

## Estudio numérico experimental de la influencia de la velocidad de carga en el comportamiento a fractura en modo I de laminados de fibra de carbono.

H.Zabala<sup>1</sup>, L.Aretxabaleta<sup>1</sup>, G.Castillo<sup>2</sup>

1. Dpto. de Mecánica y Producción Industrial. Mondragon Unibertsitatea. España.
2. Dpto. de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, Univ. de Málaga. España.  
[gcastillo@uma.es](mailto:gcastillo@uma.es) (email del ponente)

### RESUMEN

La ligereza es uno de los criterios de diseño más importantes a considerar en la concepción de un componente para el sector transporte, en el que el peso de los vehículos influye directamente en su consumo y emisiones. El empleo de composites en automoción puede ser una solución, pero está sujeto en gran medida a su comportamiento frente a impacto siendo necesario conocer la influencia de la velocidad de deformación sobre sus propiedades mecánicas.

La delaminación es uno de los modos de fallo más críticos ya que es el primer fallo que supone una pérdida de capacidad portante de la estructura, no es detectable visualmente y su evolución condiciona el posterior fallo catastrófico del material. Es común asumir que la delaminación de un composite crece en una combinación de los modos I y II, dominada por el modo I. En este trabajo se han llevado a cabo ensayos DCB en laminados de tejido equilibrado de fibra de carbono y resina epoxi, fabricados por infusión, analizando la influencia de la velocidad de carga sobre  $G_{IC}$  en un rango de velocidades entre  $8,3 \times 10^{-5}$  y  $0,190$  m/s. Los resultados muestran que  $G_{IC}$  decrece un 18% al aumentar la velocidad de carga del ensayo.

Se ha llevado a cabo un modelo numérico por elementos finitos analizando, entre otros, la influencia de parámetros tales como el tamaño de elemento y propiedades de la ley cohesiva a partir de las energías de fractura obtenidas para cada velocidad. Se han comparado las curvas fuerza y apertura de grieta en función del desplazamiento impuesto. Los resultados muestran una buena correlación, habiéndose obtenido un modelo capaz de predecir las tendencias experimentales observadas a diferentes velocidades de carga.

**PALABRAS CLAVE:** Delaminación, DCB, Velocidad de carga, Elementos finitos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El sector de la automoción demanda una reducción de peso cada vez mayor habida cuenta de que el peso influye directamente en el consumo y en las emisiones de los vehículos (hasta un 75% del consumo y las emisiones de un automóvil está relacionado con su peso estructural [1]). La irrupción de los coches eléctricos ha dado un impulso aún mayor a esta necesidad de aligerar la estructura para mejorar la autonomía de este tipo de vehículos. Los materiales compuestos gracias a sus elevadas propiedades

específicas pueden ayudar a resolver este problema. Ahora bien, la necesidad de garantizar la durabilidad de los componentes hace necesario tener un profundo conocimiento de los mecanismos de fallo de estos materiales y ser capaz de simularlos. Uno de los mecanismos de fallo más críticos es la delaminación.

El comportamiento interlaminar de un composite viene caracterizado por su tenacidad a fractura interlaminar en los tres modos que contempla la mecánica de la fractura elástica lineal (LEFM). Ahora bien, según Jensen & Sheinman [2] la contribución del modo III en los fenómenos de delaminación es imperceptible. Por tanto es común asumir que la delaminación de un composite laminado crece en una combinación de los modos I y II, dominada por el modo I. El ensayo más utilizado para obtener el valor de  $G_{IC}$  es el ensayo DCB (ASTM D 5528) [3].

Entre las técnicas numéricas de simulación que más ampliamente se han implementado en los códigos de cálculo comerciales destacan el método VCCT (Virtual Crack Closure Technique) y el CZM (Cohesive Zone Model) [4]. En ambos métodos, se parte de la energía de fractura. En este trabajo se han empleado modelos de zona cohesiva (CZM) basados en la mecánica del daño continuo ya que permiten predecir el inicio de la delaminación.

## 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 2.1. Materiales y proceso de fabricación

El material empleado ha sido un tejido equilibrado de fibra de carbono Hexcel ref.43199 y una resina epoxi SiComin (SR 8100/SD 8822). El proceso de fabricación utilizado ha sido la infusión de resina. La tabla 1 resume las características mecánicas intra e inter laminas del material objeto de estudio, en condiciones cuasiestáticas.

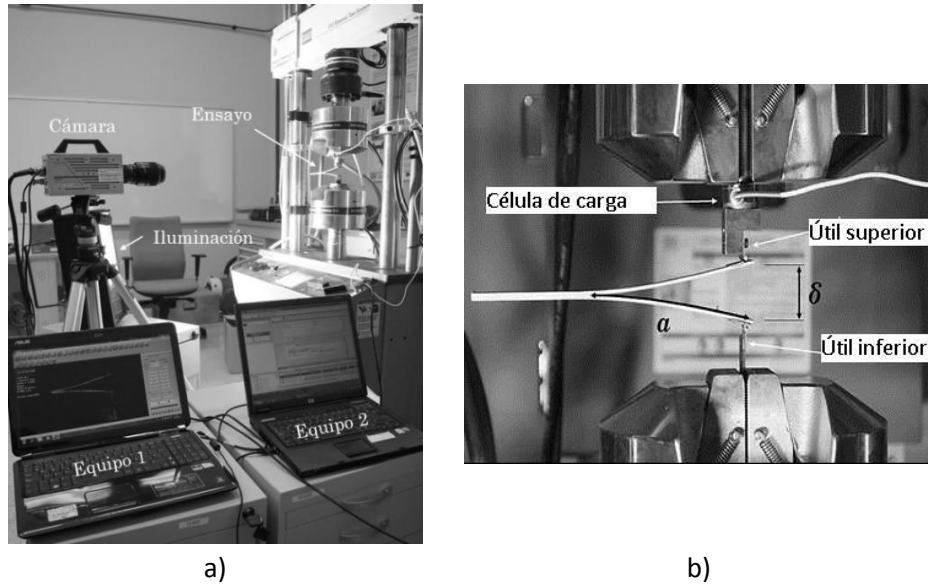
**Tabla 1. Propiedades mecánicas del material compuesto.**

Módulo (GPa)		Resistencia (MPa)		ILSS (MPa)
Tracción	Cizalladura	Tracción	Cizalladura	Cizalladura
57,3 ± 0,8	3,08 ± 0,16	781 ± 43	80,3 ± 2,8	50,13 ± 1,48

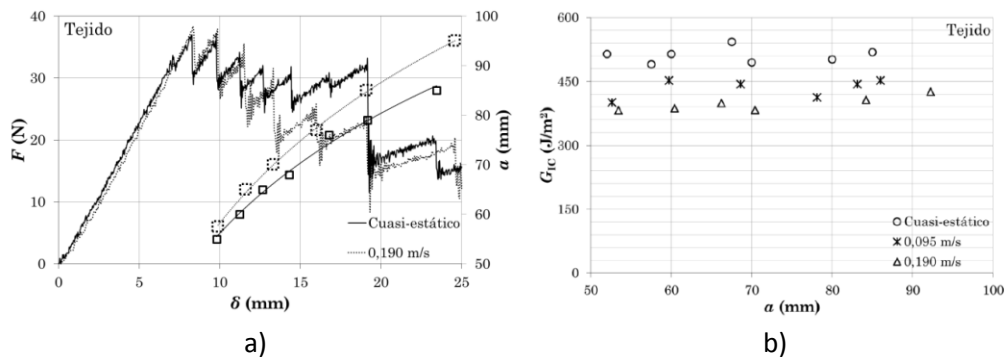
### 2.2. Ensayos DCB

La caracterización del comportamiento interlaminar en modo I se ha realizado mediante el ensayo DCB según la norma ASTM D5528 [3]. La delaminación inicial de la probeta se crea colocando una lámina de Teflón (© DUPONT) de 12,5  $\mu\text{m}$  en el plano de simetría del laminado antes de realizar la infusión de resina. La delaminación es forzada a propagarse en modo I puro al separar las dos partes delaminadas entre sí mediante fuerzas perpendiculares al plano de delaminación (Figura 1.b). Las dimensiones de las probetas son: longitud total 220 mm, 55 mm de longitud de la pre-grieta y 22 mm de anchura. El espesor,  $e$ , y la longitud inicial de la pre-grieta,  $a_0$ , han sido elegidos de forma que se cumplan las condiciones impuestas por la norma. Los ensayos se han realizado en una máquina de ensayos MTS 810 con diferentes velocidades de desplazamiento ( $8,3 \times 10^{-5}$  – 0,190 m/s). La medición de la fuerza aplicada sobre la probeta se ha llevado a cabo mediante una célula de carga intermedia de 100 lb (Interface 100 lb WMC) (Figura 1b). Tanto el desplazamiento impuesto  $\delta$  como la longitud de

grieta  $a$  se han medido a partir de las imágenes obtenidas mediante una cámara de alta velocidad (Photron FastCam SA3) (Figura 1.a) como proponen Blackman et al. [5].



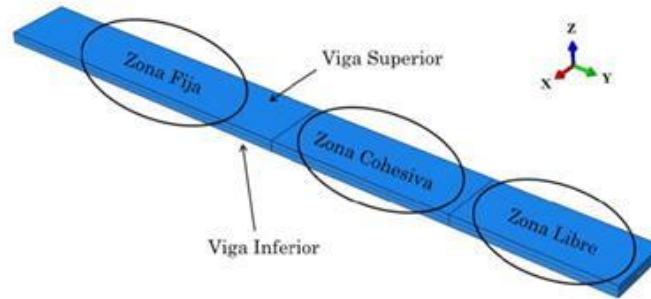
A partir de estos valores se ha obtenido la  $G_{IC}$  empleando la teoría modificada de vigas (MBT), incluyendo la corrección  $\Delta$  para tener en cuenta el giro en la punta del frente de grieta. En la Figura 2 se pueden ver a) las curvas  $F-\delta$  y  $a-\delta$  para las velocidades extremas estudiadas, b) Curvas  $R$  para tres velocidades de carga.



Las curvas  $F-\delta$  presentan un crecimiento de grieta inestable. Al aumentar la velocidad de carga,  $G_{IC}$  decrece linealmente, llegando a una reducción del 18% entre la condición de carga cuasi-estática y 0,190 m/s. Esta reducción de  $G_{IC}$  justifica la obtención de longitudes de grieta mayores para un  $\delta$  a una velocidad de carga mayor.

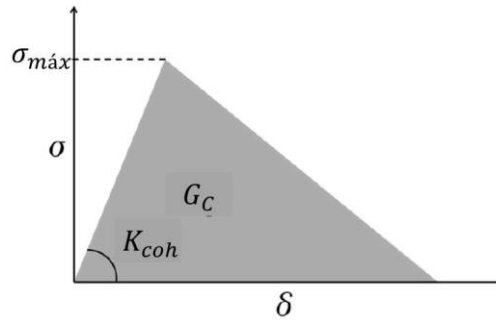
### 3. CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL MEDIANTE E.F.

Los modelos de las probetas de modo *I* se han construido a partir de dos vigas idénticas (superior e inferior), dibujadas como sólidos y posicionadas una sobre la otra, tal y como se puede ver en la Figura 3.



**Fig.3. Modelo geométrico empleado en las simulaciones.**

Cada viga está dividida en 3 partes: (i) zona libre, (ii) zona cohesiva, (iii) zona fija. La zona libre tiene una longitud igual a la delaminación inicial. Las zonas cohesivas de ambas vigas interactúan entre sí mediante un contacto cohesivo capaz de simular el avance de la delaminación. Las zonas fijas de ambas probetas están unidas entre sí, mediante una unión rígida. El modelo geométrico de la probeta se ha discretizado empleando elementos *Continuum Shell* de 8 nodos (SC8R) [6]. Las condiciones de contorno se han aplicado sobre los vértices exteriores de ambas vigas en sus zonas libres (Figura 3). Ambos vértices permiten el giro en X, mientras que los demás grados de libertad han sido restringidos a excepción del desplazamiento en Z del vértice superior, sobre el que se impone un desplazamiento de 25 mm.



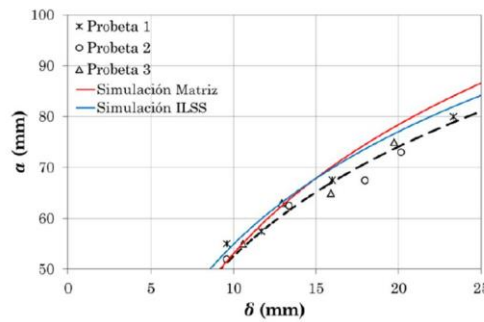
**Fig.4. Ley de comportamiento cohesivo bi-lineal.**

La zona cohesiva se ha modelado utilizando superficies cohesivas [6] con una ley constitutiva bilineal (Figura 4). Las propiedades del material cohesivo (Figura 4) son: la energía de fractura  $G$ , la rigidez  $K_{coh}$  y la resistencia del elemento cohesivo. En cada modelo se ha introducido la  $G_{IC}$  correspondiente a cada velocidad de ensayo. La rigidez  $K_{coh}$  se ha obtenido aplicando la expresión propuesta por Turon [7] (1):

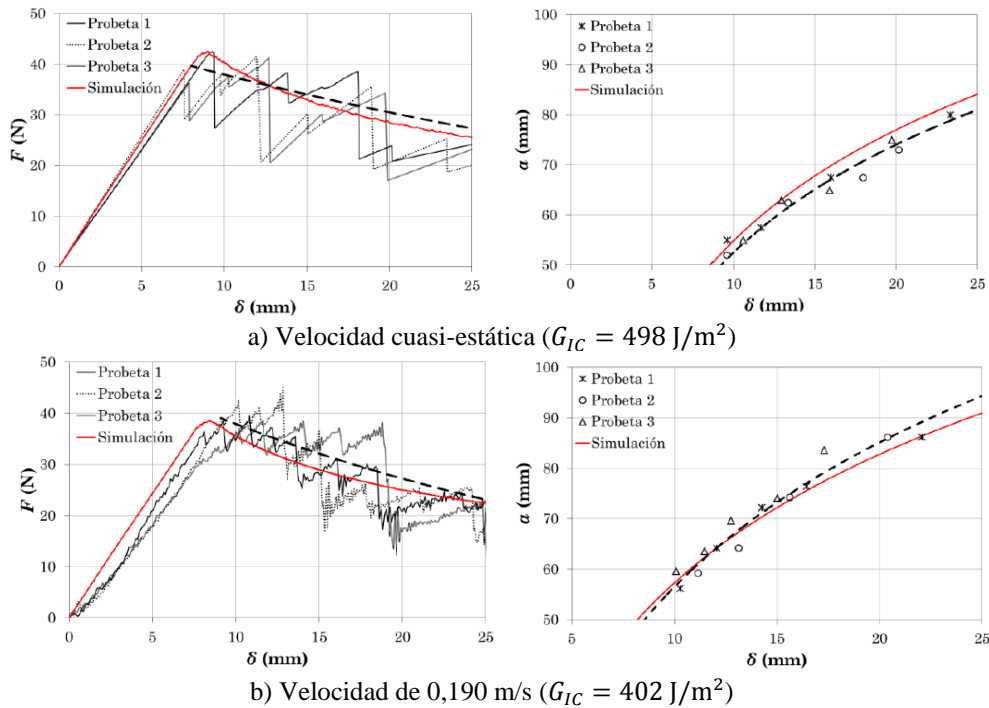
$$K_{coh} = \alpha \frac{E_3}{t} \quad (1)$$

Donde  $E_3$  representa el módulo de elasticidad del laminado en la dirección perpendicular al plano,  $t$  el espesor del laminado y  $\alpha$  un coeficiente que el mismo autor propone  $\alpha=50$ . La rigidez interlaminar calculada es de  $6 \times 10^{13} \text{ N/m}^3$ .

Para la determinación de la resistencia cohesiva diversos autores utilizan valores sin llegar a relacionarlas con una propiedad del material [7, 8]. En este trabajo se han utilizado dos valores de resistencia: la resistencia de la matriz y la ILSS del composite. Los resultados muestran que el uso de uno u otro prácticamente no afecta a las curvas  $F - \delta$ . Sin embargo (Figura 5), la evolución de la grieta si se ve afectada por la resistencia cohesiva introducida. Al emplear la resistencia de la matriz se predice con exactitud el inicio de la propagación de la grieta, pero la longitud de grieta se sobreestima durante el ensayo (<8%).



**Fig. 5. Curvas  $a - \delta$  obtenidos por E.F para diferentes resistencias del material cohesivo (velocidad quasi-estática).**



**Fig. 6. Curvas  $F - \delta$  y  $a - \delta$  para dos velocidades de ensayo.**

Al emplear el valor de ILSS, la iniciación de la delaminación sucede para un valor de apertura inferior al experimental y este desfase hace que durante toda la simulación la longitud de grieta se sobreestime en un 5%. En este estudio se ha tomado como valor de la resistencia del material cohesivo el de ILSS, dando mayor importancia a tener una mejor correlación de la evolución de la grieta, que a reproducir adecuadamente el inicio de la propagación que pueden estar condicionados por el film antiadherente.

Los resultados (Figura 6) presentan una buena correlación con los resultados experimentales (error < 10%) correspondientes a dichas velocidades de carga tanto en las curvas  $F-\delta$ , como en la predicción del inicio y la evolución de la delaminación.

#### 4. CONCLUSIONES.

Las curvas experimentales  $F-\delta$  presentan una ligera reducción en los valores de fuerza al aumentar la velocidad de carga del ensayo. A partir de las curvas  $a-\delta$ , se ha observado cómo aumentar la velocidad de carga del ensayo supone mayores longitudes de grieta para un mismo valor de apertura impuesto a la probeta. La  $G_{IC}$  del material analizado decrece un 18% al aumentar la velocidad de carga del ensayo para las velocidades de carga analizadas.

El modelo numérico definido con las propiedades mecánicas caracterizadas, presenta una buena correlación con los resultados experimentales. El modelo, al definirlo con las tenacidades caracterizadas a diferentes velocidades de carga, es capaz de predecir las tendencias experimentales observadas en la evolución de la fuerza y la longitud de grieta con la velocidad de carga del ensayo.

#### REFERENCIAS

1. Friedrich, K., Almajid, A.A., (2013). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20(2), pp.107–128.
2. Jensen, H.M., Sheinman, I., (2001). Straight-sided, buckling-driven delamination of thin films at high stress levels. *International Journal of Fracture*, 110(1995), pp.371–385.
3. ASTM 5528-01. Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. *ASTM International*.
4. Mollon V., Bonhomme J., Elmarakbi, Argüelles A., Viña J., (2012). Finite element modelling of mode I delamination specimens by means of implicit and explicit solvers. *Polymer Testing* 31
5. Blackman, B.R.K et al. (1995) The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test. *Journal of Materials Science*, 30 (23), pp 5885-5900.
6. Simulia (2012). Abaqus Analysis User's Manual, Version 12-1. Providence (USA). Dassault Systemes Simulia.
7. Turon A., Dávila C.G., Camanho P.P, Costa J. (2007). An engineering solution for mesh size effects in the delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics* 74 pp. 1665-1682.
8. Camanho P.P, Dávila C.G, De Moura M.F., (2003). Numerical Simulation of Mixed.mode Progressive Delamination in Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, Vol 37, No.16 (2003)