

EFECTO DE LA TRIAXIALIDAD SOBRE EL CRECIMIENTO DE HUECOS EN LAS PROXIMIDADES DE ENTALLAS

J. Toribio¹, E. Vasseur², E.R. Justo¹¹Departamento de Ciencia de Materiales (ULC)
ETSI Caminos, Campus de Elviña, 15192 La Coruña²Centre des Matériaux, Ecole des Mines de Paris
B.P. 87, 91003 Evry Cédex, FRANCIA

Resumen. Este trabajo analiza la influencia de la triaxialidad sobre el crecimiento de micro-huecos en las proximidades de entallas, por medio de ensayos de fractura sobre muestras prismáticas entalladas y ulterior análisis fractográfico mediante microscopía electrónica de barrido. La rotura se inicia siempre en una región fibrosa en las proximidades del fondo de la entalla en la cual el proceso de fractura tiene lugar por crecimiento y coalescencia de microhuecos (MVC), seguida por una región amplia en la cual la fractura se produce de manera inestable por clivaje (C). Aunque la tasa de crecimiento de micro-huecos es una función creciente de la triaxialidad tensional, parece existir un tamaño crítico de micro-hueco, y así la extensión máxima de la región MVC disminuye a medida que la triaxialidad aumenta; una vez que se alcanza el tamaño crítico —o máximo— de micro-hueco, la fractura inestable se produce por clivaje. Esta conclusión es válida sólo para valores globales (factor de triaxialidad para cada geometría), pero no para valores locales (triaxialidad en cada punto de la sección de fractura en una geometría dada).

Abstract. This work analyzes the influence of triaxiality on the growth of micro-voids in the vicinity of notches, by means of fracture tests on prismatic notched samples with different notch geometries and ulterior SEM fractographic analysis. Fracture always initiates in a *fibrous* or *dimpled* region in the vicinity of the notch tip in which the fracture process takes place by *micro-void coalescence* (MVC), followed by a broad region in which fracture occurs in unstable manner by *cleavage-like* (C). Although the rate of growth of holes is an increasing function of the stress triaxiality, a critical size of micro-void seems to exist, and thus the maximum extension of the MVC region decreases as the triaxiality increases; once the critical —or maximum— size of void is achieved, then unstable fracture takes place by cleavage. This conclusion is valid only for global levels (triaxiality factor for each geometry), but not for local values (stress triaxiality at each point of the fracture section in a given geometry).

1. INTRODUCCION

El estudio de los mecanismos de crecimiento de huecos en materiales 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 (cf. [1-3]), o en trabajos más recientes que desarrollan teorías de deformación plástica y fractura dúctil basadas en la nucleación y crecimiento de huecos [4-5], de forma que actualmente parece aceptado el hecho de que la tasa de crecimiento de huecos es función creciente de la triaxialidad tensional.

Sin embargo, a pesar del importante esfuerzo investigador en la línea anterior, relativamente pocos trabajos se han centrado en el análisis de la extensión de las zonas con topografía microscópica de crecimiento y coalescencia de micro-huecos (MVC). A este respecto,

le referencia [6] analiza la situación en el caso de muestras axilsimétricas entalladas de acero perlítico de alta resistencia, demostrándose que existe un nivel de triaxialidad —*característico* del material— por debajo del cual la topografía es MVC y por encima del cual el proceso de fractura se produce por clivaje.

En este artículo se presenta un exhaustivo estudio fractográfico de las superficies de rotura en muestras prismáticas entalladas de acero perlítico de alta resistencia, utilizando diferentes geometrías de entalla con el fin de elucidar la influencia de la triaxialidad tensional no sólo en los mecanismos de crecimiento y coalescencia de micro-huecos, sino también en la extensión de la zona con topografía microscópica MVC, para así determinar la posible influencia cuantitativa de la triaxialidad en el tamaño de la *zona de proceso* para el fenómeno de fractura.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado fue un acero perlítico de alta resistencia suministrado comercialmente en alambres de 12 mm de diámetro. La composición química y las propiedades mecánicas aparecen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Composición química (%)

C	Mn	Si	P	S
0.85	0.60	0.26	0.010	0.030

Tabla 2. Propiedades mecánicas

E (GPa)	σ_Y (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(\sigma_{max})$ (%)	P (MPa)	n
199	600	1151	6.1	2100	4.9

P, n : Parámetros Ramberg-Osgood $\epsilon = \sigma/E + (\sigma/P)^n$

Se utilizaron muestras prismáticas simple y doblemente entalladas con simetría plana y diferentes radios en el fondo de la entalla, con el fin de obtener distintas distribuciones de triaxialidad en las proximidades del fondo de la entalla y así estudiar su influencia en el crecimiento de micro-huecos. Las geometrías con entalla simple se denominaron PA (radio mínimo) y PC (radio máximo), mientras que aquellas con doble entalla se denominaron PAA (radio mínimo) y PCC (radio máximo). Las dimensiones de las muestras empleadas aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de las muestras (mm)

Geom	A	d	R	W	B
PA	1.80	7.20	0.61	9.00	4.50
PC	1.70	7.30	6.56	9.00	4.50
PAA	0.75	5.90	0.24	7.40	7.40
PCC	0.69	6.02	2.69	7.40	7.40

donde A es la profundidad de entalla, d la longitud no entallada de la sección neta, R el radio en el fondo de la entalla, W el canto o dimensión total ($W=A+d$ en las simplemente entalladas; $W=2A+d$ en las doblemente entalladas) y B el espesor en dirección perpendicular.

Se realizaron ensayos de fractura a flexión pura sobre las probetas prismáticas simplemente entallas (PA y PC) y ensayos de fractura a tracción sobre las probetas prismáticas doblemente entalladas (PAA y PCC). En

todos los ensayos se sometió a las probetas a un proceso de carga monótona creciente hasta rotura, utilizando control de desplazamientos. Los ensayos se instrumentaron colocando en la probeta extensómetros para la medida de apertura de la boca de la entalla (en el caso de ensayos de fractura a flexión pura) o desplazamientos relativos en dirección axial (en el caso de ensayos de fractura a tracción). En cada ensayo se obtuvo un registro continuo momento-apertura o carga-desplazamiento (variables macroscópicas medibles). La sollicitación de flexión pura fue aplicada por medio de un dispositivo de rodillos con cuatro puntos de apoyo, según se muestra en la Fig. 1, a fin de tener un momento flector como única sollicitación en la sección de la entalla, estando ésta situada en la zona de tracción.

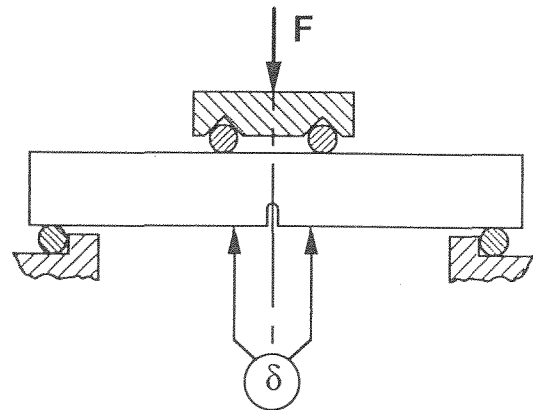


Fig. 1. Dispositivo experimental para los ensayos de flexión pura.

Los resultados macroscópicos de los ensayos de fractura a flexión pura sobre probetas simplemente entalladas (PA y PC), se ofrecen en la Fig. 2 en forma de curva momento-apertura. La rotura se produjo siempre con carácter frágil desde el punto de vista macroscópico, en plena rama ascendente en la curva momento-apertura aunque también se aprecian brevísimos descensos de carga al final del ensayo. Debido al espesor relativamente pequeño de las muestras ensayadas, la estricción fue considerable, con concentración de deformación plástica en las proximidades del fondo de la entalla y disminución clara de espesor, siendo este fenómeno más acusado en la geometría PC, de mayor radio de entalla, lo cual es también coherente con el mayor desarrollo en régimen plástico de su curva momento-apertura, en comparación con la geometría PA.

Una conclusión análoga cabe extraer de los ensayos de fractura sobre las probetas prismáticas doblemente entalladas (PAA y PCC) sollicitadas a tracción, cuyos resultados macroscópicos se dan en la Fig. 3 en forma de curva carga-desplazamiento. También la rotura se produce en plena rama ascendente de carga, en ambos casos sin descenso alguno, lo cual es coherente con el mayor espesor de las probetas doblemente entalladas, que lleva aparejada menor estricción en forma de pérdida de sección neta al final del ensayo.

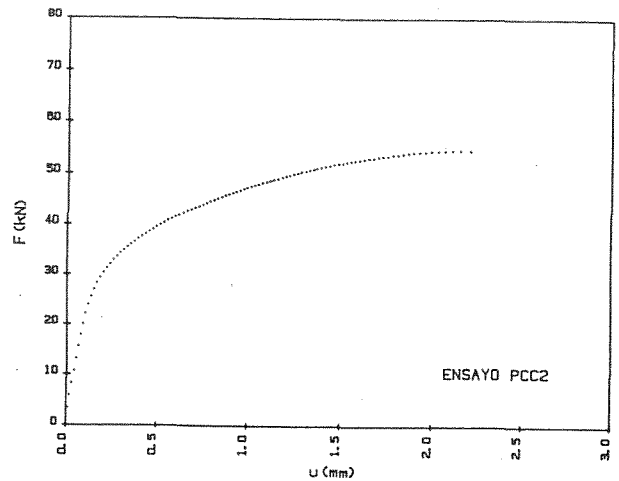
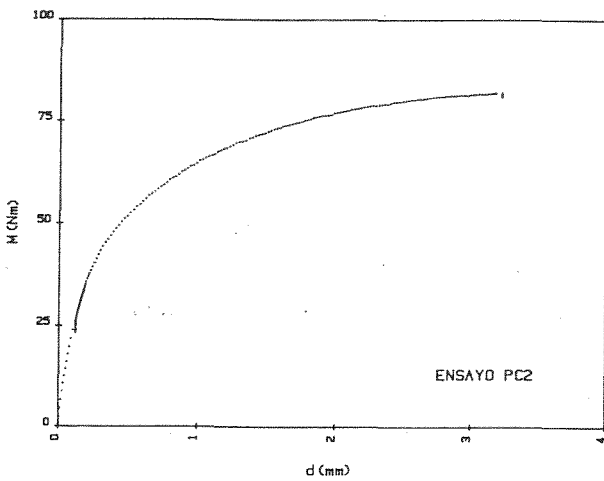
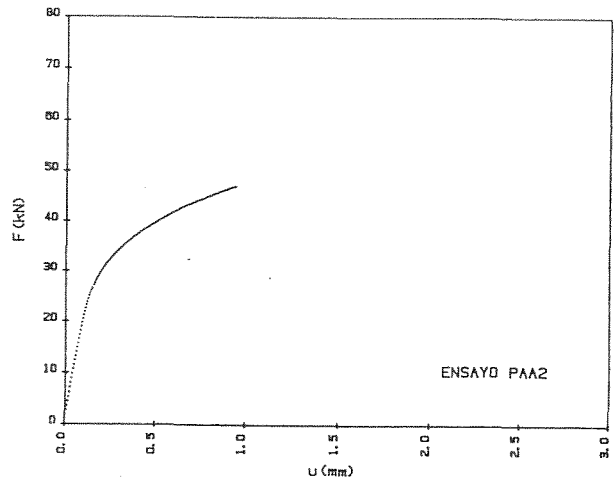
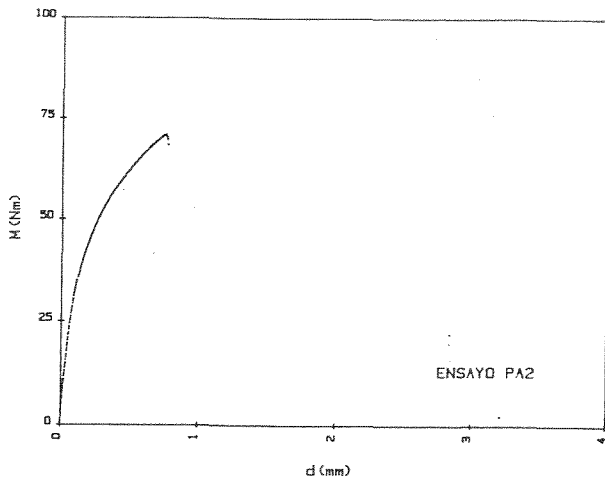


Fig.2. Resultados de los ensayos de fractura (flexión)

Fig.3. Resultados de los ensayos de fractura (tracción)

3. ANALISIS FRACTOGRAFICO

El análisis fractográfico de las superficies de rotura se realizó por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) con un voltaje de aceleración de 20 a 25 kV. Antes del examen, todas las muestras se limpiaron con acetona y ultrasonidos, cubriéndose a continuación el área fracturada con una fina capa de oro-paladio, a fin de evitar la corrosión.

En todos los casos la superficie de fractura presenta la apariencia esquematizada en la Fig. 4. La rotura se inicia siempre por crecimiento y coalescencia de microhuecos (*micro-void coalescence*: MVC) en la zona próxima a la entalla, para a continuación propagarse de forma brusca por clivaje (C) orientado en direcciones radiales y finalizar en otra zona tipo MVC de mucho menor tamaño. La topografía inicial MVC representa la zona de proceso o zona de iniciación del fenómeno de fractura, y tiene en general mayor profundidad en la zona central (máxima triaxialidad o constreñimiento lateral), decreciendo hacia los bordes de la muestra, si bien vuelve a aumentar muy localmente junto a la superficie libre, región en estado de tensión cuasi-plana. Este resultado es general para todas las probetas.

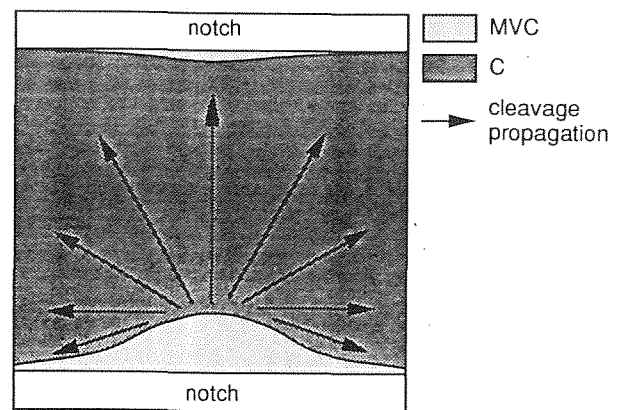


Fig. 4. Aspecto general del área de fractura.

En todos los casos se midió la profundidad de la zona MVC en al menos 30 puntos a lo largo de la entalla, con el fin de tener la forma de la zona de proceso y la profundidad máxima, para así relacionarla con la triaxialidad tensional, dependiente a su vez de la geometría de la entalla. Los resultados se muestran en las Figs. 5 (flexión) y 6 (tracción).

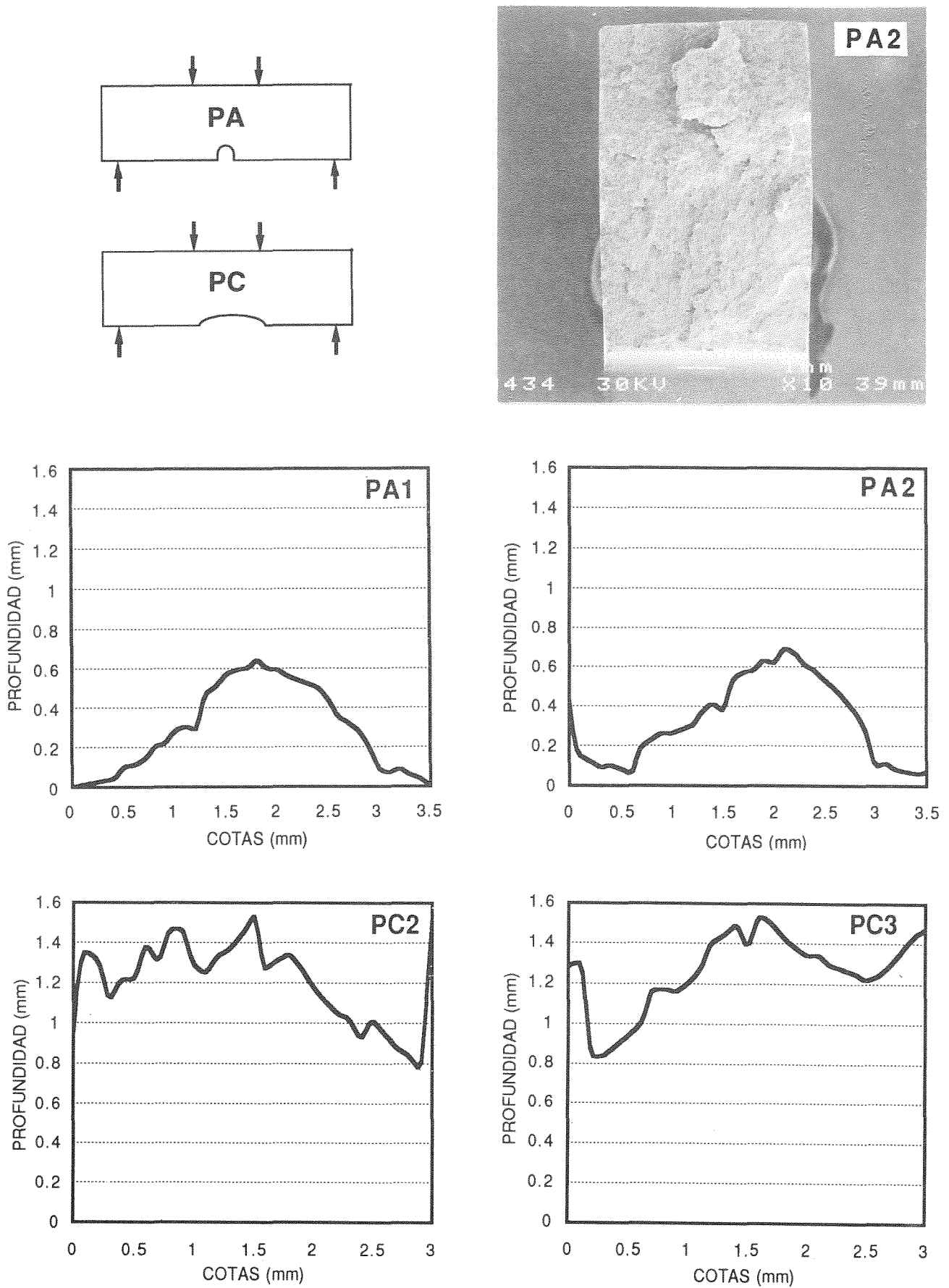


Fig. 5. Análisis fractográfico: probetas prismáticas simplemente entalladas, ensayos de flexión pura.

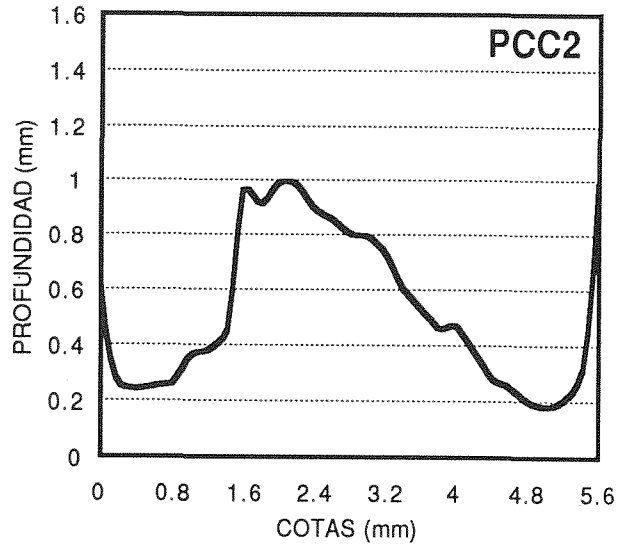
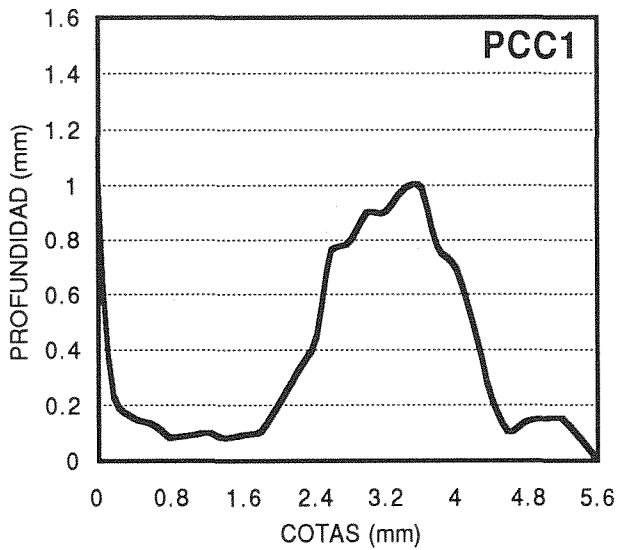
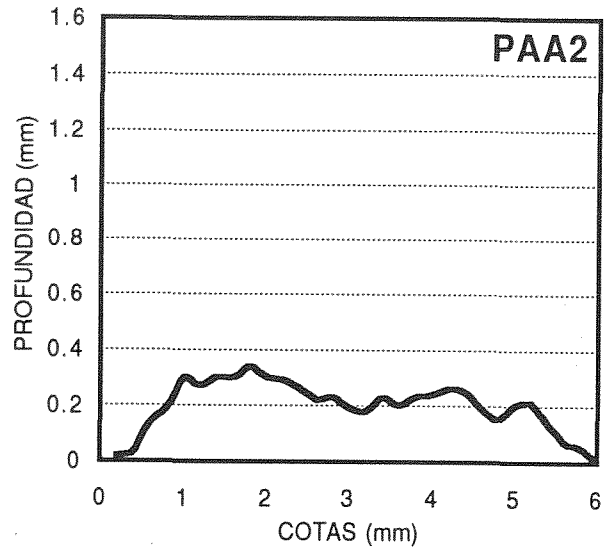
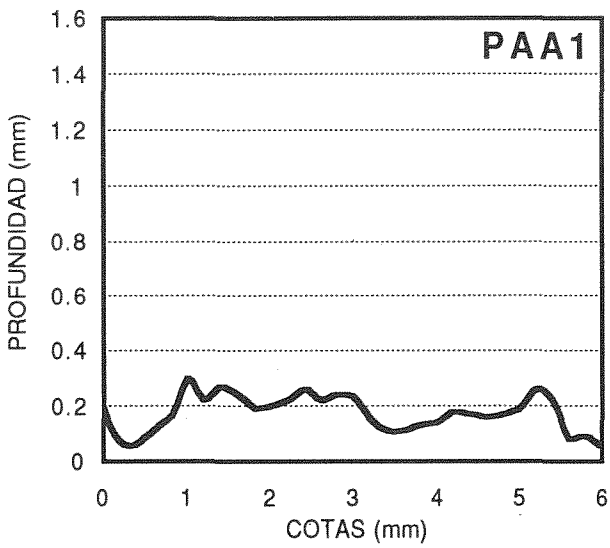
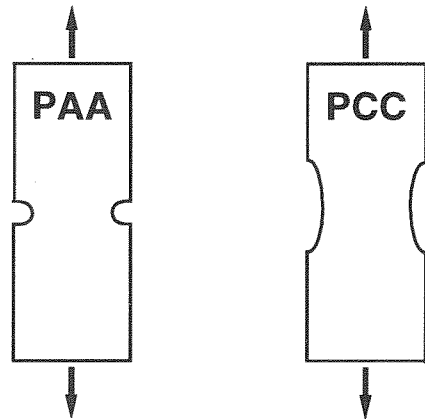
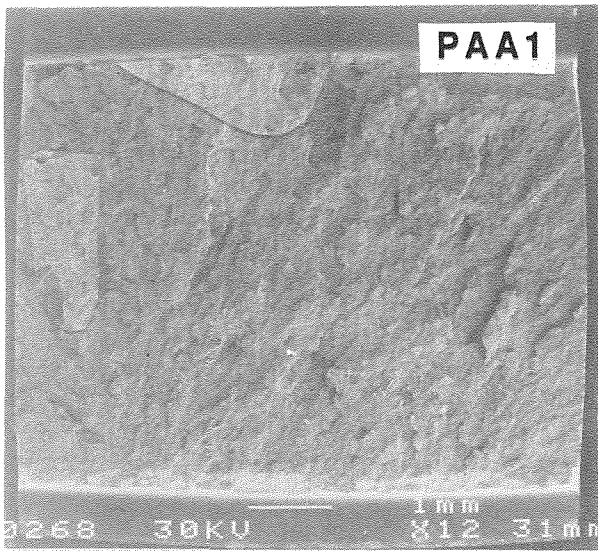


Fig. 6. Análisis fractográfico: probetas prismáticas doblemente entalladas, ensayos de tracción.

4. DISCUSION

Los valores máximos de la profundidad MVC son de 0.70 mm (PA: entalla simple de radio mínimo; flexión), 1.55 mm (PC: entalla simple de radio máximo; flexión), 0.30 mm (PAA: entalla doble de radio mínimo; tracción) y 1.00 mm (PCC: entalla doble de radio máximo; tracción). Tanto para los ensayos de flexión (Fig. 5) como para los de tracción (Fig. 6), y para las dos geometrías de entalla, la profundidad de la zona MVC es máxima en la zona central (máxima triaxialidad y constreñimiento), y decrece hacia los bordes de la muestra, si bien vuelve a aumentar localmente junto a la superficie libre. También para ambos tipos de ensayo (flexión y tracción), la profundidad de la zona MVC es menor en el caso de la entalla tipo A (radio mínimo) que en la de tipo C (radio máximo). A mayor triaxialidad global de la probeta, menor extensión de la región MVC.

Los hechos enunciados anteriormente podrían parecer contradictorios, puesto que, en cuanto a variación dentro de una misma probeta, la profundidad MVC es función *creciente* de la triaxialidad, mientras que comparando probetas con distintas geometrías de entalla, la extensión MVC es función *decreciente* de la triaxialidad. La aparente paradoja se resuelve realizando tanto un análisis *local* (distribución de triaxialidad en distintos puntos de una geometría dada) como un análisis *global* (balance de valores globales máximos de triaxialidad en distintas geometrías).

Desde el punto de vista *local*, la tasa de crecimiento de huecos es función *creciente* de la triaxialidad —o constreñimiento— en el punto considerado [2], lo que explica la mayor profundidad MVC en el centro de las muestras. El aumento en las proximidades del borde es muy local, y podría atribuirse al modo distinto de crecimiento y coalescencia cerca una superficie libre, según el cual los huecos tienen más facilidad para la coalescencia lateral por proximidad [7], o al fenómeno de estricción superficial que provoca plastificación intensa, grandes deformaciones y cambios geométricos en esa zona, con aumento local de triaxialidad por efecto entalla.

Realizando un análisis *global*, el nivel de triaxialidad —o constreñimiento— en cada probeta controla el inicio de la fractura inestable por clivaje, de forma que la profundidad máxima MVC es función *decreciente* de la triaxialidad global (factor de triaxialidad) en cada geometría. Este hecho resulta coherente con la existencia de un valor crítico —correspondiente a fractura— del crecimiento de huecos, función *decreciente* de la triaxialidad [8,9], o con un valor característico de triaxialidad por debajo del cual la fractura es MVC y por encima del cual el mecanismo es de tipo clivaje [6]. Los casos límites de probeta lisa (mínima triaxialidad; estado uniaxial) y probeta fisurada (máxima triaxialidad junto al frente de la fisura) quedan comprendidos en este criterio. En la probeta lisa la rotura se produce por MVC, mientras que en la probeta fisurada la fractura sobreviene por clivaje.

5. CONCLUSIONES

1. Los micro-mecanismos fundamentales de fractura del acero perlítico estudiado en distintas condiciones de triaxialidad producidas por la presencia de entallas son dos: crecimiento y coalescencia de micro-huecos (MVC) y fractura de tipo clivaje (C).
2. La topografía MVC representa la *zona de proceso* o zona de iniciación del fenómeno de fractura, mientras que la topografía tipo C está asociada a la fractura frágil de tipo inestable, con orientación clara irradiando desde la zona de iniciación.
3. Localmente, la profundidad de la región MVC es función *creciente* de la triaxialidad local en el punto considerado, siendo máxima en el centro y decreciendo hacia la superficie libre, debido a que la tasa de crecimiento de huecos aumenta con la triaxialidad.
4. Desde el punto de vista global, la extensión máxima de la zona MVC es función *decreciente* del valor global máximo de la triaxialidad en la muestra (factor de triaxialidad), debido a que el crecimiento crítico de huecos disminuye al aumentar la triaxialidad.
5. Los casos límites de probeta lisa (mínima triaxialidad) y fisurada (máxima triaxialidad) quedan comprendidos en este criterio. La probeta lisa rompe por MVC, mientras que la probeta fisurada rompe por clivaje.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGICYT) y a la Xunta de Galicia por la financiación aportada para la realización de esta investigación a través de los proyectos CE94-001 y XUGA 11801A93, respectivamente. Igualmente agradecen la financiación de la Comunidad Económica Europea (CEE) para la estancia del Dr. Eric Vasseur en la Universidad de La Coruña en calidad de Investigador Visitante (Programa Capital Humano y Movilidad, Proyecto ERBCHBICT 930848).

REFERENCIAS

- [1] F. A. McClintock, *Journal of Applied Mechanics* **35**, 363-371 (1968).
- [2] J. R. Rice, D. M. Tracey, *J. Mech. Phys. Solides*, **17**, 201-217 (1969).
- [3] A. L. Gurson, *J. Engng. Mater. Tech.* **99**, 2-14 (1977).
- [4] S. H. Goods, L. M. Brown, *Acta metall.* **27**, 1-15 (1979).
- [5] G. le Roy, J. D. Embury, G. Edward, M.F. Ashby, *Acta metall.* **29**, 1509-1522 (1981).
- [6] J. Toribio, A. M. Lancha and M. Elices, *Mater. Sci. Engng.* **A145**, 167-177 (1991).
- [7] Sun Jun, *Engng. Fracture Mech.* **39**, 799-805 (1991).
- [8] A. Pineau, *Proc. 5th Int. Conf. on Fracture-ICF5* (D. Francois, ed.). Cannes, France, pp. 553-577 (1981).
- [9] F. M. Beremin, *Proc. 5th Int. Conf. on Fracture-ICF5* (D. Francois, ed.). Cannes, France, pp. 809-816 (1981).