

## Inicio y crecimiento de grietas de interfase entre fibra y matriz en un grupo de fibras sometido a cargas transversales

L. Távara, V. Mantič, E. Graciani, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla

### RESUMEN

En el presente estudio numérico se caracteriza el inicio y crecimiento de despegues en la interfase entre fibra y matriz en un grupo de fibras sometido a cargas transversales, ampliando los resultados obtenidos por los autores en trabajos previos en los que se analizaba una única fibra aislada. Se considera un problema simplificado en relación a una lámina unidireccional real, con tres fibras embebidas en una matriz cuyas dimensiones externas son mucho más grandes que el radio de las fibras. El objetivo es predecir por un lado las cargas de fallo (cargas críticas) para un pequeño grupo de fibras, y por otro lado los ángulos de crecimiento inestable de los despegues correspondientes a estas cargas críticas.

### 1. INTRODUCCIÓN

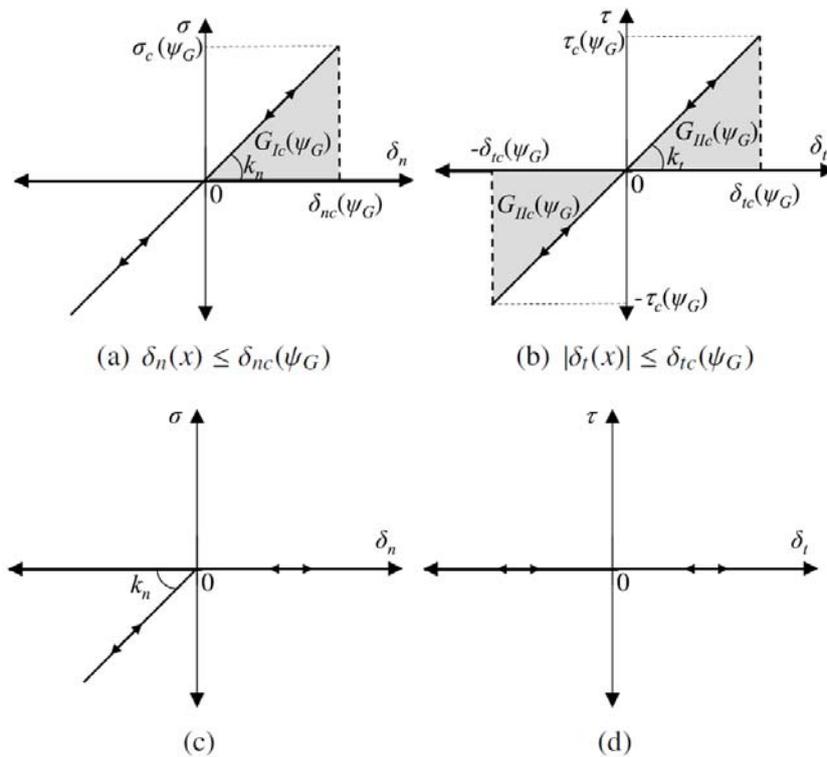
Uno de los mecanismos de rotura más comunes en láminas unidireccionales de materiales compuestos ante la aplicación de cargas en la dirección perpendicular a las fibras es el denominado fallo de la matriz o fallo entre fibras. Este mecanismo se caracteriza por la aparición de despegues en las interfases entre las fibras y la matriz cuando está dominado por cargas de tracción. La conexión entre los despegues iniciales en las interfases y la macrogrieta final pasa por el crecimiento de estos despegues, convertidos en grietas de interfase, a lo largo de las propias interfases, su desvío posterior para internarse en la matriz, y la coalescencia final de las grietas provenientes de distintas interfases (París et al. 2007, Távara et al. 2009, Távara 2010, Távara et al. 2011).

El problema de tres inclusiones circulares (2D) o cilíndricas (3D) inmersas en una matriz elástica sometida a una carga uniaxial transversal es estudiado numéricamente. El modelo numérico utilizado en este estudio se basa en el Método de los Elementos de Contorno junto con el modelo de interfase elástica lineal-frágil (Távara 2010, Távara et al. 2011). El modelo de interfase elástica lineal-frágil (interfase débil) con una ley de comportamiento elástica lineal-frágil para modo mixto de fractura ha demostrado ser útil para estudiar y caracterizar el comportamiento de la interfase entre fibra y matriz (Távara et al. 2011). En este modelo se considera una (posiblemente ficticia) interfase, una capa fina de material entre dos materiales adyacentes, representada mediante una distribución continua de muelles de rigidez adecuada. La rotura de estos muelles, que trabajan con tensiones normales y tangenciales, está controlada por una ley de comportamiento elástica lineal-frágil que se presenta en este trabajo. Aunque

estrictamente hablando no tiene que existir ninguna interfase (o adhesivo) entre la fibra y la matriz, se supone que el comportamiento real de la interfase fibra-matriz puede ser descrito razonablemente en el marco del modelo presente de interfase débil.

## 2. INTERFASE ELÁSTICA LINEAL - FRÁGIL

En este apartado se presentan brevemente las características más importantes del modelo interfase elástica lineal-frágil. Es destacable mencionar que se ha probado que el comportamiento de la interfase fibra-matriz en un material compuesto puede describirse razonablemente por medio del modelo de interfase elástica lineal – frágil (Távora 2010, Távora et al. 2011) implementado en un código basado en el Método de los Elementos de Contorno (MEC).



**Fig. 1. Ley elástica lineal-frágil en la interfase sin daño: (a) normal y (b) tangencial. Ley elástica lineal-frágil en la interfase rota: (c) normal y (d) tangencial.**

La distribución continua de muelles que modela la interfase es gobernada por una ley elástica lineal-frágil, escrita para un punto  $x$  de la interfase de la siguiente forma, y mostrada también en la Fig. 1:

$$\begin{array}{l}
 \text{Interfase Elástica Lineal} \\
 \text{Interfase rota}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \sigma(x) = k_n \delta_n(x) \\
 \tau(x) = k_t \delta_t(x)
 \end{array} \right.
 \begin{array}{l}
 \delta_n(x) \leq \delta_{nc}(\psi_G(x)) \quad \text{y} \\
 |\delta_t(x)| \leq \delta_{tc}(\psi_G(x))
 \end{array}
 \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sigma(x) = \begin{cases} 0 & \delta_n(x) > 0 \\ k_n \delta_n(x) & \delta_n(x) \leq 0 \end{cases} \\
 \tau(x) = k_t \delta_t(x)
 \end{array} \right.
 \quad (2)$$

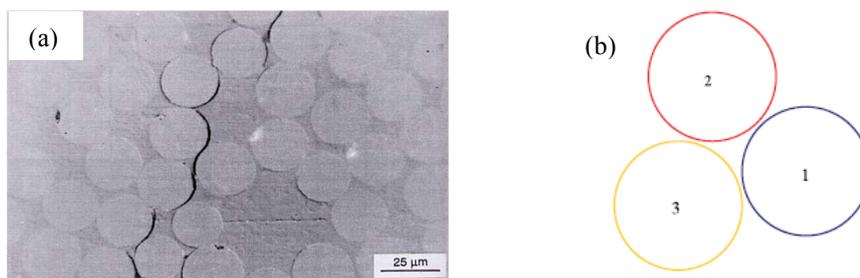
donde  $\sigma(x)$  y  $\tau(x)$  son, respectivamente, las tensiones normales y tangenciales en la capa elástica,  $\delta_n(x)$  y  $\delta_t(x)$  son, respectivamente, los desplazamientos relativos normales y tangenciales entre puntos opuestos de la interfase.  $\delta_n(x)$  y  $\delta_t(x)$  también son considerados como los valores de la apertura y el deslizamientos entre las superficies de la interfase.  $k_n$  y  $k_t$  son las rigideces normales y tangenciales de la distribución de muelles.

Es importante notar que los valores críticos  $\sigma_c(\psi_G)$ ,  $\tau_c(\psi_G)$ ,  $\delta_{nc}(\psi_G)$  y  $\delta_{tc}(\psi_G)$  son funciones del ángulo que define la mixticidad del modo de fractura  $G$  en un punto de la interfase. Por ello, es posible obtener diferentes valores de estas variables críticas en diferentes puntos de la interfase. Un extensa explicación del modelo se puede encontrar en Távora (2010) y Távora et al. (2011).

### 3. MODELO MULTIFIBRA

El modelo de Interfase Elástica Lineal-Frágil (IELF) ha probado ser un modelo adecuado para describir el comportamiento de la interfase entre fibra y matriz, tal y como se ha mostrado en trabajos previos donde se ha estudiado un modelo de fibra única inmerso en una matriz muy grande (Távora 2010, Távora et al. 2011).

Sin embargo, en los materiales compuestos reales las fibras están inmersas en la matriz formando conjuntos de inclusiones cilíndricas. Por tanto, la interacción entre las fibras así como las distancias entre ellas juegan un papel importante en la aparición y propagación de grietas de interfase, ver Fig. 2(a). En este trabajo se presenta un estudio inicial de este problema con la finalidad de ilustrar y comprobar las capacidades del código MEC y la formulación de IELF. Tres fibras inmersas en una matriz continua fueron modelados usando la formulación de IEFL, ver Fig. 2(b).



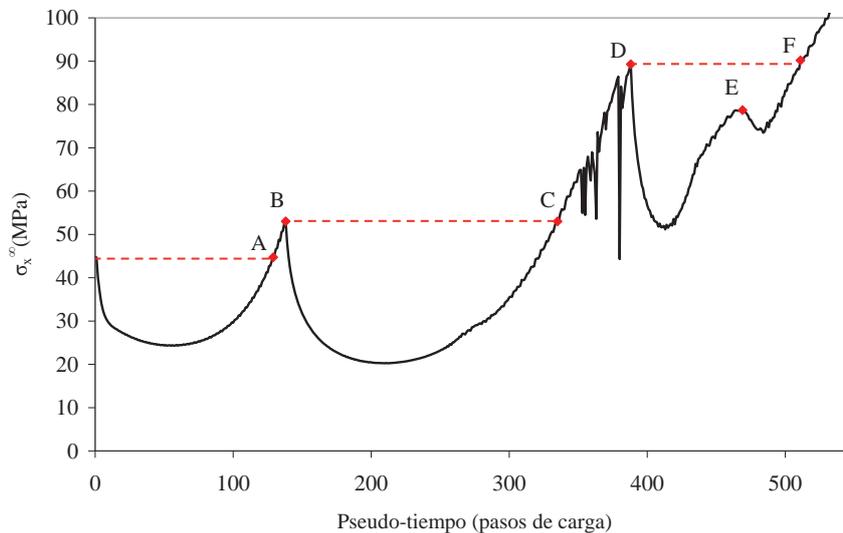
**Fig. 2. (a) Ejemplo de una distribución típica de fibras de vidrio en un material compuesto vidrio - epoxy. (b) Modelo multifibra estudiado usando el MEC**

Para el presente estudio se ha elegido un sistema bimaternal típico entre los materiales compuestos reforzados con fibras: fibra de vidrio y matriz epoxi. Las propiedades de estos materiales se detallan en la Tabla 1.

El modelo del MEC realizado consistió en tres inclusiones circulares con  $7.5 \mu\text{m}$  de radio dentro de un cuadrado de  $1\text{mm}$  lado. Se utilizaron dos mallas uniformes de 360 elementos para modelar cada interfase entre las fibras y la matriz, (siendo el ángulo polar del elemento igual a  $1^\circ$ ) y 32 elementos para la discretización del contorno externo de la matriz. Las propiedades de la interfase consideradas fueron  $G_{ic} = 2 \text{ Jm}^{-2}$ ,  $\bar{\sigma}_c = 90 \text{ MPa}$ ,  $k_n/k_t = 4$ .

Material	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Modulo de Young, E
Matriz epoxi	$\nu_m = 0.33$	$E_m = 2.8 \text{ GPa}$
Fibra de vidrio	$\nu_f = 0.22$	$E_f = 71 \text{ GPa}$

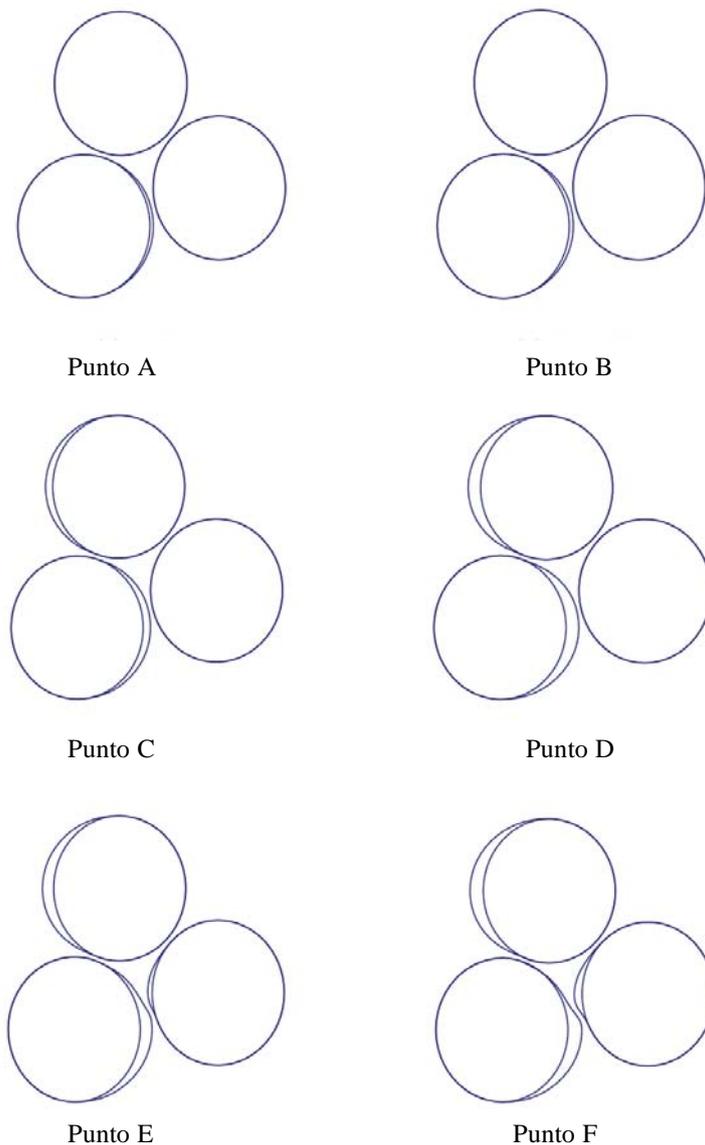
**Tabla 1. Las propiedades elásticas de la matriz y la fibra.**



**Fig. 3. Resultados del MEC: carga aplicada respecto al pseudo-tiempo (pasos de carga) en el modelo multifibra.**

Los resultados obtenidos se presentan en las Figs. 3 y 4. Como se puede observar en estas figuras, el inicio del daño en el modelo multifibra viene caracterizado por la aparición de una grieta de interfase y su crecimiento inestable, de manera similar a lo que sucedía en el modelo unifibra (Távora 2010, Távora et al. 2011). Tras la aparición y un crecimiento inestable de la grieta inicial, que termina en el punto A de la Fig. 3, esta grieta crece de forma estable, se necesita incrementar la carga para llegar al punto B. Posteriormente aparece un nuevo despegue en una inclusión diferente que crece de forma inestable hasta el punto C, y después de forma estable hasta alcanzar el punto D de la Fig. 3. Es importante comentar la presencia de un comportamiento “artificial” (caídas casi verticales en la carga aplicada) entre los puntos C y D, debido a que algunos puntos de las interfaces entran en contacto y también por que en realidad el crecimiento se produce en ambas grietas simultáneamente, mientras que el modelo sólo permite

crecer una de ellas en cada instante. Entre el punto D y el punto F aparece un tercer crecimiento inestable, asociado a la aparición del despegue en la tercera fibra. Aunque el modelo es capaz de representar mas despegues entre las interfases de fibra y matriz después del punto F, el comportamiento real del sistema vendría dado por un cambio brusco en la orientación de propagación de las grietas de interfase que produciría que las grietas se propaguen a través de la matriz. Finalmente las grietas se unen formando una macro grieta. De hecho es posible que el comportamiento real no alcance el punto D.



**Fig. 4. Deformadas del modelo MEC obtenidas en los diferentes pasos de carga mostrados en la Fig. 3**

En la Fig. 4, se presentan las diferentes deformadas de la malla del MEC obtenidas en los diferentes puntos marcados en la Fig. 3. En esta figura se puede observar claramente la evolución de las grietas que aparecen en esos momentos. Aunque, estos resultados son preliminares, se ha podido mostrar claramente la capacidad de la herramienta numérica desarrollada para captar mecanismos despegue más complejos en un conjunto de fibras.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se hace uso del modelo de Interfase Elástica Lineal-Frágil (IELF) por medio de una distribución continua de muelles para el análisis del problema de despegue entre fibra y matriz en un grupo de fibras en un material compuesto.

Específicamente, empleando este modelo se ha caracterizado el despegue inicial y posterior crecimiento de grietas de interfase en un conjunto de 3 inclusiones circulares que están sometidas a cargas transversales de tracción. Se han asumido propiedades de un material compuesto común (fibra de vidrio/matriz epoxi) y el problema se ha resuelto usando un código basado en el Método de los Elementos de Contorno.

De los resultados numéricos se puede observar que tras alcanzar el valor de carga que produce el primer despegue el crecimiento de esta grieta se torna inestable. Este fenómeno de inestabilidad es llamado “snap-through” y es similar al observado por los autores en trabajos previos donde se modeló el problema de fibra única.

Finalmente se ha mostrado que se dispone de herramienta numérica que tiene la capacidad de seguir los mecanismos despegue en un conjunto de fibras. Este trabajo servirá de base para un estudio más detallado y paramétrico del problema en cuestión.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación de este trabajo por los proyectos TRA2006-08077 y MAT2009-14022 del Ministerio de Ciencia e Innovación y los Proyectos de Excelencia TEP-1207, TEP-2045 y TEP-4051 de la Junta de Andalucía.

#### REFERENCIAS

PARÍS F., CORREA E. Y MANTIČ V. (2007). Kinking of transverse interface cracks between fiber and matrix. *Journal of Applied Mechanics*, 74, pp. 703–716.

TÁVARA L. (2010). Damage initiation and propagation in composite materials. Boundary element analysis using weak interface and cohesive zone models. *PhD Thesis - Universidad de Sevilla*. ISBN: 978-84-693-7878-6. 2010.

TÁVARA L., MANTIČ V., GRACIANI E., CAÑAS J. Y PARÍS F. (2009). Caracterización de inicio y crecimiento de grietas de interfase entre fibra y matriz bajo cargas transversales usando el modelo de interfase débil. *COMATCOMP' 09 - V International Conference on Science and Technology of Composite Materials October 7th-9th 2009, Donostia - San Sebastian, Spain*.

TÁVARA L., MANTIČ V., GRACIANI E. Y PARÍS F. (2011). BEM analysis of crack onset and propagation along fiber-matrix interface under transverse tension using a linear elastic-brittle interface model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35, pp. 207-222.