



Comparación experimental de la tenacidad a fractura transversal de laminados unidireccionales correspondientes al crecimiento longitudinal o transversal de grietas

F. Cepero¹, I.G. García^{1,2}, J. Justo¹, V. Mantič¹, F. París¹, A. Barroso¹

^a Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España.

^b Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, España.

RESUMEN

El objetivo del trabajo es determinar y comparar, en laminados unidireccionales, las tenacidades a fractura transversal correspondientes a dos direcciones de crecimiento de grieta, paralela (G_{Icpar}) y perpendicular (G_{Icperp}) a las fibras. Con este propósito, se han diseñado y fabricado dos tipos de probetas para el ensayo de flexión a tres y cuatro puntos, con dimensiones iguales pero con distintas orientaciones de fibras con respecto a la grieta inicial. La principal dificultad encontrada durante la fabricación ha sido la generación de grietas. En este artículo se describen las diferentes técnicas implementadas para la generación de las grietas y los problemas encontrados. Los resultados muestran que los valores de la tenacidad para ambas direcciones de propagación son cercanos, detectándose un valor ligeramente más alto cuando la dirección de propagación es paralela a la fibra.

PALABRAS CLAVE: Tenacidad a fractura transversal, laminados unidireccionales.

1. INTRODUCCIÓN

La tenacidad a fractura transversal es una magnitud clave para comprender y poder predecir el fallo de las capas transversales en laminados de fibra de carbono. Sin embargo, el método experimental usado para la medida de esta magnitud, recogido en documentos como [1], sólo permite medir la tenacidad correspondiente a la hipótesis de que la dirección de crecimiento de la grieta es paralela al eje de la fibra, asumiendo que la tenacidad a fractura transversal con crecimientos de grieta perpendiculares a la dirección de las fibras presenta un valor similar.

Sin embargo, ante la falta de evidencias físicas, no se puede afirmar si se está realizando una aproximación razonable de esta magnitud. En la práctica, este desconocimiento se traduce en una fuente de incertidumbre para todo modelo que pretenda, utilizando esta propiedad, predecir la fractura de este tipo de materiales.



El presente trabajo, propone un método experimental para calcular y comparar G_{Icpar} y G_{Icperp} basándose en los resultados obtenidos anteriormente en [2]. En particular, se describen los procedimientos de fabricación, ensayo de probetas y obtención de los datos buscados. Finalmente se muestran las conclusiones obtenidas de este trabajo.

2. FABRICACIÓN DE PROBETAS, ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Con el fin de poder utilizar la misma geometría de probeta para obtener las dos tenacidades a la fractura que se desean comparar se propone el ensayo de flexión de 3 o 4 puntos. En la figura 1, se puede observar un esquema del ensayo que se ha realizado para las dos probetas que se estudian en este trabajo. Las dimensiones de las probetas son de 10 mm de espesor, 19 mm de altura, y 150 mm de longitud. La relación entre altura y espesor se escoge de acuerdo a las recomendaciones recogidas en [3]. Las pregrietas, tienen una longitud de 10 mm. Todas las probetas se fabrican usando el material Hexcel® AS4-8852. Se realizan 3 series de ensayos que se detallan a continuación.

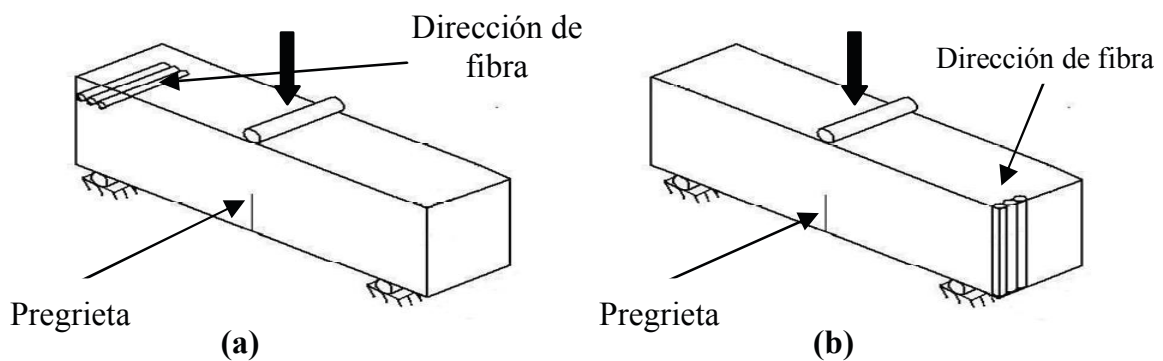


Fig. 1. Probetas con distintas direcciones de fibra con respecto al crecimiento de grieta: (a) crecimiento perpendicular a la dirección de fibra, (b) crecimiento paralelo a la dirección de fibra

2.1 Fabricación y ensayos de las probetas de la serie 1

Con vistas a verificar la funcionalidad de la técnica de generación de la grieta se fabrican inicialmente dos probetas con crecimiento paralelo a la dirección de fibra, denominadas en adelante serie 1. La grieta se genera a partir de la introducción de una cuchilla cubierta de una capa de nylon. La figura 2 ilustra el laminado antes de ser fabricado, con las cuchillas en posición.



Fig. 2. Laminado con fibras paralelas a la grieta de la serie 1

Una vez realizado el laminado, se introduce en el autoclave, y se somete al ciclo de curado recomendado por el fabricante. Posteriormente, se procede al proceso de corte de las probetas del laminado, para obtener las dos probetas de este laminado. Tras la fabricación, se observa que se produce una ligera inclinación de la grieta a lo largo del



espesor de la probeta. Finalmente, se ensayan estas probetas en un ensayo de flexión a cuatro puntos con distancias entre los rodillos inferiores de 120 mm y entre los superiores de 30 mm.

2.2 Fabricación y ensayos de las probetas de la serie 2

Una vez probada como satisfactoria la técnica utilizada en la serie 1, se decide realizar una serie con mayor número de probetas de los dos tipos que se quieren ensayar.

Para la evaluación de la tenacidad transversal con dirección de propagación paralela a la dirección de la fibra (Laminado paralelo), se han realizado 4 laminados iguales al fabricado en la serie 1, con 56 láminas y dimensiones de 170x70 mm cada uno. Las fibras siguen la dirección del lado corto del laminado, introduciendo dos pregrietas en sus bordes en la mitad de su lado largo. De esta forma se obtienen 8 probetas.

Para la evaluación de la tenacidad transversal con dirección de propagación perpendicular a la dirección de la fibra (Laminado perpendicular), se fabrica un laminado que dispone de 105 láminas de dimensiones de 170x100 mm. Las fibras siguen el sentido del lado corto y se realiza la pregrieta insertando, al igual que en el caso anterior siguiendo la dirección de fibra en la mitad del laminado obteniendo 8 probetas de este laminado.

Tras el proceso de curado y recantado se observa, de nuevo, una ligera inclinación de la grieta. Estas probetas son ensayadas a 3 y 4 puntos. Las probetas con fibras paralelas a la dirección de propagación de la grieta tienen una inclinación de grieta grande en el espesor y hace que los ensayos tengan propagación de grieta inestable, tanto si la flexión es en 3 o 4 puntos.

Para las probetas con fibras perpendiculares a la grieta, los ensayos realizados han sido de flexión a tres puntos, con una distancia de separación de los rodillos inferiores de 100 mm. La figura 3 muestra imágenes de los laminados y ensayos realizados.

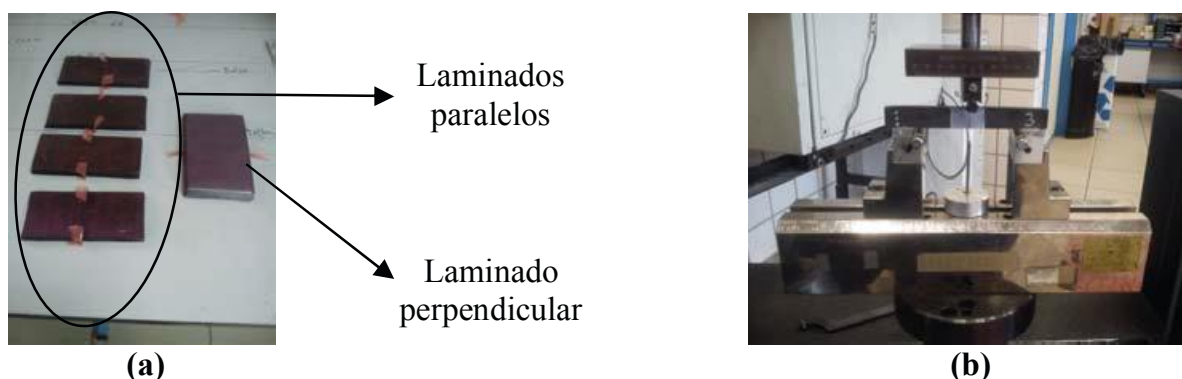


Fig. 3. Fabricación y ensayo de probetas de la serie 2: (a) laminados serie 2, (b) ensayo de la probeta 3 con fibras perpendiculares a la propagación de la grieta

2.3 Fabricación y ensayos de las probetas de la serie 3

En esta ocasión, para fabricar las probetas con fibra en la misma dirección de la grieta (Laminado paralelo), se han realizado cuatro laminados, con las mismas dimensiones y de la misma forma que en la serie 2, con la salvedad de que ahora se han utilizado útiles



que impidan la inclinación en las pregrietas. Estos útiles son perfiles rectangulares de aluminio con una ranura en su zona central, donde se aloja la cuchilla que posteriormente genera la pregrieta, introduciendo las cuchillas de la misma forma que en los laminados de este tipo de la serie 2.

En cuanto a los laminados para fabricar las probetas con fibras perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta (Laminado perpendicular), se han realizado dos laminados de 105 láminas y dimensiones 170x70 mm cada uno. La cuchilla se introduce a una profundidad de 10 mm siguiendo la dirección de la fibra en la sección central del laminado y en sus bordes se fijan a unos perfiles rectangulares de aluminio, ver figura 4.

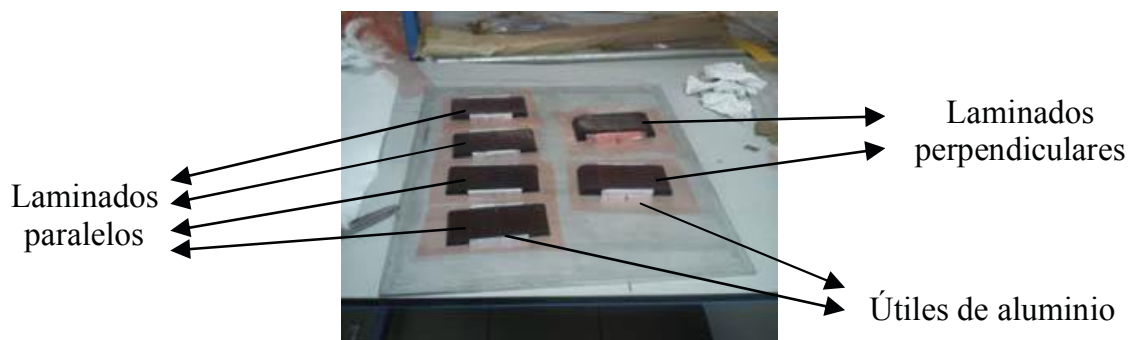


Fig. 4. Laminados de la serie 3

Los útiles que se emplean para realizar las pregrietas en los laminados son distintos para cada tipo de laminado. En el laminado paralelo se usan dos útiles en los bordes de lado largo, de forma que introduce la cuchilla en la mitad de este lado.

Para los laminados perpendiculares, el útil tiene una cuchilla que recorre la sección central del laminado y en sus bordes hay dos perfiles de aluminio que alojan a la cuchilla en una ranura. En la figura 5 se pueden observar ambos útiles.

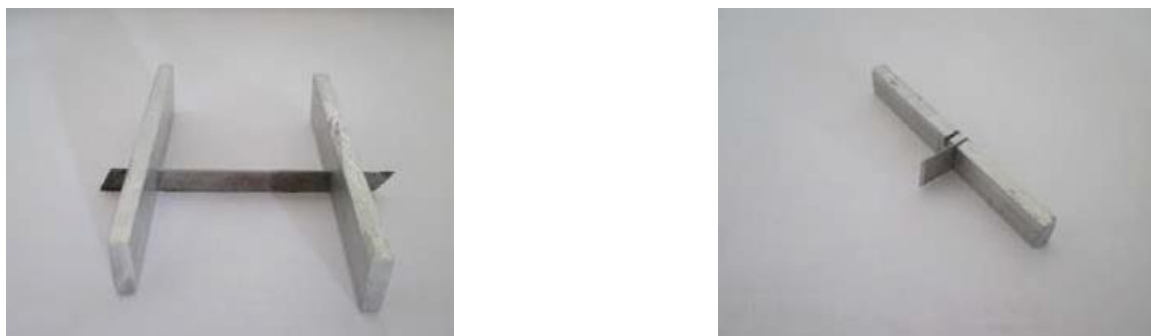


Fig. 5. Útiles de aluminio de la serie 3: (a) útil del laminado perpendicular, (b) útil del laminado paralelo.

De estos laminados se obtienen 9 probetas con fibras perpendiculares a la grieta y 7 probetas con fibras paralelas a la grieta. Estas probetas se ensayan a flexión en tres puntos, con distancia entre rodillos de 120 mm para las probetas con fibras paralelas a la grieta y 100 mm para las probetas con fibras perpendiculares a la grieta.

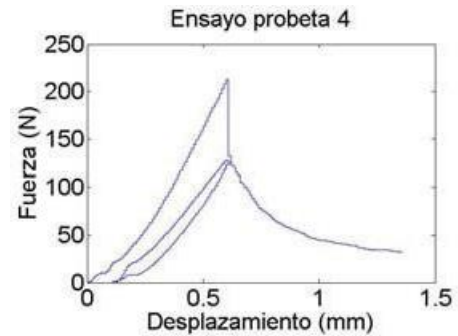
Todos los ensayos se realizaron con velocidad de mordaza de 0,2 mm/min, hasta que la



grieta avanza varios milímetros de forma inestable. Una vez detectado este crecimiento, se descarga a 0,5 mm/min y se vuelve a cargar a 0.2 mm/min avanzando la grieta de forma estable hasta la rotura, observándose *bridging* durante los ensayos. En la figura 6 se muestra un ejemplo de un ensayo con estas probetas.



(a)



(b)

Fig. 6. Ensayo de la probeta 4 con fibras paralelas a la propagación de la grieta de la serie 3: (a) foto del ensayo, (b) registros de fuerza-desplazamientos obtenidos en el ensayo

3. RESULTADOS DE G_{Icpar} y G_{Icperp} EN LAS DISTINTAS SERIES

Para calcular la tenacidad a fractura transversal en estos dos tipos de probetas se calcula la energía disipada cuando la grieta crece de forma estable. Este valor se obtiene a partir del área encerrada en la gráfica de fuerza-desplazamiento desde que la grieta empieza a crecer de forma estable hasta 1 mm antes de su rotura. Posteriormente, se divide entre la nueva superficie de grieta creada. Las tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos.

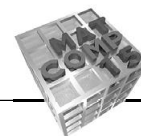
Tabla 1. Valores obtenidos en las series 1 y 3 de G_{Icpar} .

$G_{Icpar}(J/ m^2)$					
Serie 1		Serie 3			Media
Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 7	
514,23	551,52	596,72	577,78	511,47	550,34

Tabla 2. Valores obtenidos en las series 2 y 3 de G_{Icperp} .

$G_{Icperp}(J/ m^2)$	Serie 2	Serie 3
Probeta 1	503,75	395,29
Probeta 2	521,00	368,45
Probeta 3	517,63	-
Probeta 4	525,86	405,91
Probeta 5	-	428,68
Probeta 6	-	425,02
Probeta 7	-	387,75
Media	517,06	401,85

Para calcular G_{Icpar} , se obtienen las medidas de dos probetas de la serie 1, estos ensayos fueron con un ensayo de flexión a cuatro puntos y tres medidas más de la serie 3 con ensayos de flexión a tres puntos, obteniendo una media de **550,34 J/m²**. El intervalo de confianza (IC) es [517,20; 583,49] y su coeficiente de variación (CV) de 6,87%.



En cuanto a G_{Icperp} , de la serie 2 se obtienen cuatro medidas con una media de **517,06 J/m²**, su IC es [507,76; 526,36] y un CV de 1,84%. De la serie 3 se obtienen seis medidas con una media de **401,85 J/m²**, su IC es [383,50; 420,20] y su CV es 5,71%, todos estos ensayos han sido de flexión a tres puntos. Se observa CV_s inferiores al 10% e IC_s bastante próximos que indican que las medidas tomadas son bastante homogéneas.

Los resultados de G_{Icpar} son superiores a los valores de G_{Icperp} obtenidos en las distintas series, para las probetas de la serie 2 son un 6,44% superiores y para las probetas de la serie 3, un 36,95% superiores. Esta diferencia se debe a que las probetas de la serie 2 tienen una inclinación a lo largo del espesor indeseada.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado ensayos para comparar la tenacidad a fractura intralaminar en materiales compuestos cuando el crecimiento de la grieta es paralelo y perpendicular a las fibras. Se han ensayado tres series distintas de probetas utilizando diferentes técnicas para la generación de la grieta inicial.

Se obtienen dos valores apreciablemente distintos de G_{Icperp} , uno para cada una de las dos series de probetas fabricadas con propagación de grieta perpendicular a la fibra, por diferencias en la fabricación de las probetas seguidas en las distintas series. El resultado obtenido de G_{Icpar} , es siempre superior a los dos obtenidos de G_{Icperp} . Esto se puede deber a fenómenos macroscópicos como el bridging observado en ambos tipos de probetas que deberán ser revisados en futuros ensayos. Por otra parte, un análisis microestructural de la propagación de la grieta en ambos casos permitiría evaluar la influencia de la microestructura en esta diferencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Educación (FPU 2009/3968), el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto MAT2009-14022), el Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Proyecto MAT2012-37387), la Junta de Andalucía y el Fondo Social Europeo (Proyecto P08-TEP-4051).

REFERENCIAS

1. International Series. Fibre-reinforced plastic composites-Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{Ic} , for unidirectionally reinforced materials, ISO 15024; 2001.
2. CEPERO, F., GARCÍA, I.G., JUSTO, J., MANTIČ, V. Experimental comparison between the transverse fracture toughness of a unidirectional laminate corresponding to either longitudinal or transverse crack growth (2014) 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014.
3. GARG A. Intralaminar and interlaminar fracture in graphite/epoxy laminates. *Engineering Fracture Mechanics*; 23(4) 1986: 719-733.