Fig. 9. Relación entre velocidades de deformación local y remota

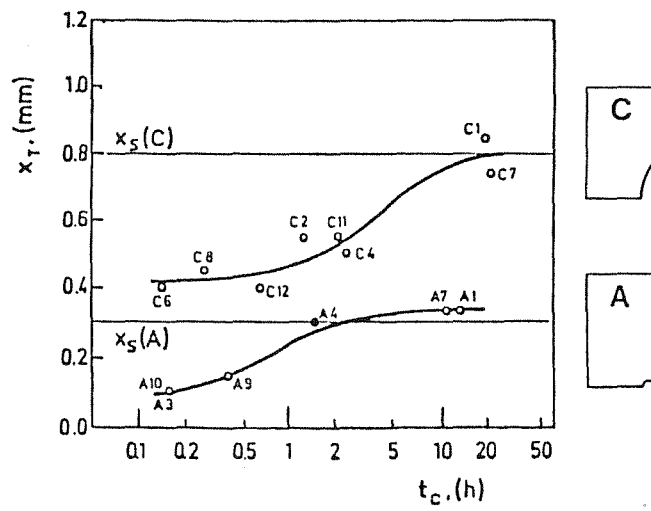


Fig. 10. Variación de la zona TTS con la velocidad de deformación

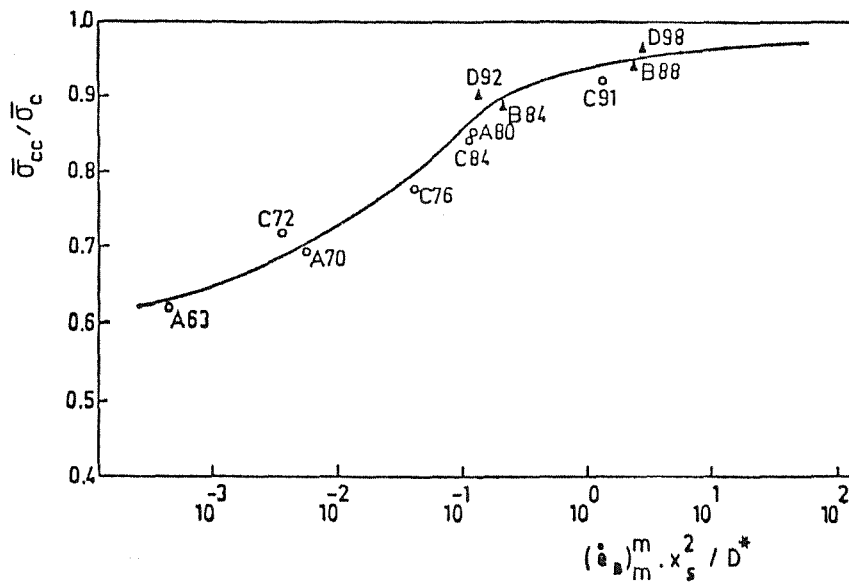


Fig. 11. Formulación cinemática del criterio de fractura