

ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAMETRAL DE FIBRAS SIGMA. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN.

M.C. García Leiva, I. Ocaña Arizcorreta, A. Martín Meizoso, J. Gil Sevillano.

Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT)
Pº Manuel Lardizábal, 15, 20009- San Sebastián

y
Escuela Superior de Ingenieros Industriales (Univesidad de Navarra)
Aptdo. 1674, 20080, San Sebastián.

Resumen: Las fibras Sigma se utilizan habitualmente como refuerzo de materiales compuestos de matriz metálica. Las propiedades mecánicas de dicho material compuesto están relacionadas, obviamente, con las propiedades de sus componentes. Resulta, pues, imprescindible determinar lo más exactamente posible el comportamiento de las fibras Sigma si queremos predecir cuál va a ser el comportamiento del material compuesto. Se ha estudiado para ello la rotura de dichas fibras siguiendo varios métodos. La presente contribución presenta el estudio de la rotura a compresión diametral de las fibras Sigma y la comparación de los resultados obtenidos por este método con los correspondientes a los ensayos de tracción.

Abstract: Sigma fibres are commonly used as reinforcement in metallic matrix composites. Mechanical properties of these materials are obviously related to properties of component phases. Prediction of composite behaviour requires exact knowledge of fibre behaviour. Thus, diametral compression tests have been used for the study of mechanical properties of Sigma fibres. Tests results and failure modes are analysed in this paper and a comparison with tensile tests results is presented.

1. INTRODUCCIÓN

En la caracterización del comportamiento mecánico de materiales frágiles se emplea habitualmente el ensayo a tracción [1, 2]. Dicho ensayo tiene dos problemas al aplicarlo a materiales frágiles:

- dispersión grande en las medidas (los defectos superficiales en este tipo de ensayo son críticos)
- los resultados son muy sensibles al mal alineamiento de las probetas.

De ahí el interés de un método alternativo de ensayo, en este caso el ensayo de Disco Brasileño (Brazilian Test) o ensayo del Disco (Disk Test) [3, 4]. Dicho ensayo consiste en la compresión diametral de un del material que se quiere ensayar entre dos superficies planas. En nuestro caso, sin embargo, es complicado conseguir unas superficies de contacto suficientemente planas como para que no existan problemas de flexión, dado el pequeño diámetro de las fibras que se van a ensayar. Por ello se han ensayado bajo la compresión de una cuchilla contra un plano (una de las herramientas de ensayo tenía la forma de una cuña) fragmentos de unos

40 mm de fibra Sigma. Se pretende estudiar el comportamiento en este tipo de ensayos de las fibras Sigma y reproducir los resultados obtenidos mediante los ensayos de tracción [1,2] evitando así los problemas mencionados.

2. MATERIAL ENSAYADO Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Los ensayos se realizaron con fibras Sigma SM1140+ fabricadas por la DRA (Reino Unido). Estas fibras tienen un núcleo de W de unas 15 μm sobre el que se crece el material principal del que se compone la fibra ($\beta\text{-SiC}$) por CVD. Finalmente se les aplica un recubrimiento de grafito para mejorar la intercara en la posterior elaboración de los materiales compuestos así como para proteger la fibra en sí durante su manipulación.

El diámetro nominal de las fibras ensayadas es de 104 μm , alcanzando las 115 μm con el recubrimiento de carbono.

ANALES DE MECANICA DE LA FRACTURA VOL. 16 (1999)**Tabla 1.** Propiedades del SiC obtenido por deposición química desde el estado de vapor.

Propiedad	Valor	Referencias
Densidad	3.200 kg/m ³	Hirai, 1991
Dureza Knoop	27 -34 Gpa	Hirai, 1991
Dureza Vickers	31 Gpa	Hirai, 1991
Módulo elástico	275 - 469 Gpa	Hirai, 1991; Watkins, 1993
Módulo de cortadura	180 Gpa	Yamada, 1991
Coefficiente de Poisson	0'16	Yamada, 1991
Resistencia a tracción	590 MPa	Hirai, 1991
Carga de rotura	650 MPa	Hirai, 1991
Resistencia en flexión	200 - 800 MPa	Hirai, 1991
Tenacidad	3'1 - 6'8 MPa√m	Hirai, 1991
Resistencia específica	0'01 - 0'14 Ω·m	Hirai, 1991
Conductividad térmica	58 - 71 W/m·K	Hirai, 1991
Calor específico	0'690 J/g·K	Yamada, 1991
Coefficiente de expansión térmica	4'4 × 10 ⁻⁶ - 4'9 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Hirai, 1991

Se tomaron fragmentos de fibra de unos 40 mm (la longitud de las probetas resulta irrelevante dada la naturaleza de los ensayos).

Las probetas así preparadas se ensayaron a compresión diametral en una maquina Instron electromecánica, con una celda de carga de 500 N. La velocidad de ensayo fue 0'1 mm/minuto. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente. Se registró la carga aplicada en función del tiempo de ensayo, y posteriormente se hizo una conversión a carga-desplazamiento teniendo en cuenta la velocidad de desplazamiento constante aplicada en cada caso.

Cabe destacar que los ensayos realizados son cuchilla contra plano (knife-plate test). Dado el pequeño diámetro de las probetas es difícil conseguir de otro modo que la compresión sea perfectamente diametral. El radio de curvatura de la punta es de unas 60 μm (Fig. 1). La cuchilla (cuña de 90°) es de metal duro.

3. RESULTADOS Y FRACTOGRAFÍA

El estado tensional que se obtiene en un ensayo de compresión diametral ha sido analizado por muchos autores con anterioridad y está suficientemente reflejado en la bibliografía [3,4]. Así, a una compresión diametral le sigue una tensión casi uniforme tractiva en la dirección perpendicular a la de aplicación de la carga que viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi dt} \quad (1)$$

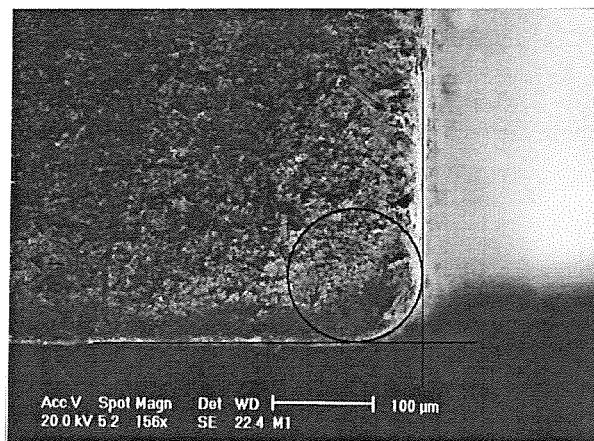


Fig. 1. Micrografía SEM de la punta de WC empleada en los ensayos

donde P es la carga aplicada; d es el diámetro medio del disco y t es la anchura del disco.

Análisis de tensión plana determinan que las tensiones que tenemos son:

- una tensión tractiva que actúa perpendicular a la carga aplicada y que es casi constante a lo largo de la sección:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi dt} = \sigma_3 \quad (2)$$

- una tensión compresiva en todos los puntos y que en el centro del disco es tres veces la de tracción:

$$\sigma_y = -\frac{6P}{\pi dt} = \sigma_1 = -3\sigma_x \quad (3)$$

En cualquier punto de la línea vertical central esta tensión compresiva viene dada por:

$$\sigma_y = -K\sigma_x \quad (4)$$

donde K varía desde 3 en el centro del disco hasta infinito (teóricamente) en los extremos.

Por otra parte según el criterio de fractura de máxima deformación a tracción cuando un material rompe de manera frágil, la ruptura ocurre cuando la deformación principal a tracción (ϵ_3) excede el valor crítico:

$$\epsilon_3 = [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]/E \quad (5)$$

En nuestro caso $\sigma_2 = 0$ y $\sigma_1 = -K\sigma_x$ y $\sigma_3 = \sigma_x$ K es 3 en el centro y crece según nos alejamos del centro. Luego:

$$\epsilon_3 E = \sigma_e = (1 + \nu K) \sigma_x \quad (6)$$

es la tensión de rotura efectiva donde:

ν es el coeficiente de Poisson (0'16)
 $K = \sigma_y / \sigma_x$

En cuanto a la superficie de contacto y la forma de ruptura Ovri & Davies distinguen varios modos de fractura para sus discos de Si_3N_4 [4]. En dicho artículo destacan dos modos de rotura:

- el modo de fractura normal
- el modo de fractura fisura-triple: la probeta se rompe en tres o cuatro trozos; hay una tensión lineal y dos colaterales

En nuestras curvas tensión-deformación se observan efectivamente dos regímenes con una tensión de modo normal ($\sigma = P/\pi dt$) y una de fisura-triple ($\sigma = (P+2P_f)/2\pi dt$) donde P es la carga final del primer régimen y P_f la carga final total [4].

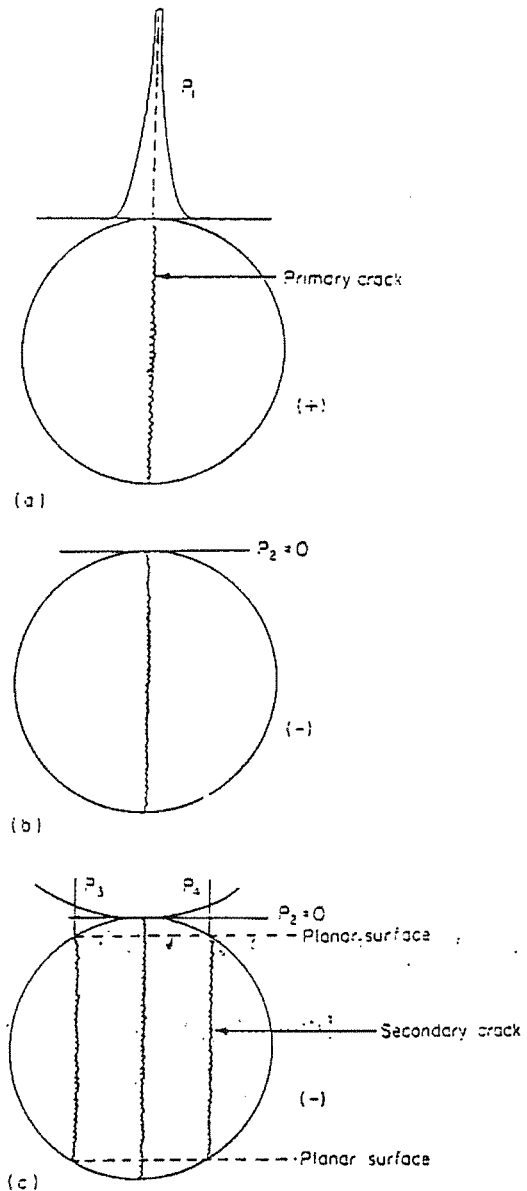


Fig. 2. Distribución de carga para el ensayo de compresión diametral: (a) modo de tensión normal después de cargar totalmente (+); (b) descarga (-), $P = (P_1 + P_2)/2 = P_1/2$; (c) modo de fractura fisura-triple, descarga tras el modo normal, $P = (P_1 + 2P_3)/4$ [4].

Consideramos en nuestro caso $t = 20\mu m$, anchura media de la zona central que se observa en la superficie de fractura de las probetas. Consideramos $d = 108\mu m$, diámetro medio de las probetas ensayadas.

Tabla 2. Cargas de rotura medidas en los ensayos de compresión diametral y tensiones tractivas asociadas

Ref.	Carga de rotura (N)		
	P (N)	P_f (N)	$\sigma_c = (P+2P_f)/(2\pi dt)$ (GPa)
10	7	15	2'73
9	10	18	3'38
8	7'7	16'5	3'00
7	10'5		
6	9	16	3'02
4	6'5	11'25	2'14
2	9	12	2'43
1	8	17	3'09

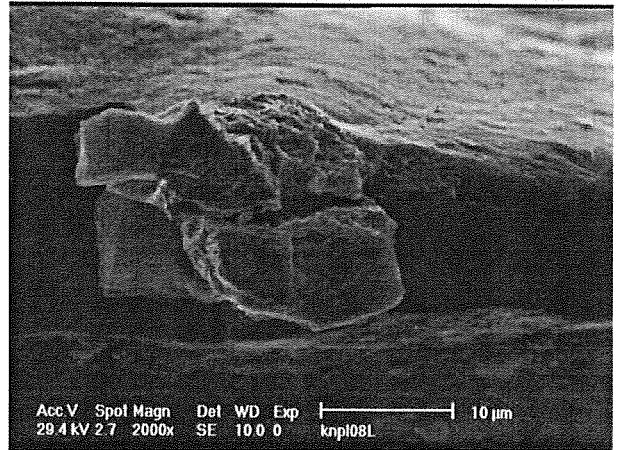


Fig. 5. Micrografía de SEM donde se observa un detalle de la superficie de la Fig. 3.

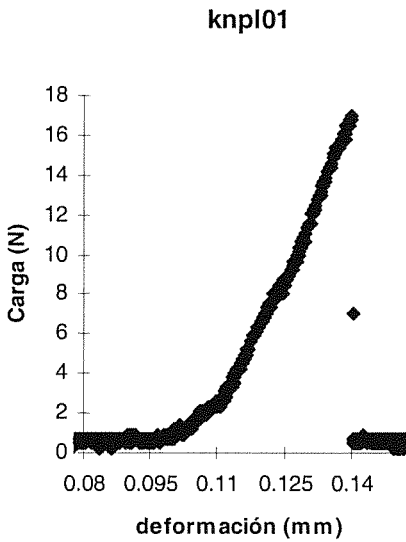


Fig. 3. Registro carga - desplazamiento de la probeta knpl01. Se observan los dos regímenes en la curva en la zona de carga.

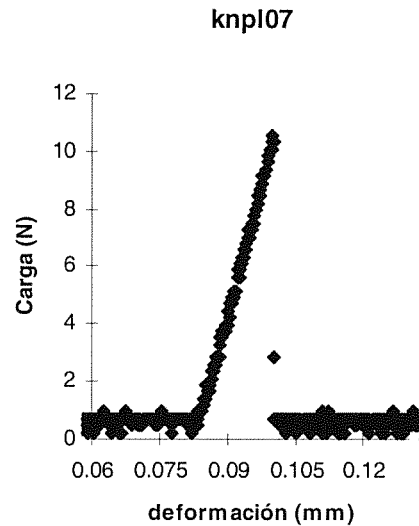


Fig. 6. Registro carga – desplazamiento de la probeta knpl07 que rompió sin modo de fisura triple.

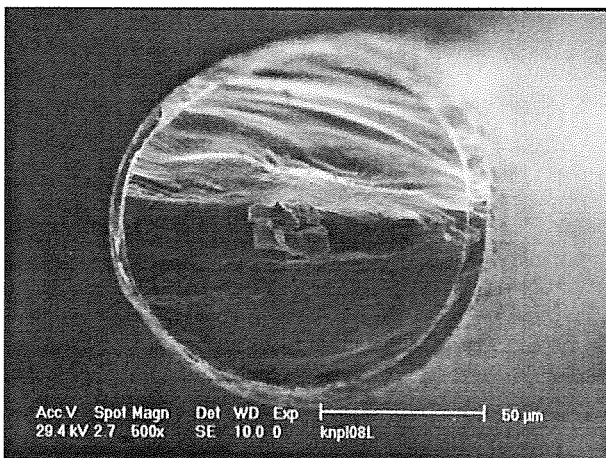


Fig. 4. Micrografía de SEM donde se observa superficie de fractura resultado del modo final de fisura triple.

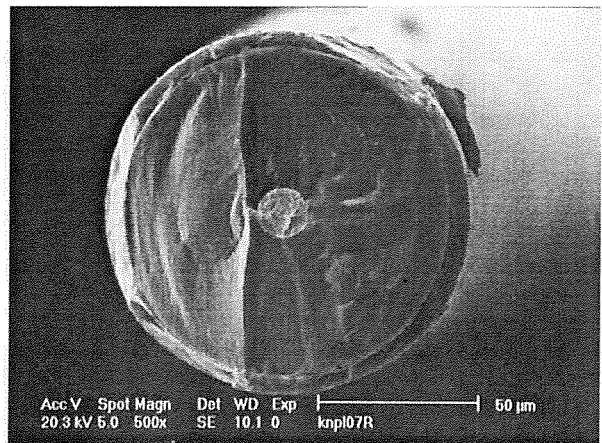


Fig. 7. Micrografía de SEM donde se observa la superficie de fractura resultante para la probeta knpl07.

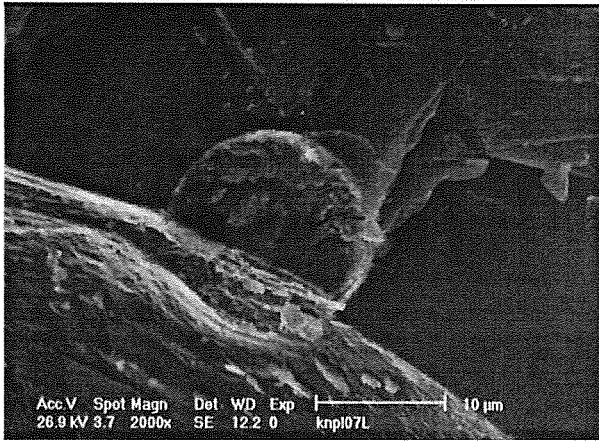


Fig. 8. Micrografía de SEM donde se observa un detalle de la superficie de fractura resultante para la probeta de la Fig. 6.

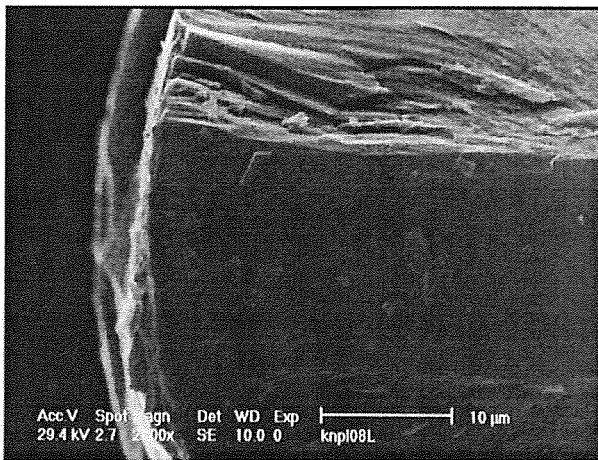


Fig. 9. Micrografía de SEM donde se observa la zona central de unas 20 µm.

Procediendo de esta manera se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 2 . Así pues, tenemos una tensión uniforme a tracción media de 2'83 GPa. De ésta obtenemos una tensión efectiva de 4'188 ($\nu = 0'16$), 5'377 GPa ($\nu = 0'3$, comportamiento elástico perfecto).

Ahora bien, si queremos comparar esta tensión efectiva de rotura con la tensión de rotura de los ensayos de tracción habrá que tener en cuenta el efecto volumen:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{V_D}{V_I} \right)^{1/m} \sigma_e \tag{7}$$

donde

$$V_D = t(0.3d)(0.2d) \tag{8}$$

corresponde al volumen de la región crítica, que es la que se vería afectada por el inicio de la fractura (se toma la zona en la cual la tensión efectiva toma valores desde el máximo valor hasta el 10% de dicho valor máximo [3].)

V_I = volumen de la probeta ensayada a tracción (se ensayaron tres longitudes 10, 100 y 200 mm)

m es el exponente de Weibull (~ 15 de los datos de compresión; ~ 18 de los de tracción).

De esta manera se ha construido la Tabla 3. Se observa que los resultados de los ensayos de compresión diametral, una vez corregidos por el efecto del volumen muestreado, coinciden con los obtenidos en los ensayos de tracción (presentados en anteriores contribuciones [1,2]); considerando el módulo de Weibull correspondiente a los ensayos de compresión y una rotura en el régimen elástico (en buena concordancia con el aspecto de la fractografía y de las curvas carga – desplazamiento).

Tabla 3. Comparación de predicciones a partir de los resultados de los ensayos de compresión diametral con los resultados de los ensayos de tracción.

	10 mm	100 mm	200 mm
Tensión de rotura a tracción real (GPa)	3'1	2'8	2'77
Tensión de rotura (m=15, ν=0.16)	2.33	2.00	1.91
Tensión de rotura (m=15, ν=0.3)	3'00	2'57	2'45
Tensión de rotura (m=18, ν=0.16)	2.57	2.26	2.18
Tensión de rotura (m=18, ν=0.3)	3.3	2.9	2.79

El análisis de la fractografía viene a corroborar las consideraciones sobre los modos de fractura que se han realizado a partir de las curvas carga – desplazamiento.

Las Figs. 3 y 4 muestran el aspecto típico de la superficie de fractura que se obtiene en este tipo de ensayos. Se observa que existe un meseta central. Fruto del modo de fractura triple que se ha mencionado con anterioridad.

Como contraste se presenta la fractografía de una probeta que rompió con modo simple (Figs. 6 y 7) acompañada de su curva carga –desplazamiento, con una sola curva de carga.

4. CONCLUSIONES

- Se presentan los resultados obtenidos para ensayos de compresión diametral cuchilla contra plano de fibras Sigma.
- En la compresión diametral de las fibras se observan dos tipos de fallo distintos : La fisura triple que da lugar a superficies de fractura con una meseta central y la fractura simple.
- Se presenta la predicción de los resultados de la tensión tractiva de rotura a partir de los ensayos de compresión diametral. Esto supone un avance respecto a los ensayos de tracción para este tipo de materiales, por el ahorro de material que supone y porque en este tipo de ensayos se evita el problema que pueda provenir de un mal alineamiento de las probetas.

Vapor-Deposited SiC Coatings”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 76, 8 (1993) 1965-1968.

- [7] Yamada, K. y Mohri, M., “Properties and Applications of Silicon Carbide Ceramics”, en *Silicon Carbide Ceramics-1*, Edt. S. Sóniya y Y. Inomata, Elsevier Applied Science, 1991, 13-44

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de un proyecto financiado por el Departamento de Industria, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco y la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.

6. REFERENCIAS

- [1] M.C. García Leiva, Ocaña Arizcorreta, I, Martín Meizoso, A., Gil Sevillano, J. y Fuentes Pérez, M. “Efecto de la longitud ensayada sobre la resistencia a tracción de fibras Sigma”, *Anales de Mecánica de la Fractura*, **15**, 303-307.
- [2] Ocaña Arizcorreta, I, Martín Meizoso, A., Gil Sevillano, J. y Fuentes Pérez, M., “Distribución de la resistencia mecánica de monofilamentos de SiC recubiertos de grafito”, *Anales de Mecánica de la Fractura*, **14** (1997) 288-293.
- [3] Shaw M. C., Braiden P. M. y DeSalvo G. J. “The Disk Test for Brittle Materials”, en *Journal of Engineering for Industry*, February (1975) 77-87
- [4] Ovri J. E. O. y Davies T.J. “Diametral Compression of Silicon Nitride”, *Materials Science and Engineering*, 96 (1987) 109-116.
- [5] Hirai, T. y Sasaki, M. “Silicon Carbide Prepared by Chemical Vapor Deposition”, en *Silicon Carbide Ceramics-1*, Edt. S. Sóniya y Y. Inomata, Elsevier Applied Science, 1991, 77-98.
- [6] Watkins, T.R., Green, D.J. y Ryba, E.R., “Determination of Young’s Modulus in Chemical