

**GEOMETRÍA FRACTAL DE LA SUPERFICIE DE ROTURA DE UNA CHAPA DE
Ti-6%Al-4%V CON FUERTE TEXTURA CRISTALOGRAFICA**

J.A. Medina Perilla, J. Gil Sevillano

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES - UNIVERSIDAD DE NAVARRA
y
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES TÉCNICAS DE GUIPÚZCOA (CEIT)
Departamento de Materiales
Paseo de Manuel de Lardizabal, 15, 20009 San Sebastián

Resumen Se ha analizado fractográficamente la superficie de rotura por alargamiento de una chapa de aleación Ti-6%Al-4%V, $\alpha+\beta$, con una fuerte textura cristalográfica de tipo "transversal" (T). La geometría fractal de los perfiles de fractura de secciones perpendiculares al plano macroscópico de rotura se ha evidenciado por el método de dilatación isótropa de Minkowski, haciendo uso de un analizador automático de imágenes. En general, dentro del rango de temperaturas analizadas, el valor constante de la dimensión fractal $D > 1$ sobre dos órdenes de magnitud de la escala longitudinal permite la asignación de una naturaleza fractal a estos perfiles. Tal naturaleza guarda una estrecha relación con la textura como elemento microestructural que controla la particular geometría de la fractura dúctil de este material.

Abstract A detailed fractographical analysis of the fracture surface of a strongly textured Ti-6%Al-4%V plate has been performed after tension along different directions on the plate surface. A "Minkowski sausage" type analysis of the profiles of sections of the fracture surfaces has shown their fractal character ($D \approx 1.1$). The geometry of the profiles is related with the crystallographic texture at both mesoscopic scale (the local orientation of the fractured surface) and microscopic scale (the shape of the ductile voids). The scale range in which the profiles manifest their fractal character encompasses two orders of magnitude and its lower bound is beyond the scale range of the microstructure (α or β grain size, β interparticle distance). This seems to indicate that texture is a determinant factor of the fractal nature of the fracture profiles through some plastic failure process of a scale larger than the void nucleation and growth mechanism.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década, diversos autores [1-4], han dejado clara la potencialidad de la geometría fractal como herramienta de análisis cuantitativo de las superficies de fractura. Específicamente, la medida empírica de la dimensión fractal, D , con su rango de autosemejanza y su relación con la microestructura y propiedades mecánicas han sido dos aspectos objeto de investigación frecuente en los últimos tiempos.

Dauskardt y col. [5] han confirmado que el carácter fractal no es singular para cada uno de los principales modos de fractura, aunque se ha evidenciado una buena correlación entre la extensión de rangos de autosemejanza y la distribución de tamaño de muchos elementos fractográficos o microestructurales involucrados en el proceso de rotura, v.g., tamaño de facetas en roturas frágiles o distancia entre partículas nucleantes de huecos en las fracturas dúctiles [5,7]. Si no se distingue claramente un rango de escalas donde se evidencia autosemejanza, sólo caben interpretaciones

vagas como la de "superficies aproximadamente fractales" o curvas "cuasi-fractales", como, por ejemplo, Pande y col. [6] sugieren para las fracturas de algunas aleaciones de Ti. En realidad se acepta que cuando la extensión del rango fractal se reduce a intervalos de escala apenas próximos a un orden de magnitud, no cabe hablar de geometría fractal.

El contenido de esta comunicación se suscitó al investigar el comportamiento a fractura de una chapa de aleación Ti-6%Al-4%V, $\alpha+\beta$, previa laminación en frío, recocida y con una fuerte textura transversal, $\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$. Las muestras fueron traccionadas en diferentes direcciones sobre el plano de la chapa en un rango de bajas temperaturas. Se puso especial atención en la geometría de las superficies de fractura y en su relación con características microestructurales (textura y morfología de grano) a través de los microprocesos involucrados. La morfología de algunas fracturas sugería inequívocos rasgos fractales, Fig. 1, que se confirmaron al caracterizarlas cuantitativamente. La

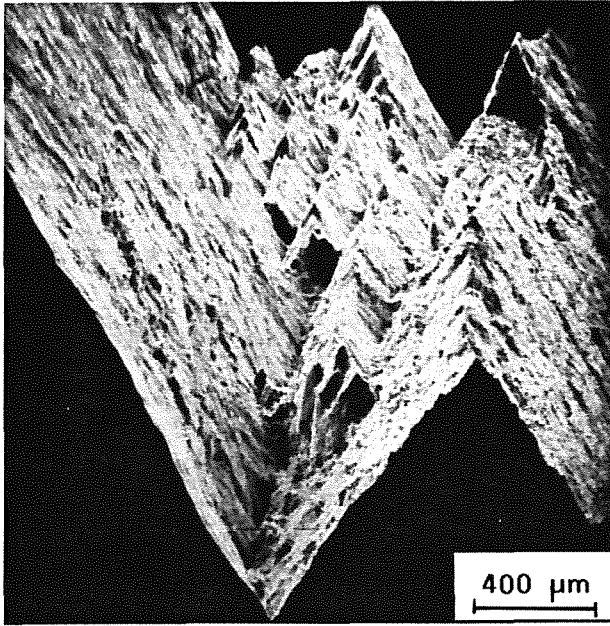


Fig. 1. Aspecto fractal de la superficie de fractura de la chapa de Ti-6Al-4V. Muestra sometida a tracción en la dirección de laminación, R.D., a 213 K.

dimensión fractal, D , de los perfiles superficiales de secciones de las probetas se midió por el método de Minkowski [4], mediante la utilización de un analizador automático de imágenes. En general, dentro del rango de temperaturas ensayadas, el valor constante de D sobre dos órdenes de magnitud de la escala longitudinal permite la asignación de una naturaleza fractal a tales perfiles, aunque, para la muestra ensayada a 533 K en dirección 90°, este último requerimiento no se satisface completamente.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material y microestructura

El material utilizado fue una chapa de 3.8 mm de espesor de Ti-6%Al-4%V en principio laminada en caliente y posteriormente laminada en frío y recocida. La estructura resultante estuvo compuesta por una dispersión muy fina de partículas β localizadas en las fronteras de grano de la fase α , alargada en la dirección de laminación. El tamaño de partícula de la fase β está por debajo de 1 μm y su fracción volumétrica es del orden del 10%. La estructura α es heterogénea y no completamente resuelta al microscopio óptico. La longitud de los granos alargados oscila entre 10-80 μm y su espesor medio aproximado es de 5 μm . La textura presente tiene una componente muy fuerte del tipo transversal (T), $\{11\bar{2}0\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$, es decir, una densidad basal muy alta orientada en la dirección transversal a la dirección de laminación. La

fig. 2 presenta las micrografías correspondientes a la secciones longitudinal y transversal de la muestra.

2.2. Ensayos

Probetas de tracción de sección 3.8 x 6.0 mm y longitud activa de 25 mm fueron mecanizadas con ejes longitudinales formando 0° (RD), 45° y 90° (TD) con la dirección de laminación. La deformación se llevó a cabo a una tasa nominal de $5 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, en un rango de bajas temperaturas, 213-533 K, hasta alcanzar la fractura.

Se escogieron para análisis fractográfico las muestras ensayadas a las temperaturas extremas del rango.

La tenacidad a la fractura bajo modo I en las direcciones de laminación y transversal se midió también mediante ensayos de integral J en probetas compactas con entallas laterales en V.

2.3. Fractografía

Las superficies de fractura se examinaron en el SEM, poniendo especial atención en los planos de proyección perpendiculares a la dirección de tracción. Se caracterizaron los tamaños y orientaciones preferentes de microcavidades en las muestras ensayadas a 0° y 90°. La orientación preferencial se cuantificó directamente mediante la medida del número de fronteras de microcavidad interceptadas por unidad de longitud sobre líneas de referencia orientadas a intervalos de 30°, $P_l(\theta)$, respecto a la normal de la chapa.

2.4 Fractografía fractal

Las superficies de fractura se protegieron mediante deposición electrolítica de Ni. Posteriormente, se realizó un corte y pulido sobre planos paralelos a la dirección de tracción, cuyas normales estuvieran contenidas en el plano de la chapa.

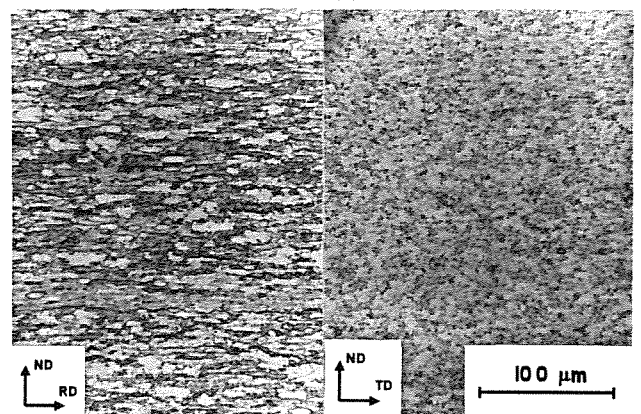


Fig. 2. Microestructura $\alpha + \beta$ de la aleación Ti-6%Al-4%V. Secciones: a. Longitudinal. b. Transversal.

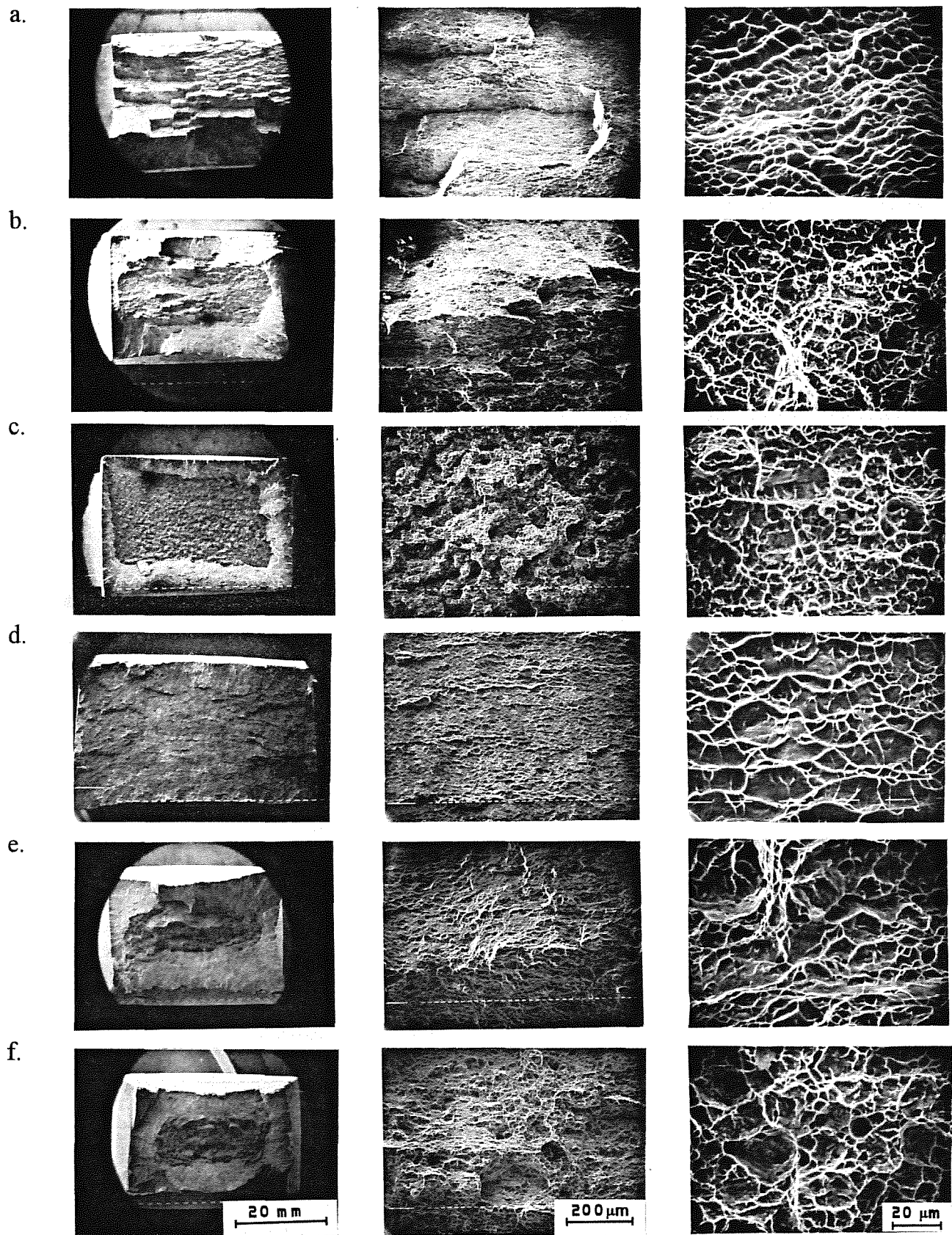


Fig. 3. Comparación entre superficies de fractura para la chapa de Ti-6Al-4V .

a. T=213 K, 0°, b. T=213 K, 45°, c. T=213 K, 90°.

d. T=533 K, 0°, e. T=533 K, 45°, f. T=533 K, 90°.

La dimensión fractal, D , se midió mediante el llamado método de Minkowski, basado en dilataciones progresivas del perfil de fractura usando elementos cuasi-isótropos (octogonales). En este caso la dimensión fractal se define como:

$$D = 1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{A}{t}\right)}{\ln\left(\frac{t}{2}\right)} \right) \quad (1)$$

donde:

A = Área de la banda de dilatación en torno al perfil considerado.

t = Espesor de la banda.

La representación gráfica de $\ln(A/t)$ frente a $\ln(t/2)$ permitió determinar el valor de D , los rangos de autosemejanza y la bondad del ajuste (por el coeficiente de correlación de la regresión lineal).

Un analizador automático de imágenes Quantimet 570 se usó para este propósito. Se utilizaron imágenes representativas del perfil a 320x, con resoluciones del orden de $1.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

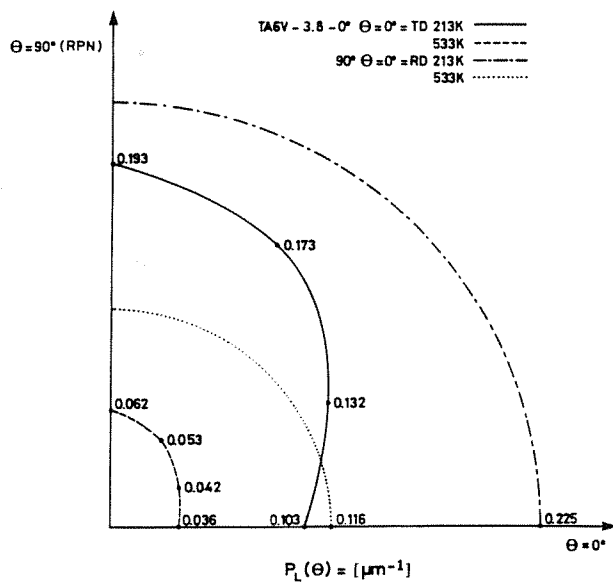


Fig. 4. Número de fronteras de microcavidades interceptadas por unidad de longitud para muestras estiradas a 0° y 90° de la dirección de laminación.

3. RESULTADOS

Como era de esperar, dada la fuerte anisotropía que caracteriza a los metales HCP, se encontró una clara dependencia de las facies de fractura con la orientación ensayada.

En las probetas estiradas en la dirección de laminación, se apreció un mecanismo de fractura dúctil a cortadura asociado a microcavidades orientadas

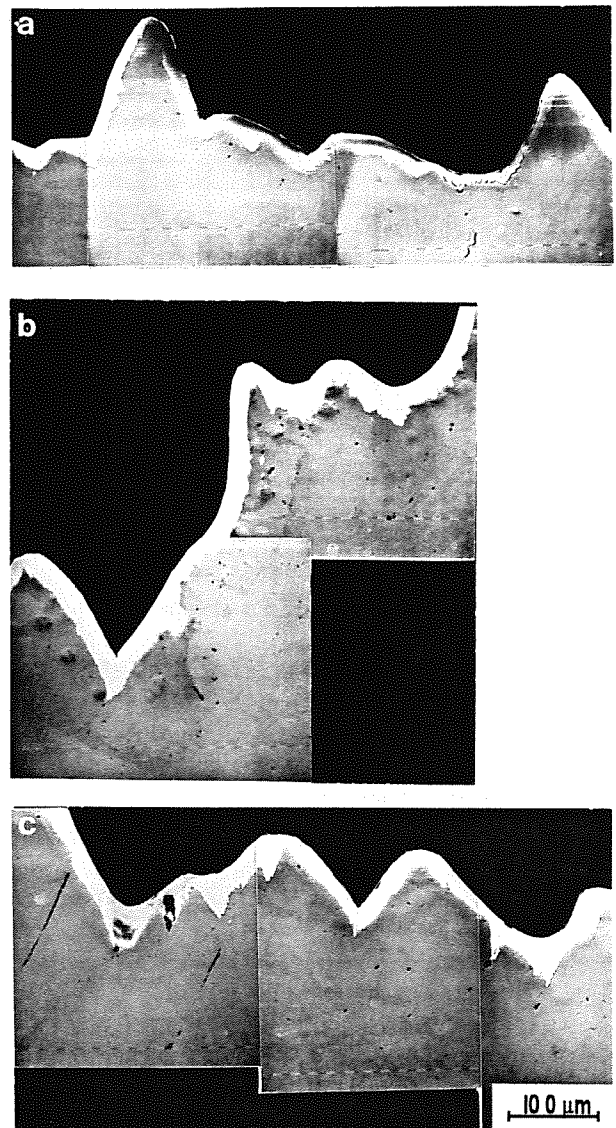


Fig. 5. Ejemplos de perfil utilizados en el cálculo de D . a. 0°, 213K. b. 45°, 213 K. c. 90°, 213 K.

preferencialmente, fig. 3-a.,d. Tal resultado se explica por la activación simultánea de bandas de dos sistemas de deslizamiento prismáticos $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$, sistemas "blandos", ya observados en este material bajo estas condiciones de carga [9]. A temperaturas por debajo del ambiente (298K), la superficie está principalmente formada por la intersección de dos planos que, a nivel mesoscópico, son paralelos a TD y forman 30° con la RD, lo cual da a esta fractura una apariencia fuertemente quebrada. La forma sugiere la concentración del deslizamiento en bandas de cortadura intensa. Por encima de esta temperatura, la cortadura es más uniforme, pero de naturaleza semejante. Fig 3-d.

Para el estirado en la dirección 90°, la apariencia mesoscópica de la región central de la fractura tensil es equiáxica, fig. 3-c. y f. Desde el punto de vista cristalográfico, este comportamiento es consistente con

Tabla 1. Características fractográficas y propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V

Dirección de carga	T [K]	$\sigma_{y(0.2\%)}$ [MPa]	ϵ_f $\ln A_0 / \ln A_f$	Indice r	$J_{0.2}^*$ [K/m ²]	Cavidades dúctiles Media, (rango)[μm]	Intervalo de unidades de medida, t/2 [μm]	D	Coef. de correl.
0°	213	1092	0.17	0.33	21.9	9.7,(1.0-19)	0.57-147	1.0721	.952
	533	679	0.47	0.28		27.7,(1.5-36)	0.60-77.4	1.0604	.899
45°	213	1080	0.55	1.67	19.3		0.57-37	1.0728	.912
	533	715	0.90	1.36			0.58-113	1.0774	.950
90	213	1249	0.44	0.58	19.3	4.4,(0.5-10)	0.57-74	1.0890	.950
	533	853	0.83	0.56		8.6,(0.5-18)	0.60-154	1.0850	.812

* Medidas hechas a temperatura ambiente según el procedimiento ESIS. Los valores no son válidos por el insuficiente espesor de la placa ensayada.

la activación simultánea de los planos piramidales en dirección <c+a>, sistemas "duros", ya observados por Hutchinson y col. [10] para esta misma aleación con microestructura (morfología de grano y textura) similar. En algunos huecos, se puede observar un patrón de cúpula hexagonal. Las superficies de fractura a 45° presentaron un comportamiento intermedio entre las condiciones de 0° y 90°, fig 3-b.y e.

La diferencia básica entre las dos temperaturas experimentadas radicó en el menor tamaño medio de microcavidades y a la vez en la mayor presencia de microgrietas secundarias a la temperatura baja. Una caracterización del tamaño y orientación preferencial de microcavidades se presenta en la fig.4.

En la fig.5 se muestran algunos ejemplos de los perfiles utilizados en este trabajo. La representación tipo Minkowski con los respectivos ajustes lineales se presentan en la fig. 6. La extensión de los rangos de autosemejanza cercana a las dos décadas y los valores del coeficiente de correlación permiten asignar un carácter fractal a la mayoría de perfiles. Sólo se exceptúa la muestra ensayada a 533K en dirección 90°, cuyo carácter fractal no es seguro. La Tabla 1 presenta un resumen de las características fractográficas y propiedades mecánicas obtenidas para esta aleación.

4. DISCUSIÓN

Los ajustes lineales de la fig. 6 (Tabla 1) suponen un comportamiento fractal en el intervalo cubierto por las medidas. Fuertes desviaciones de ese comportamiento son patentes para las escalas más finas de medida. Una mejor apreciación de la geometría de los perfiles nos la da un ajuste más flexible a los datos y la consideración de una "dimensión fractal instantánea", obtenida por derivación de ese ajuste (Fig. 7). En esta figura es evidente un cambio de comportamiento cuando el

patrón de medida desciende por debajo del valor medio de la dimensión de los huecos dúctiles (véase, de nuevo, la Tabla 1): existe una cierta longitud máxima,

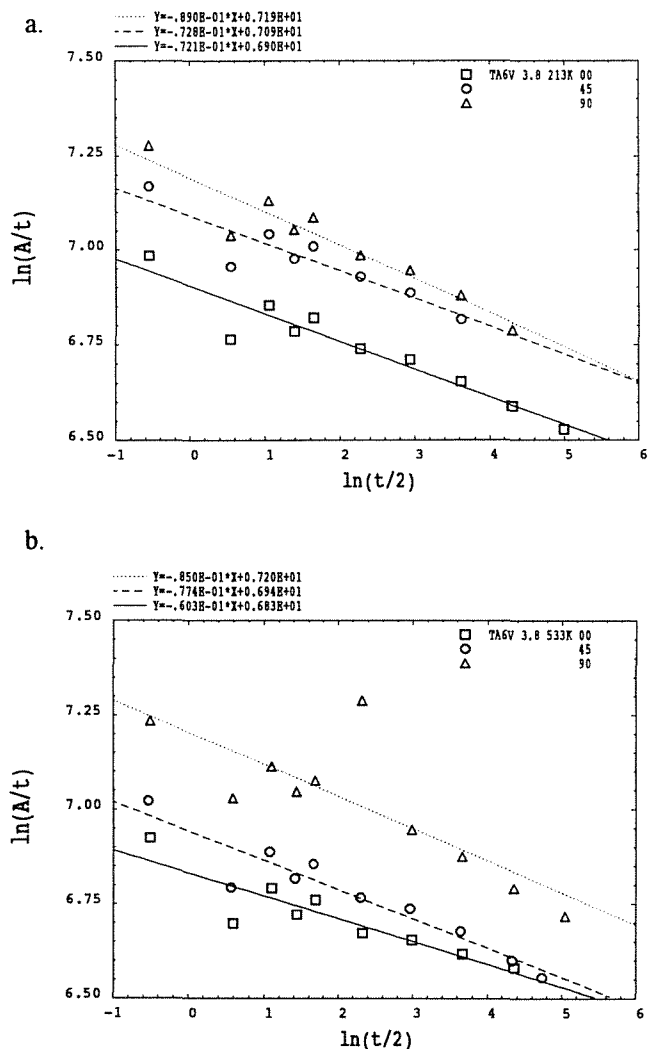


Fig. 6. Representación de la dilatación de Minkowski: $\ln(A/t)$ vs. $\ln(t/2)$. a. 213 K, b. 533 K.

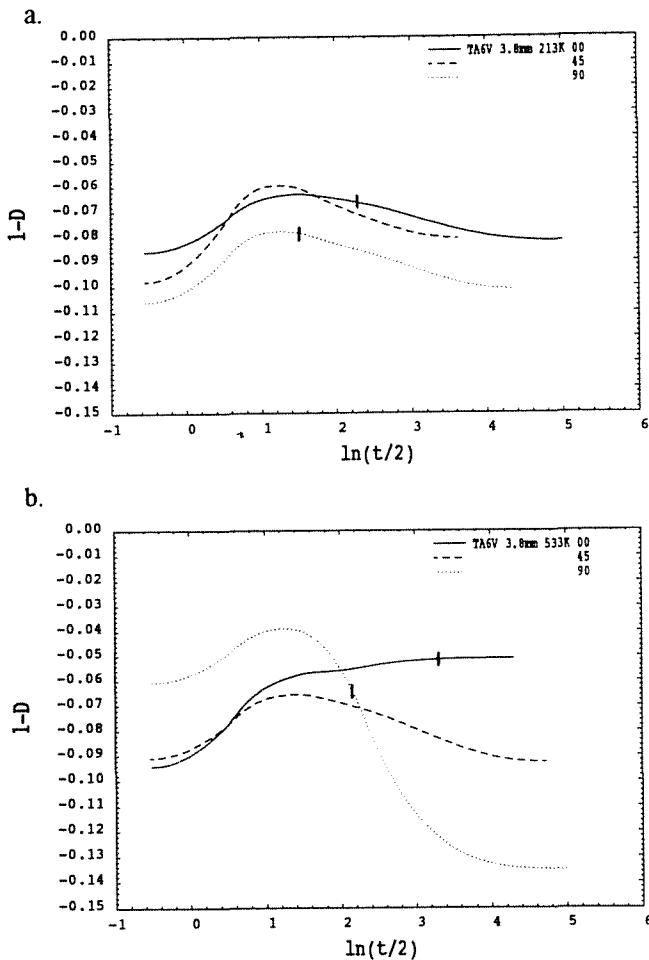


Fig. 7. Dimensión fractal instantánea frente al logaritmo del paso de medida, a. 213K, b. 533 K. En las curvas 0° y 90° se marca el valor medio del tamaño de las cavidades dúctiles.

(A_m/t_c) asociada a un patrón de escala mínimo, t_c , que marca un límite inferior al comportamiento fractal. Yendo en sentido contrario (t creciente o dimensiones grandes de perfil), el comportamiento tiende asintóticamente hacia la naturaleza fractal. El comportamiento es, por tanto, del tipo "fractal no ideal" descrito por Rigaut [11]. Para $t > t_c$,

$$2 * [(A_m/t_c)/(A/t)] - 1 = [t / t_c]^{D-1} \quad (2)$$

es decir, fractal para grandes escalas y con un umbral dimensional por debajo del cual la geometría cambia. Este umbral coincide aquí razonablemente con las dimensiones críticas de las cavidades de rotura, unidades mínimas de fractura dúctil, por lo que el proceso determinante de la geometría fractal es de jerarquía superior a la nucleación y crecimiento de cavidades. La fuerte agrupación de los ángulos de los segmentos de los perfiles a distintas escalas dentro del rango fractal (aproximadamente $\pm 30^\circ$ respecto a la dirección de tracción) y la coincidencia de este ángulo con el de los planos prismáticos de la orientación T

estirada a $0^\circ (\pm 30^\circ)$ o de los planos piramidales en la estirada a $90^\circ (\pm 32.0^\circ)$ apuntan hacia la concentración del deslizamiento en un material fuertemente texturado como mecanismo generador del proceso de fallo determinante de la geometría observada. La observación de grietas secundarias con fuertes desplazamientos de cortadura asociados corrobora la validez de esta hipótesis (Fig.5).

Tenemos por tanto una geometría fractal construida sobre una morfología (pendientes locales de la superficie de fractura para dimensiones de escala superiores a las de las cavidades dúctiles) de facetas determinadas por la orientación cristalográfica (textura $\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$). La pregunta que cabe hacerse a continuación es si las dimensiones fractales medidas, en torno a 1.1, y la propia naturaleza fractal de las superficies de rotura, se derivan también del mecanismo de fallo asociado a las bandas de cortadura intensas que intersectan, en las secciones vistas, a unos 30° de la dirección de alargamiento.

Esta cuestión se plantea con carácter general en las discusiones recientes sobre fractura y geometría fractal: y el consenso que - a partir de medidas experimentales y observaciones numéricas- va abriéndose paso es que, aunque el mecanismo de fallo (clivaje, bandas de cortadura, coalescencia de cavidades de simetría ortorrómbica), combinado con la heterogeneidad geométrica y material, contribuye a fijar el valor específico de la dimensión fractal, la naturaleza fractal y la propia dimensión se derivan fundamentalmente del comportamiento caótico de la dinámica del fenómeno de rotura [8,12-15]. Existe una cierta universalidad en los fenómenos de fractura que se plasma en unas propiedades geométricas comunes y, todo lo más, existen unas pocas clases de "universalidad".

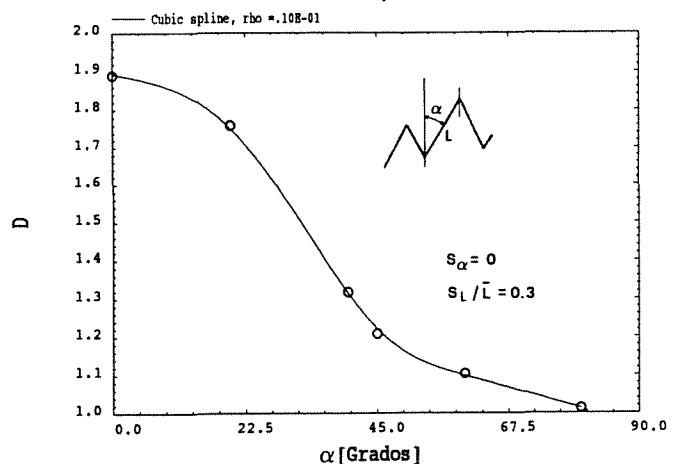


Fig. 8. Dimensión fractal, D , frente a la inclinación, α , de líneas bidimensionales con distribución normal de longitudes de segmentos de inclinación fija y secuencia aleatoria. Dibujado a partir de datos de Dauskart y col. [5]

La separación por rotura constituye un fenómeno particular de percolación y es sabido que el borde (edge) del conjunto (cluster) infinito de percolación en la situación crítica tiene características fractales [16].

En nuestro caso, asimilando la situación a un problema de percolación bidimensional (modelo muy apropiado para la tracción a 0°), las simulaciones numéricas indican que la dimensión fractal de la grieta final varía entre un valor máximo 1.89 (percolación de enlaces, 2D) y un mínimo (1.0), según que, respectivamente, el mecanismo local de fallo sea infinitamente sensible a la velocidad de deformación o totalmente estático [14] o bien que el umbral local crítico de fallo (tensión o deformación críticas) esté ampliamente distribuido u ocupe una banda estrecha [17]. Estas conclusiones coinciden con las de simulaciones puramente formales de curvas fractales [5] (D está inversamente relacionada con la desviación típica de los segmentos que componen la línea), aunque estas últimas muestran también que el valor de D , a igualdad de otros factores, es altamente sensible a la inclinación angular media de los segmentos del perfil, fig. 8. Para $\alpha \cong 30^\circ$ y $D \cong 1.1$, el valor relativo de la desviación típica de la longitud de segmentos ha de ser relativamente grande (>1) según las simulaciones de Dauskart [5].

5. CONCLUSIONES

- Las superficies de fractura dúctil a tracción entre $213K \leq T \leq 533K$ de una chapa de Ti-6%al-4%V con una fuerte textura $\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$ son objetos fractales para escalas de medida superiores a los tamaños medios de sus cavidades de fractura.
- La dimensión fractal de los perfiles de rotura en secciones que contienen la dirección de tracción y la normal al plano de la chapa es del orden de 1.10 y el ángulo medio de desviación de los segmentos constitutivos de los perfiles es aprox. $\pm 30^\circ$ de la dirección de tracción.
- La dimensión fractal es compatible con una desviación típica de los segmentos frente a su dimensión media moderadamente grande (≥ 1). En términos del mecanismo de fallo (que la morfología muestra ser coalescencia de grietas generadas por bandas de deslizamiento intenso de orientación determinada por la textura), esto equivale a baja sensibilidad del proceso local de fallo a la velocidad de deformación o un umbral estrecho de condiciones elementales de fallo (poca flexibilidad de condiciones de nucleación de bandas de deslizamiento intenso y estrecha distribución de deformación crítica de fallo a cortadura en las bandas). Es decir, daño no generalizado, sino localizado.

6. AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados se han obtenido durante el desarrollo de un proyecto BRITE/EURAM (BE-0117C-EDB) financiado por la DGXII de la Comisión Europea, en colaboración con las Universidades de Clausthal (Alemania), Metz (Francia), Leuven (Bélgica), Escuela de Minas de Saint-Etienne (Francia) y el Royal Aircraft Establishment-DRAE (U.K.). El material utilizado fue proporcionado por CEZUS (Francia).

7. REFERENCIAS

- [1] Hornbogen, E., "Fractals in microstructure of metals.", *Int. Mat. Rev.* **34**, N°6, 277-296 (1989).
- [2] Banerji, K., "Fractography: A modern perspective.", *Metall. Trans. A.*, **19A**, 961-971 (1988).
- [3] Underwood, E.E. y Banerji, K., "Fractals in fractography.", *Mater. Sci. Engng.*, **80**, 1-14 (1986).
- [4] Coster, M. y Chermant, J.L., "Recent developments in quantitative fractography.", *Int. Met. Rev.*, **28**, N°4, 228-250 (1983).
- [5] Dauskart, R.H., Haubensak, F. y Ritchie, R.O., "On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces", *Acta Metall. Mater.*, **38**, 143-159, (1990).
- [6] Pande, C.S., Richards, L.E., Louat, N., Dempsey, B.D. y Schwoeble, A.J., "Fractal characterization of fractured surfaces.", *Acta Metall.*, **35**, 1633-1637 (1987).
- [7] Mecholsky, J.J., Passoja, D.E. y Feinberg-Ringel, K.S., "Quantitative analysis of brittle fracture surfaces using fractal geometry.", *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**, 60-65 (1989).
- [8] Keustermans, J-P., "Development of fractal fractography in fracture behaviour investigations of a Zn-Al alloy.", A publicarse en *Rev. Met.-CIT / Sci. Gén. Mat.* (Febrero de 1994).
- [9] Gil, J., y Medina, J.A., Reporte técnico BRITE - EURAM Project 0117C (EDB). Sept. 1993.
- [10] Jones, I.P. y Hutchinson, W.B., "Stress-State dependence of slip in Titanium-6Al-4V and other H.C.P. metals", *Acta Metall.*, **29**, 951-968 (1981).
- [11] Rigaut, J.P., "An empirical formulation relating boundary lengths to resolution in specimens showing 'non-ideally fractal' dimensions", *J. Microscopy*, **133**, 41 (1984).

- [12] Bouchaud, E., de Arcangelis, L., Lapasset G. y Planès, J., " Los fractales en la rotura de los materiales", Mundo Científico (trad. esp. de "La Recherche"), 11, 902-903 (1991).
- [13] Ostoja-Starzewski, M., "Damage in random microstructure: size effects, fractals, and entropy maximization", Appl. Mech. Rev., 42, 5202-5212 (1989).
- [14] Sornette, D., Cowi, C., Miltenberger, P., Sornette, A. y Vanneste, C., " Organization of rupture", Solid State Phenomena, 35-36, 303-318 (1994).
- [15] Dickinson, J.T., Langford, S.C. y Jensen, L.C., "Dissipative Processes Accompanying Fracture", Fracture Mechanics of Ceramics, vol 10, pp 1-32. Bradt, R.C. y col., eds., Plenum Press, New York, 1992
- [16] Stauffer, D. y Aharony, A., "Introduction to percolation theory", Taylor and Francis, London Philadelphia (1985).
- [17] Schmittbuhl, J. y Roux, S., "The influence of internal stresses on the fracture of heterogeneous media". Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 2, 21-52 (1994).