

Estudio mediante tres técnicas del módulo elástico de un material compuesto de Al(6061) con un alto contenido (40%vol) de SiC

R. Fernández*, U.D. Hünicke**, K.H. Mundt**, P. Acosta**, W. Kowalski**, G. Schulz** y G. González-Doncel*

Resumen El objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento elástico de un material compuesto con refuerzo discontinuo, Al(6061)-40vol%SiC, mediante tres técnicas diferentes: extensometría para ensayos uniaxiales convencionales, elasticímetro pendular y mediante medidas de la velocidad de propagación de señales acústicas en el material. El alto contenido de la fase cerámica en este material le confiere elevada rigidez sin que su densidad aumente significativamente por lo que lo hacen adecuado como material estructural en diversas aplicaciones en el sector del transporte (automoción, aeroespacial).

Palabras clave Materiales Compuestos. Propiedades Elásticas. Técnicas Experimentales.

Study by three techniques of the elastic response of Al(6061) matrix composite material with a high content (40%vol) of SiC

Abstract The purpose of this investigation is to study the elastic behavior of a discontinuously reinforced composite material, Al(6061)-40vol%SiC, by using three different procedures: Extensometry in uniaxial testing, pendulum elasticimeter, and propagation of acoustic signals in the material. The high ceramic content of this material provides it with a high stiffness without a significant increase in density. Because of this, the material is suitable as structural component in the automotive and aerospace industry.

Keywords Composite Materials. Elastic Behavior. Experimental Techniques.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los frutos que se consigue al añadir partículas cerámicas de elevada rigidez (como carburo de silicio, SiC), a los metales y aleaciones, en particular aleaciones ligeras (e.g. aluminio), es el de mejorar significativamente las propiedades elásticas del material compuesto resultante. Por ello, y en tanto que la adición de la fase cerámica no incrementa su densidad significativamente, estos materiales resultan muy adecuados y prometedores como componentes estructurales en el sector del transporte^[1] (aeroespacial y terrestre). Con el fin de evaluar el campo de aplicabilidad de estos materiales es importante conocer las características elásticas que resultan tras la adición del refuerzo. El objetivo de este trabajo es, por ello, determinar estas propieda-

des mediante diferentes técnicas en un material con un elevado contenido de SiC. Se ha realizado, además, una comparación de los resultados obtenidos a la luz de distintos modelos.

2. PARTE EXPERIMENTAL

El material objeto de esta investigación, en forma final de barra extruída de 46 mm de diámetro, es Al(6061)-40 vol % SiC y se obtuvo mediante una vía pulvimetalúrgica. Su microestructura se estudió mediante microscopía óptica y electrónica de barrido en muestras preparadas con técnicas convencionales de metalografía. Además, se determinó la textura tanto de la matriz de Al como de la fase reforzante mediante difracción de rayos-x. Resumidamente, se observó una microestructura con una

(*) Departamento de Metalurgia Física, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), C.S.I.C. Av. de Gregorio del Amo, 8, 28040 Madrid (España).

(**) Institut für Werkstoffkunde, Universität Rostock, Albert Einstein Strasse 12, 18051 Rostock (Alemania).

distribución muy uniforme del refuerzo. Las partículas reforzantes, ligeramente alargadas ($0,75 \mu\text{m}$ de diámetro y $1,22 \mu\text{m}$ de longitud en promedio), están, mayoritariamente, alineadas con el eje de extrusión, lo que le confiere un comportamiento plástico anisótropo^[2]. Por otro lado, se observó una débil textura en la matriz, con granos mayoritariamente orientados al azar^[2]. El comportamiento elástico del material se caracterizó utilizando tres técnicas diferentes y, fundamentalmente, en la dirección paralela al eje de extrusión:

- a) Extensometría, en una máquina de ensayos mecánicos mediante ensayos de tracción (axisimétricos) según norma^[3]. Se determinó, en función del esfuerzo aplicado, la deformación a lo largo de la dirección de ensayo para determinar el módulo de Young, E , y la contracción lateral para calcular el coeficiente de Poisson, μ . En la figura 1a) se muestra el dispositivo empleado. La longitud útil de la muestra (distancia entre cuchillas) era de 50 mm y el diámetro de 5,6 mm.
- b) Medidas en un elasticímetro pendular. El módulo elástico de la muestra es proporcional al periodo de oscilación de los dos péndulos de que consta (y que están soportados por la muestra). En la figura 1b) se muestra el dispositivo empleado para estas medidas. La muestra utilizada consistió en una barra cilíndrica de 80 mm de longitud útil y 5,64 mm de diámetro con un

muy buen acabado superficial. Para estas medidas, se procedió, en primer lugar, a la calibración del dispositivo mediante distintos materiales de módulo conocido. En la figura 2 se muestran tanto los materiales empleados para esta operación como la curva de calibración obtenida.

- c) Medidas de la velocidad de propagación de señales acústicas (ultrasonidos). Este tipo de medidas relaciona la velocidad de propagación de señales acústicas, tanto longitudinales como transversales, con las constantes elásticas del material. Las muestras utilizadas consistieron en piezas sobre las que se hacía propagar las señales acústicas en dirección paralela y perpendicular a la del eje de extrusión. La figura 1c) muestra un esquema de esta técnica.

En todos los casos se realizó un número significativo de medidas que asegurara la reproducibilidad y validez de las mismas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este material, aunque muy resistente, tiene un régimen plástico muy limitado de modo que a temperatura ambiente éste rompe a unos 730 MPa sin estricción y de manera muy frágil.

Las medidas extensométricas se realizaron en una máquina de ensayos mecánicos SERVOSIS, a diferentes velocidades de deformación para tener

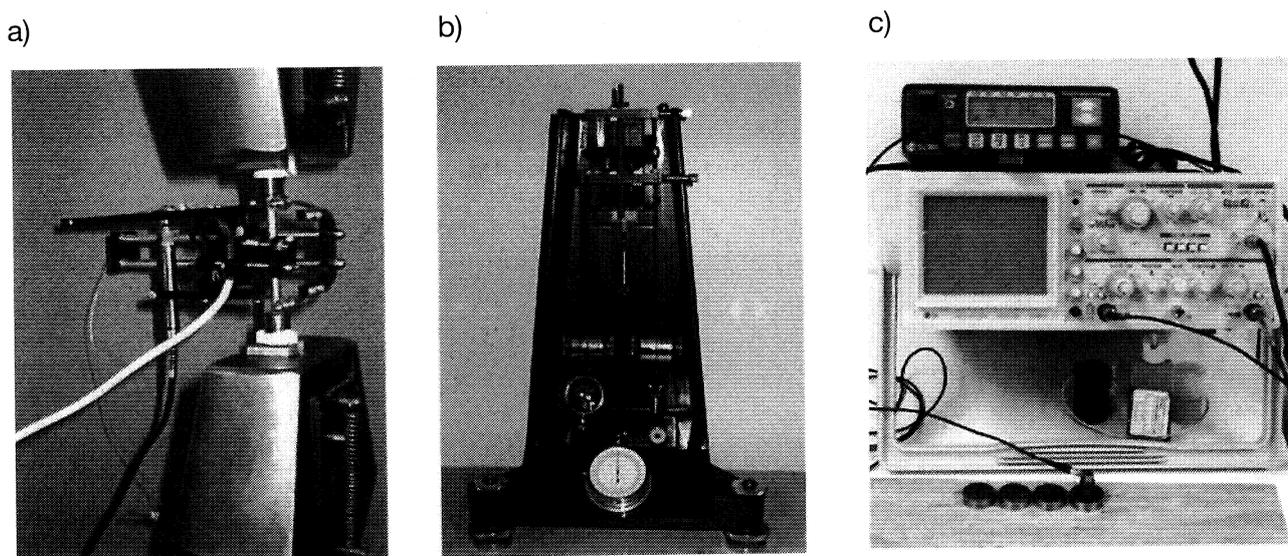


Figura 1. Dispositivos experimentales para la determinación de propiedades elásticas del material Al(6061)-40vol%SiC: a) Extensometría axial y radial. b) Elasticímetro pendular. c) Ultrasonidos.

Figure 1. Experimental techniques employed for determining the elastic properties of Al(6061)-40vol%SiC: a) Axial and radial extensometry. b) Pendulum elasticimeter. c) Acoustic signals propagation.

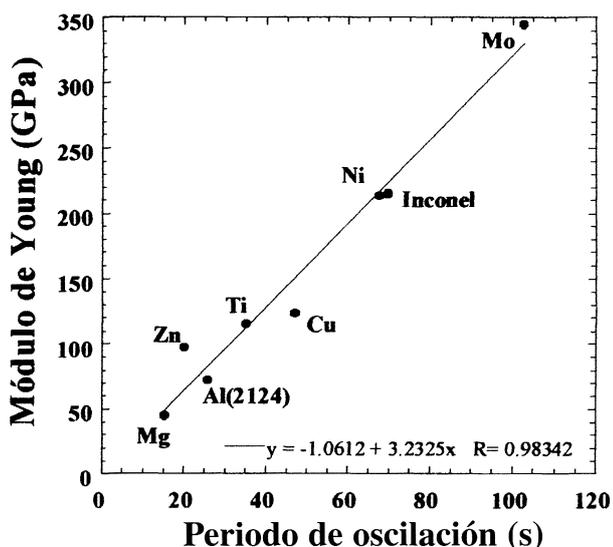


Figura 2. Curva de calibración del elasticímetro pendular para la medida del módulo de Young en la dirección longitudinal de la barra.

Figure 2. Calibration curve of the elasticimeter for Young Modulus measurement along the long bar direction.

en consideración posibles efectos anelásticos de todo el sistema de medida. Las medidas se realizaron aplicando una carga (uniaxial) conocida y midiendo tanto el alargamiento en la dirección de la aplicación de la carga como la contracción lateral para los distintos valores del esfuerzo aplicado. La relación entre esta contracción lateral y la deformación en la dirección de la aplicación de la carga es el denominado coeficiente de Poisson.

Para las medidas en el elasticímetro pendular, ha sido preciso hacer una calibración del dispositivo, previa a las medidas. En la figura 2 se muestra la curva de calibración obtenida a partir de diversos metales de módulo conocido. El coeficiente de correlación, R, alcanza un valor de R=0,983.

Para las medidas mediante señales ultrasónicas, se recurre a la teoría elasto-acústica^[4]. Esta teoría relaciona la velocidad de propagación de señales acústicas (longitudinales y transversales) en un sólido cristalino con estructura cúbica con sus constantes elásticas mediante las siguientes ecuaciones:

$$E = 2\rho v_T^2 \left[\frac{2 - 3/2 \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2}{1 - \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2} \right] \quad \mu = \frac{1 - 1/2 \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2 \right]}$$

donde, v_L y v_T son, respectivamente, las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales y ρ la densidad del material (para este material se encontró $\rho=2,92 \text{ g/cm}^3$).

Por ello, para estas medidas se utilizaron dos tipos de palpadores, uno para señales acústicas longitudinales (señales de 15 MHz) y otro para señales transversales (4 MHz). De esta forma, se pudo medir tanto v_L como v_T en probetas de espesor conocido tanto en la dirección paralela al eje de extrusión como en la dirección perpendicular a éste.

Se han determinado así, las constantes E y μ utilizando las tres técnicas descritas. Las demás constantes elásticas (módulo de cizalla, G, y módulo de compresibilidad, κ) se obtienen a partir de las anteriores por medio de las relaciones clásicas de la elasticidad lineal:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad \kappa = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

En la tabla I se resumen todos los valores de E y μ obtenidos mediante los tres procedimientos. Se puede apreciar cierta dispersión entre los valores del módulo de Young; no así para el valor de la contracción de Poisson, muy similar entre los alcanzados con los ensayos de extensometría (solamente en la dirección longitudinal) y mediante la técnica de propagación de señales acústicas. Los valores encontrados están de acuerdo con datos encontrados en la literatura para materiales similares^[5 y 6].

En la figura 3 se comparan los datos experimentales de E con los predichos por un modelo sencillo basado en la regla de las mezclas para los casos de iso-deformación e iso-tensión (las expresiones utilizadas se encuentran en la misma figura 3) y

Tabla I. Constantes elásticas medidas mediante las tres técnicas empleadas. (Los símbolos || y \perp se refieren a las direcciones paralela y perpendicular al eje de extrusión del material).

Table I. Elastic constants obtained by the three techniques employed. (Symbols || and \perp denote parallel and perpendicular directions to the extrusion axis, respectively).

	Extensometría	Elasticímetro	Ultrasonidos
E (GPa), ; \perp	166,8	160	146,78; 135,23
μ , ; \perp	0,345	-	0,343; 0,285

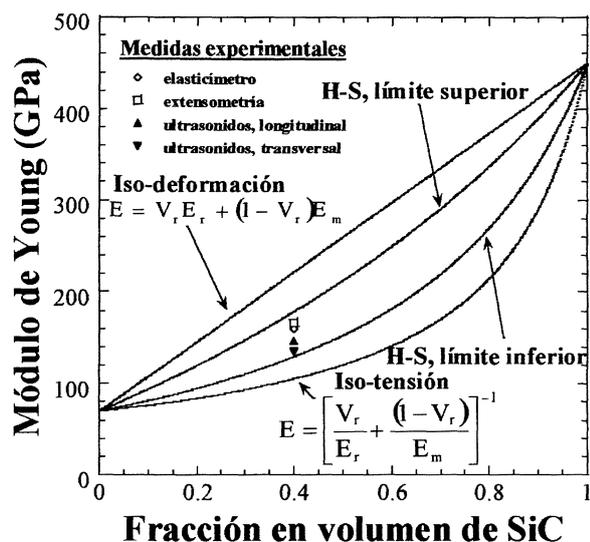


Figura 3. Datos experimentales obtenidos mediante las tres técnicas utilizadas. Los datos se comparan con los predichos por un modelo de iso-deformación e iso-tensión (regla de las mezclas) para un material con refuerzo continuo y por el modelo variacional propuesto por Hashin y Shtrikman (modelo H-S)^[7]. Las constantes elásticas de las fases Al(6061) y SiC (β) utilizadas para la predicción de los modelos se resumen en la Tabla II. Los términos V_m y V_r se corresponden con la fracción en volumen de la matriz y el refuerzo, respectivamente ($V_m + V_r = 1$).

Figure 3. Experimental data obtained by means of the three techniques. Data are compared to those predicted by the iso-strain and iso-stress model (rule of mixtures) for a continuously reinforced material and by the variational model proposed by Hashin and Shtrikman (H-S model)^[7]. The elastic constants of (6061)Al and SiC (β) phases used in the predictions are summarized in Table II. Terms V_m and V_r denote volume fraction of matrix and reinforcement, respectively ($V_m + V_r = 1$).

con el modelo propuesto por Hashin y Shtrikman^[7], que predice un margen más estrecho entre los límites superior e inferior del módulo de Young.

Tabla II. Constantes elásticas, E y ν , de las fases Al(6061) y SiC (β)^[8], utilizadas en la predicción del módulo de Young en función de V_r , por los modelos utilizados y descritos en la figura 3 (regla de las mezclas: iso-deformación e iso-tensión, y modelo H-S de Hashin y Shtrikman)

Table II. Elastic constants, E and ν , of Al(6061) and SiC (β)^[8], utilized in the prediction of Young modulus as a function of V_r , by the models described in figure 3 (rule of mixtures: iso-strain and iso-stress and the H-S model by Hashin and Shtrikman).

	Al(6061)	SiC
Módulo de Young (GPa)	69,8	450
Coefficiente de Poisson	0,349	0,19

El modelo de Hashin y Shtrikman (H-S), basado en principios variacionales aplicados a la teoría de la elasticidad, resulta en las siguientes expresiones para los límites superior e inferior (indicado en las ecuaciones por los subíndices 1 y 2, respectivamente) del módulo de compresibilidad y de cizalla en función de la fracción en volumen de cada una de las fases: matriz, V_m , y refuerzo, V_r ;

$$\kappa_1 = \kappa_m + \frac{V_r}{\frac{1}{\kappa_r - \kappa_m} + \frac{3V_m}{3\kappa_m + 4G_m}}$$

$$\kappa_2 = \kappa_r + \frac{V_m}{\frac{1}{\kappa_m - \kappa_r} + \frac{3V_r}{3\kappa_r + 4G_r}}$$

$$G_1 = G'_m + \frac{V_r}{\frac{1}{G_r - G_m} + \frac{6(\kappa_m + 2G_m)V_m}{5G_m(3\kappa_m + 4G_m)}}$$

$$G_2 = G_r + \frac{V_m}{\frac{1}{G_m - G_r} + \frac{6(\kappa_r + 2G_r)V_r}{5G_r(3\kappa_r + 4G_r)}}$$

Aplicando a continuación la ecuación que relaciona E con G y κ ($E = 9\kappa G / [3\kappa + G]$), se obtienen las expresiones de E (límite superior e inferior) en función de V_r , cuya representación es la que se muestra en la figura 3.

Se puede apreciar que todos los valores experimentales medidos con las tres técnicas utilizadas, vistos en el contexto de la figura 3, no difieren mucho unos de otros. Todos ellos están comprendidos dentro de los límites predichos por el modelo H-S, más restrictivo que el de las mezclas. La diferencia en el módulo de Young, obtenida por las tres técnicas descritas, se puede asociar a una diferencia en el estado de tensiones al que se somete el material durante la medida. Se observa que los valores de E medidos mediante la técnica de ultrasonidos a lo largo de las direcciones longitudinal y transversal son, razonablemente, similares. En contraste, los valores de dureza Vickers (comportamiento plástico) para distintos tiempos de tratamiento a 146 °C arrojan una diferencia sistemática de unos 40 HVN entre las medidas obtenidas a lo largo de la dirección longitudinal (≈ 260 HVN) y la transversal (≈ 220 VHN)^[2]. Por todo ello, se

puede afirmar que este material presenta un comportamiento elástico de carácter más isótropo que el comportamiento plástico, de carácter más anisótropo^[2].

4. CONCLUSIONES

A continuación, se resumen las conclusiones más relevantes de este trabajo:

- Se ha estudiado el comportamiento elástico de un material compuesto con un elevado contenido de fase reforzante en forma discontinua, Al(6061)-40 vol % SiC. Se han utilizado tres técnicas diferentes para esta caracterización: Extensometría, un elasticómetro pendular y técnicas de ultrasonidos. (En este último caso, ha sido posible determinar las características elásticas también en la dirección transversal al eje de extrusión del material).
- El módulo elástico de este material, comparado con el de la matriz, es muy alto debido al elevado contenido de refuerzo cerámico. A lo largo de la dirección longitudinal (eje de extrusión), éste oscila entre 167 GPa, valor máximo alcanzado mediante la extensometría, y 147 GPa, valor medido mediante las técnicas de ultrasonidos.
- Estos valores están en consonancia con datos de la literatura para materiales similares y se encuentran entre los predichos por el modelo variacional de Hashin y Shtrikman. El material tiene un comportamiento elástico más isótropo que el plástico, de carácter marcadamente anisótropo.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de una investigación financiada por los proyectos de investigación: MAT94-0887 y MAT97-1059-C2 de la CICYT y 07N/0066/98 de la CAM. Parte del trabajo ha sido posible gracias a la ayuda de la Acción Integrada Hispano-Alemana, HA970045.

REFERENCIAS

- [1] M.J. KOCZAK, S.C. KHATRI, J.E. ALLISON Y M.G. BADER, en *Fundamentals of Metal Matrix Composites*. Eds. S. Suresh, A. Mortensen. y A. Needleman, (Eds.) 1993, pp. 297-326.
- [2] R. FERNÁNDEZ, A. BORREGO, M.C. CRISTINA, G. GONZÁLEZ-DONCEL Y J. WOLFENSTINE, *III Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, A. Corz y J.M. Pintado (Eds.). Benalmádena, Málaga, 1999, pp. 93-100.
- [3] *Annual Book of ASTM Standards*, Section 3, 1995, normas E-111 y E-132.
- [4] E.A.W. MÜLLER, *Handbuch der zerstörungsfreien Materialprüfung*, R. Oldenbourg München, 1975.
- [5] G. IBE, *III. Congreso Internacional sobre Caracterización no destructiva de Materiales*, Saarbrücken, Alemania, 3-6 Octubre, 1988, pp. 163-172.
- [6] D.F. LEE, K. SALAMA Y E. SCHNEIDER, *III. Congreso Internacional sobre Caracterización no destructiva de Materiales*, Saarbrücken, Alemania, 3-6 Octubre, 1988, pp. 173-183.
- [7] Z. HASHIN Y S. SHTRIKMAN, *J. Mech. Phys. Solids*, 11 (1963), pp. 127-140.
- [8] *Handbook of Materials Science*. Vol II (Metals, Composites, Refractory Materials), p. 378, Lynch, Ch. T., CRC Press (1975).