

## Análisis numérico del ensayo de fragmentación de fibra única, empleando elementos cohesivos

F. Curiel, E. Graciani, A. Blázquez, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla

### RESUMEN

Se ha llevado a cabo un análisis numérico, mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), del ensayo de fragmentación de fibra única empleando elementos cohesivos para modelar la aparición y crecimiento de las grietas de despegue. Dado que durante todo el proceso del ensayo la matriz tiende a contraerse más que la fibra en dirección radial, ha sido preciso tener en cuenta el contacto entre las caras de la grieta de despegue. Como resultado se ha observado que las caras de la grieta se encuentran cerradas a lo largo de toda su longitud. Por tanto, el crecimiento de la misma es en puro modo II de fractura. Los resultados obtenidos para diferentes valores del coeficiente de fricción se han comparado con resultados de análisis numéricos previos, obtenidos con el enfoque de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL), empleando el Método de los Elementos de Contorno (MEC). En ausencia de fricción se ha observado un acuerdo excelente en los resultados de ambos enfoques. Sin embargo, si se tiene en cuenta el efecto de la fricción, los resultados obtenidos con elementos cohesivos y con la MFEL muestran comportamientos análogos pero con discrepancias cuantitativas.

### 1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de fragmentación de fibra única (Kelly y Tyson, 1965) consiste en someter a tracción una probeta que contiene una única fibra alineada con la carga. El presente estudio considera una probeta con una fibra de vidrio embebida en resina epoxi, con las características mostradas en la Tabla 1.

	Fibra de vidrio	Resina epoxi
Módulo de elasticidad	70 000 MPa	3 500 MPa
Coefficiente de Poisson	0.2	0.3
Coefficiente de expansión térmica	$7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Radio exterior ( $r_i$ )	5 $\mu\text{m}$	1 000 $\mu\text{m}$

**Tabla 1. Características mecánicas y dimensiones de la probeta.**

Dado que la fibra soporta menores alargamientos que la resina, una vez que la probeta alcanza una cierta deformación, la fibra comienza a fragmentarse. Cuanto más pequeño es un fragmento de fibra, más resistente se vuelve (puesto que es más difícil que haya un defecto en su interior). Por tanto, llega un momento en que deja de fragmentarse la fibra y comienza a fallar la interfase, apareciendo grietas de despegue entre la fibra y la matriz que nacen en los puntos de rotura de la fibra y crecen a lo largo de la interfase fibra/matriz, tal como se muestra en el esquema de la Figura 1.

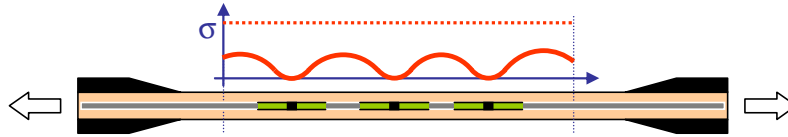


Fig. 1. Esquema de la probeta tras la fragmentación de la fibra y el crecimiento de las grietas de despegue.

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo una simulación numérica del ensayo que permita, mediante ajuste con los resultados experimentales, determinar la *tenacidad a fractura* de la interfase.

## 2. MODELO NUMÉRICO

Dado que los fragmentos en que se divide la fibra son muy largos, en comparación con su diámetro y con la longitud de las grietas de despegue, la solución es repetitiva en el extremo de los fragmentos y presenta, por un lado, simetría axial respecto al eje de la fibra y, por otro, simetría respecto al plano de rotura de la fibra. Por tanto el modelo numérico empleado es el mostrado en la Figura 2.(a), constituido por la sección radial del tramo de probeta correspondiente a la mitad de un fragmento de fibra.

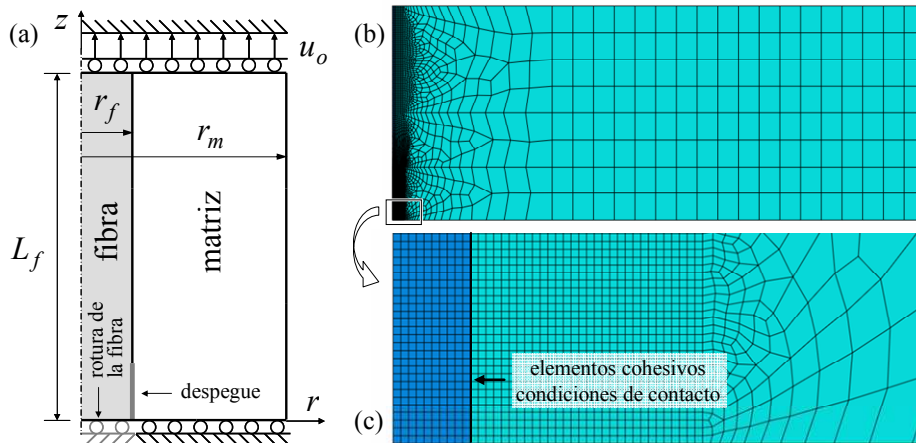
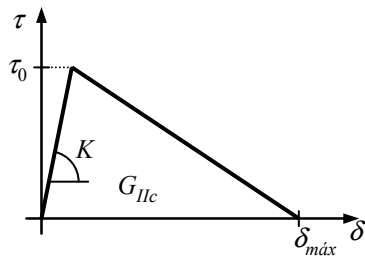


Fig. 2. (a) Esquema del modelo. (b) Malla de elementos finitos. (c) Detalle de la zona de rotura de la fibra y comienzo del despegue.

El proceso de carga se divide en cuatro pasos. En el primero, la probeta se somete a un decremento de temperatura  $\Delta T_0 = -80 \text{ K}$ , para simular el enfriamiento tras la solidificación durante el proceso de fabricación de la misma. En el segundo paso se aplica tracción hasta un alargamiento medio  $\varepsilon = 1\%$ . En el tercer paso, se simula la rotura de la fibra, manteniendo constante la deformación aplicada, retirando la condición de contorno en desplazamientos en el plano de rotura. Por último, se aplica nuevamente tracción hasta un alargamiento medio  $\varepsilon = 4\%$ .

El análisis numérico se ha llevado a cabo mediante el MEF, empleando el programa ABAQUS. En la Figura 2.(b) se muestra la malla de elementos axisimétricos de cuatro nodos empleada. Como el diámetro de la fibra es varios órdenes de magnitud menor que el de la probeta, es preciso llevar a cabo una disminución progresiva del tamaño de la malla. En la Figura 2.(c) se muestra la malla uniforme empleada en la zona cercana a la rotura de la fibra.

Para simular el comienzo y la progresión del proceso de despegue se han empleado elementos cohesivos (de espesor nulo) COHAX4 en la interfase entre la fibra y la matriz. Dado que en dicha zona se esperan grandes desplazamientos relativos (en comparación con el tamaño de la malla), se ha realizado el análisis en grandes desplazamientos. Aunque los elementos cohesivos empleados permiten modelar los distintos modos planos de fractura, en el modelo actual la fractura se produce en modo II puro (Graciani et al. 2007). Por tanto, el comportamiento a cortadura de los elementos cohesivos empleados es el que se muestra en la Figura 3.



Características de la ley cohesiva:

$$G_{IIc} = 50 \text{ J/m}^2$$

$$\tau_0 = 210 \text{ MPa}$$

$$K = 70000 \text{ MPa}/\mu\text{m}$$

Fig. 3. Ley cohesiva.

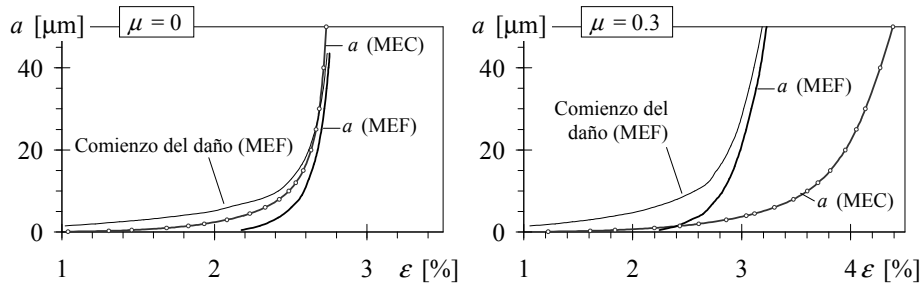
Por último, dado que la resina tiende a contraerse más que la fibra en dirección radial, una vez comienza a propagarse el despegue hay que tener en cuenta el contacto entre la fibra y la matriz. Los elementos cohesivos permiten modelar el fallo a cortadura de la interfase y la propagación del despegue, mientras que las restricciones de contacto previenen la interpenetración una vez que se ha comenzado el despegue.

### 3. RESULTADOS

En el enfoque cohesivo, mostrado en la Figura 3, se considera que la interfase comienza a dañarse en un punto una vez que se ha alcanzado la máxima tensión ( $\tau_0$ ), dado que, a partir de ese instante, la descarga se produciría por una recta de pendiente inferior a la original. A su vez, se considera que el vértice de la grieta ha alcanzado un punto cuando en dicho punto se supera la máxima apertura definida en la ley cohesiva ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ).

En la Figura 4.(a) se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la propagación de la grieta de despegue con el modelo cohesivo (empleando el MEF) cuando se desprecia el efecto de la fricción. En la gráfica puede observarse como, tras la rotura de la fibra ( $\varepsilon = 1\%$ ), comienza a dañarse la interfase. La longitud de la zona dañada aumenta con la deformación media en la probeta hasta que se forma la grieta de despegue (en torno a  $\varepsilon = 2.2\%$ ). A partir de ese momento la longitud de la zona dañada permanece constante y la longitud despegada aumenta con la deformación media en la probeta. En el entorno de  $\varepsilon = 2.75\%$  el crecimiento de grieta se vuelve inestable, con lo

cual la pendiente de la curva  $a/\varepsilon$  se hace vertical. Se han incluido también en la Figura 4(a) los resultados obtenidos con un modelo basado en el MEC con el enfoque de la MFEL (Graciani et al. 2007). Puede observarse que los resultados de ambos enfoques son bastante parecidos.



**Fig. 4. Propagación de la grieta de despegue: (a) sin fricción, (b) con fricción.**

Por último, en la Figura 4(b) se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la propagación de la grieta de despegue, con los enfoques anteriormente mencionados, cuando se considera el efecto de la fricción (tomando  $\mu = 0.3$ ). En este caso, ambos enfoques ofrecen resultados cualitativamente similares, el efecto de la fricción se traduce en un retraso en la propagación del despegue y un crecimiento más estable a altas deformaciones. Sin embargo las diferencias cuantitativas son manifiestas.

## 5. CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados de un modelo del ensayo de fragmentación de fibra única empleando el MEF con elementos cohesivos. Dicho análisis ha confirmado que la fricción entre las caras de la grieta retrasa la propagación del despegue y hace que la propagación sea más estable. No obstante, para justificar el origen de las diferencias observadas con los resultados basados en la MFEL es preciso realizar un estudio más profundo de la solución de ambos enfoques.

## REFERENCIAS

- ABAQUS Inc. (2006). ABAQUS 6.6. Analysis User's Manual.  
 GRACIANI, E., MANTIČ, V., PARÍS, F. (2007). Influencia de la fricción en el estado tensional en la fibra y la interfase en el ensayo de fragmentación de fibra única, *en Materiales Compuestos 07* (Ed: Güemes, A., Merino, J.C., Ureña, A.), 551-558, Gráficas 82, SL.  
 KELLY, A., TYSON, W.R. (1965). Tensile properties of fiber-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum. *J Mech Phys Solids*, 13, 329-350.