

## EFFECTO DE LAS TENSIONES RESIDUALES DE CURADO EN LOS DESPEGUES ENTRE FIBRA Y MATRIZ

del Caño, J.C.<sup>1</sup>; Paris, F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Resistencia de Materiales y Estructuras. ETS Ingenieros Industriales de Valladolid. Paseo del Cauce s/n. 47011 Valladolid. Tfno: 983-423386. Fax: 983-423310

<sup>2</sup> Dpto. Mecánica de Medios Continuos. ETS Ingenieros Industriales de Sevilla. Av. Reina Mercedes s/n. 41012 Sevilla. Tfno: 95-4557001. Fax: 95-239888

**Resumen:** Se presenta un estudio numérico, -basado en el Método de los Elementos de Contorno-, del efecto de las tensiones residuales debidas al curado de la matriz sobre la propagación de grietas de interfase entre las fibras y la matriz, cuando el material es cargado transversalmente a las fibras. Se analiza una configuración de una celda básica del material, y otra de fibra única, más apta para posibles ensayos experimentales. Las propiedades de los materiales corresponden a fibra de vidrio y matriz epoxy.

**Abstract:** A numerical study, -based on the Boundary Element Method-, analyzing the effect of residual stresses resulting from the matrix curing process on the propagation of fiber-matrix interface cracks is presented. Remote loading acting transversely to the fiber direction is assumed. Two configurations are analyzed: a basic cell configuration and a single fiber one, the last one being better suited for possible experimentation. The considered properties of the materials correspond to glass fibers and epoxy matrix.

### 1.- PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de fabricación de materiales compuestos reforzados con fibra incluye la transición de fase líquida a fase sólida del material de la matriz, transición denominada proceso de curado. Durante este curado se produce una contracción en volumen de la matriz, que conduce a un estado de tensiones residuales más o menos importante en el material, tal como indican Zhu & Achenbach 1991, entre otros muchos autores. En general se admite que el valor de la contracción de curado de la matriz toma valores entre el 1% y el 2% (Hull 1987, cap. 2), dependiendo del tipo de matriz, de si el curado se realiza o no a temperatura ambiente, etc.

En este trabajo se investiga el posible efecto de las tensiones residuales de curado en la propagación de grietas de despegue en la interfase entre la fibra y la matriz cuando actúan tracciones transversalmente a las fibras. Estas condiciones de carga son particularmente desfavorables para el material, y se producen frecuentemente por motivos bien conocidos. Como indica la figura 1a, realizaremos una modelización de dos fases

(fibra y matriz) para el estudio del problema. Incorporaremos al modelo las propiedades de fractura de la interfase, pero no sus propiedades estrictamente elásticas. Adoptamos este procedimiento estimando que las propiedades elásticas de una delgada capa de interfase existente entre la fibra y la matriz no influirán apreciablemente en el comportamiento del material. Una comprobación muy significativa al respecto puede encontrarse en el trabajo de Benveniste, Dvorak & Chen 1989.

**2.- TIPOLOGÍA DEL PROBLEMA EN ELASTICIDAD LINEAL**

Desde el punto de vista de la teoría de la elasticidad lineal, el problema de una grieta entre dos materiales distintos ha sido estudiado por England 1965, 1966, y por Comninou 1977, 1979. Las soluciones de England están obtenidas bajo hipótesis de bordes de grieta libres, y contienen singularidades oscilantes de tensión e interpenetraciones entre las caras de grieta. No han sido definidos de modo satisfactorio factores de intensificación de tensiones para este tipo de soluciones, aunque la Tasa de Liberación de Energía (G) existe en su sentido habitual. Las soluciones de Comninou incluyen la posibilidad de contacto entre las caras de grieta, con lo que se evitan las interpenetraciones. La estructura de la singularidad de tensiones en estas soluciones es no oscilante, aunque ciertamente atípica, como se indica en la figura 1b.

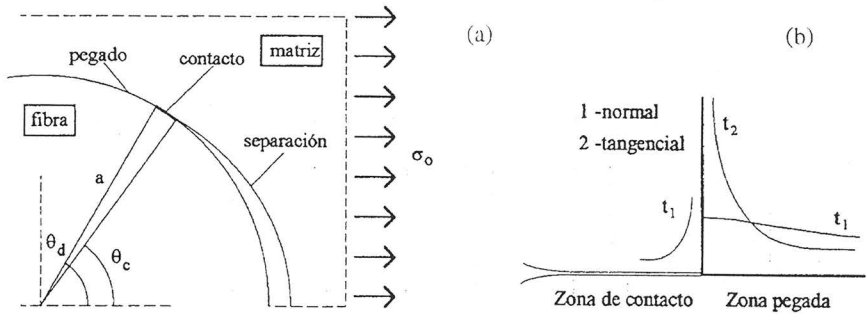


Figura 1.- a) Configuración tipo de despegue fibra-matriz. b) Tensiones tipo en la solución con contacto.

**3.- PARAMETRIZACIÓN DEL PROBLEMA**

Notaremos la tasa de liberación de energía al avanzar la grieta como  $G(\theta_d, \sigma_0)$ . Si sólo existe tensión remota como carga, G será proporcional al cuadrado de la tensión remota, y la tasa de energía adimensional definida por (1) dependerá del ángulo de despegue solamente.

$$\bar{G}(\theta_d) = G(\theta_d, \sigma_0) \frac{\mu^m}{a\sigma_0^2} \tag{1}$$

$$P = \frac{\sigma_0 / \mu^m (2 + 2\nu^m)}{\alpha_T^m |\Delta T|}$$

Rango aproximado de valores:  $0.27 < P < 3.22$  (2)

Modelaremos la contracción de curado de la matriz mediante una contracción térmica, independientemente de cuál sea su verdadero origen. Caracterizaremos esta contracción mediante el parámetro P (ecuación 2). El rango razonable de valores de este parámetro para los materiales que consideramos, se puede obtener para mínima contracción (1%) con máxima tensión remota (al menos  $60 \times 10^6$  Pa), y máxima contracción (2%) con mínima tensión remota para la que se observan despegues (no menos de  $10 \times 10^6$  Pa).

**4.- BREVE APUNTE SOBRE LA TÉCNICA NUMÉRICA**

Para llevar a cabo los análisis elásticos necesarios, se ha realizado una implementación particular del Método de los Elementos de Contorno en combinación con un algoritmo para el tratamiento de problemas de contacto, basado en un enfoque del tipo "nodo a nodo". Se emplean elementos singulares junto al borde de grieta, y cuando se capta contacto, se calcula el Factor de intensificación de tensiones  $K_{II}$  en base a los resultados en esos elementos, y a partir de él se calcula G, con quien guarda una relación directa (Comninou 1977). Cuando la discretización empleada no capta zona de contacto, G se calcula a partir de la solución numérica, aproximando el límite (3) por las integrales que contiene, evaluadas entre  $0.0001^\circ$  y  $0.5^\circ$ , lo que conlleva un error estimado del 2%.

$$G = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} \left[ \int_0^\delta t_1(r) u_1(\delta - r) dr + \int_0^\delta t_2(r) u_2(\delta - r) dr \right] \quad (3)$$

**5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS TENSIONES RESIDUALES DE CURADO**

**5.1.- Análisis de una celda básica del material.**

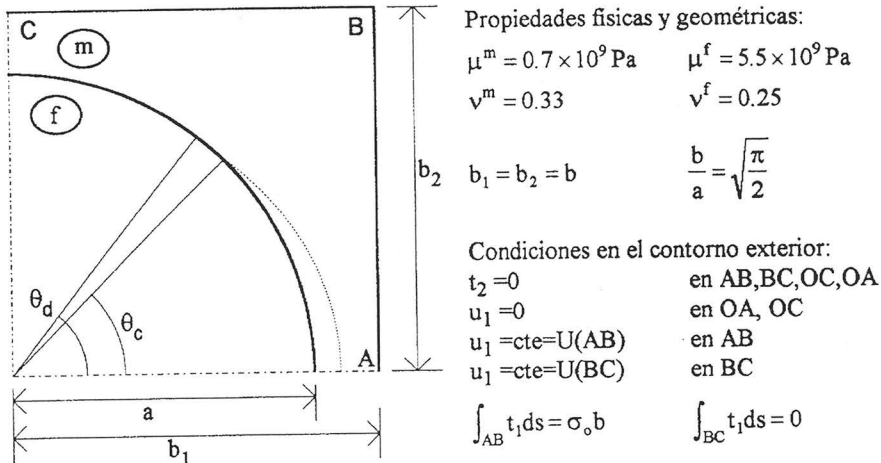


Figura 2.- Configuración de celda básica analizada.

Analizaremos seguidamente una configuración de celda básica del material que fue utilizada por Achenbach & Zhu 1989, y que se muestra en la figura 2. Las propiedades

de los materiales y demás datos relevantes coinciden con las utilizadas por estos autores, y se listan junto a la misma figura. Las condiciones de contorno en los bordes de la celda están dadas en forma no explícita, habiendo sido necesario el cálculo de las incógnitas adicionales de desplazamiento normal de las caras horizontal y vertical, así como incluir las dos ecuaciones integrales (previamente discretizadas) que se indican. La discretización realizada emplea elementos singulares continuo-discontinuos de dos nodos junto al borde de grieta. Hasta  $+0.5^\circ$  desde el borde de grieta se usan elementos rectos continuos de dos nodos, y en el resto de la interfase, elementos circulares continuos de tres nodos. Los nodos más próximos al borde de grieta están a  $0.0001^\circ$ , siendo cada sucesiva distancia internodal aproximadamente el doble que la anterior, según nos alejamos del borde de grieta.

El tamaño de la zona de contacto obtenida es mostrado en la figura 3 en función del ángulo de despegue  $\theta_d$ , para ausencia de tensiones residuales ( $P=\infty$ ), y para un valor típicamente posible  $P=1.61$ . Aunque se aprecia un cierto incremento del tamaño de la zona de contacto, quizá lo más significativo sea que la misma se mantiene pequeña en ambas circunstancias (nótese que la escala del eje de ordenadas no es lineal, y que incluso para despegue total el semiángulo de contacto apenas alcanza los  $10^\circ$ ).

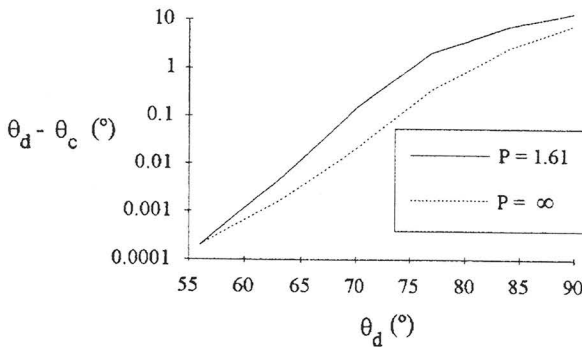


Figura 3.- Zona de contacto en función del despegue (celda básica).

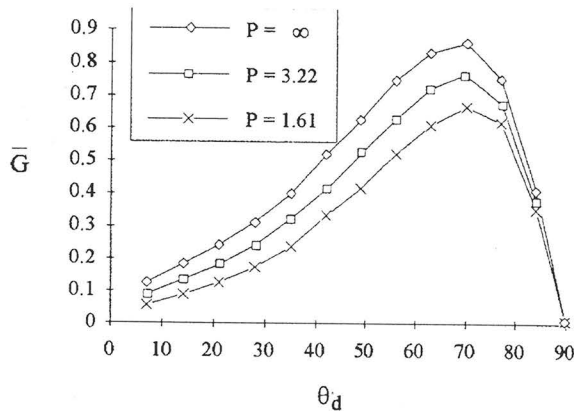


Figura 4.- Tasa adimensionalizada de Liberación de Energía en función del despegue.

La figura 4 muestra la Tasa de Liberación de Energía  $G$  obtenida a partir de la solución numérica, adimensionalizada según (1). Se observan descensos apreciables de esta magnitud respecto del caso sin tensiones residuales, para los valores de contracción de curado representados. Cabe concluir de lo anterior que la contracción de curado de la matriz afectará significativamente a la sollicitación en el borde de grieta, resultando ser un efecto protector contra la propagación de la misma.

**5.2.- Análisis de configuración de fibra única.**

Seguidamente se analiza una configuración que consta de una única fibra embebida en una matriz de gran tamaño (figura 5), que sería más apta para ensayos de laboratorio que un material en su forma usual, pues se eliminan dispersiones en la disposición de las fibras, sus diámetros, etc.

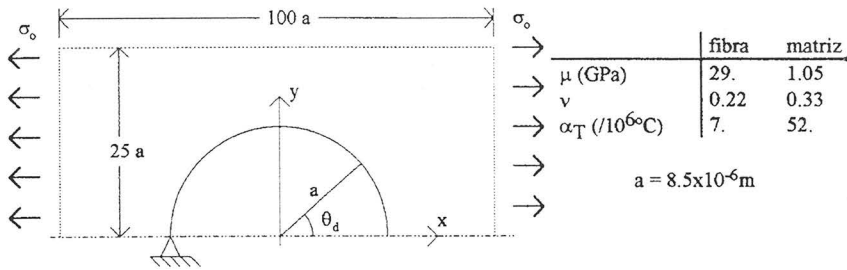


Figura 5.- Configuración de fibra única analizada, y parámetros físicos considerados.

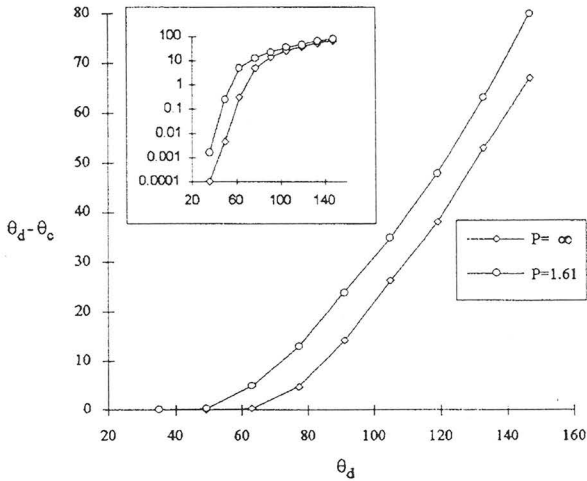


Figura 6.- Tamaño de la zona de contacto en función del ángulo de despegue.

La figura 6 muestra el tamaño de la zona de contacto en función del ángulo de despegue para el mismo nivel de tensiones residuales usado en la figura 3. Se aprecia un incremento de su tamaño de unos  $10^\circ$  para un amplio rango de valores del despegue.

Por otra parte, el tamaño de la zona de contacto es siempre mucho mayor que el obtenido en la configuración de celda básica anterior.

La figura 7 permite apreciar descensos muy acusados de la Tasa de liberación de Energía para los dos niveles de tensión residual representados, respecto del caso sin tensiones residuales. Esto indica que la contracción de curado de la matriz tendrá un efecto muy acusado, y nuevamente protector, en la propagación de las grietas entre fibra y matriz.

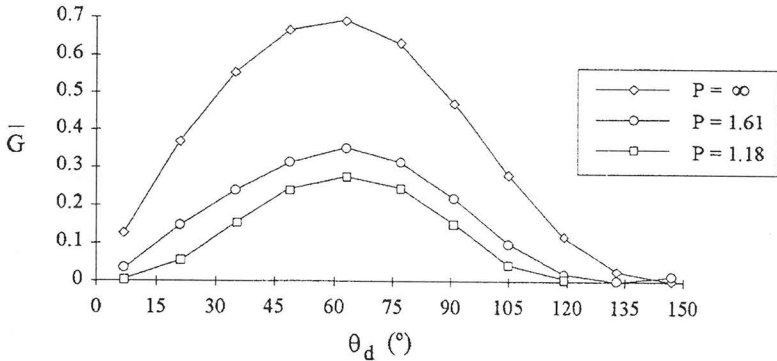


Figura 7.- Tasa adimensionalizada de Liberación de Energía en función del despegue.

## 6.- REFERENCIAS

- 1.-Achenbach, J.D. & Zhu, H. (1989) 'Effect of interfacial zone on mechanical behaviour and failure of fiber-reinforced composites', J. Mech. Phys. Solids 37, No. 3, p.381
- 2.-Benveniste, Y, Dvorak, G.J. & Chen, T (1989) 'Stress fields in composites with coated inclusions', Mechanics of Materials 7, p.305
- 3.-Comninou, M. (1977) 'The interface crack' ASME Journal of Applied Mechanics, December, p.631
- 4.-Comninou, M. & Schmueser, D. (1979) 'The interface crack in a combined tension-compression and shear field', ASME J. Appl. Mechanics 46, p.345
- 5.-England, A.H. (1965) 'A crack between dissimilar media', ASME J. Appl. Mechanics, June, p.400
- 6.-England, A.H. (1966) 'An arc crack around a circular elastic inclusion', ASME J. Appl. Mechanics, September, p.637
- 7.-Hull, D. (1987) 'Materiales compuestos', Ed. Reverté
- 8.-Zhu, H. & Achenbach, J.D. (1991) 'Radial matrix cracking and interphase failure in transversely loaded fiber composites', Mechanics of Materials 11, p.347