

A. Argüelles<sup>a</sup>, J. Viña<sup>b</sup>, S. Rubiera<sup>a</sup>, C. Rocandio<sup>b</sup>,  
S. Sanchez<sup>a</sup>, J. Bonhomme<sup>a</sup>, I. Viña<sup>a</sup>, V. Mollón<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, 33204 Gijón, Asturias

<sup>b</sup>Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo, 33204 Gijón, Asturias

\*antonio@uniovi.es

## Influencia de la metodología de ensayo en el comportamiento a fatiga de un compuesto sometido a modo mixto I/II de fractura

### RESUMEN

#### Historia del artículo:

Recibido 23 de Mayo 2019

En la versión revisada 20 de Junio 2019

Aceptado 5 de Julio 2019

Accesible online 18 de Enero de 2021

#### Palabras clave:

Fractura interlaminar

Fatiga

Modo mixto

Deslaminación

Compuesto

Los Materiales compuestos fabricados mediante la superposición de láminas y algunas morfologías específicas, son susceptibles de perder parte de su capacidad resistente por la presencia de deslaminaciones entre sus láminas. El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente la generación y propagación de estas grietas interlaminares en un compuesto carbono-epoxi sometido a sollicitación dinámica bajo modo mixto de fractura I/II, utilizando para este propósito dos metodologías de ensayo diferentes, por una parte la estandarizada MMB (Mixed-Mode Bending) y por otra el ensayo tipo ADCB (Asymmetric Double Cantilever Beam), con la intención de explorar la viabilidad del ensayo ADCB como alternativa más sencilla de ejecución, en especial en ensayos de fatiga, al ensayo MMB.

Con este propósito y tras una previa caracterización estática del material en la que se determinaron los valores críticos de la tasa de liberación de energía en ambos métodos de ensayo se definieron los niveles de tasa de liberación de energía a aplicar en los ensayos de fatiga, para dos grados de modo mixto GII/Gc, de 0,2 y 0,4 (0,33 ADCB) y una relación de niveles de sollicitación a fatiga de  $R = G_{min}/G_{max} = 0,1$ . A partir de estos datos experimentales se obtuvieron las curvas de iniciación a fatiga  $\Delta G-N$ . El resultado más relevante del trabajo es que, en general, el modo mixto MMB proporciona límites de fatiga diferentes en función del grado de modo mixto, mientras que en el ensayo tipo ADCB los límites de fatiga tienden a un mismo valor

## Influence of the test methodology on the fatigue behaviour of a composite subjected to a mixed fracture mode I/II

### ABSTRACT

#### Keywords:

Interlaminar fracture

Fatigue

Mixed Mode

Delamination

Composite

Composite materials manufactured by means of the superposition of layers and some specific morphologies, are susceptible to losing part of their resistant capacity due to the presence of delaminations between their layers. The objective of this work is to evaluate experimentally the generation and propagation of these interlaminar cracks in a carbon-epoxy composite subjected to dynamic stress under mixed fracture mode I/II, using for this purpose two different test methodologies, on the one hand the standardized MMB (Mixed-Mode Bending) and on the other hand the ADCB (Asymmetric Double Cantilever Beam), with the intention of exploring the viability of the ADCB test as a simpler alternative of execution, especially in fatigue tests, to the MMB test.

For this purpose and after a previous static characterization of the material in which the critical values of the energy release rate were determined in both test methods, the energy release rate levels to be applied in the fatigue tests were defined for two GII/Gc mixed mode grades of 0.2 and 0.4(0,33 ADCB) and a ratio of stress levels to fatigue of  $R = G_{min}/G_{max} = 0,1$ .  $\Delta G-N$  fatigue initiation curves were obtained from these experimental data. The most relevant result of the work is that, in general, the MMB mixed mode provides different fatigue limits depending on the degree of mixed mode, whereas in the ADCB type test the fatigue limits tend to have the same value.

## 1 Introducción

El empleo habitual de materiales compuestos de altas prestaciones es una realidad en una gran variedad de sectores industriales como el deporte, el naval, aeronáutico, etc. lo cual está justificado debido a sus excelentes propiedades mecánicas, entre otras, en especial su alta resistencia y rigidez específica. Muchos de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras continuas están fabricados por sucesivas láminas apiladas del material. Esta configuración hace que uno de los fallos principales al que son sensibles, tanto durante el proceso de fabricación como a lo largo de su vida útil sea la deslaminación, es decir, la generación de grietas o fisuras entre dos laminas contiguas, que pueden propagarse bajo diferentes tipos de sollicitación mecánica estática o dinámica, lo que puede originar una separación entre capas adyacentes de material. La propagación de estas grietas interlaminares origina una disminución en las propiedades mecánicas del elemento pudiendo causar el fallo catastrófico de la estructura, lo cual genera la necesidad de ahondar en el conocimiento de los mecanismos de daño implicados en el proceso y la cuantificación de la resistencia del material ante este fenómeno. Con este objetivo se han desarrollado numerosas metodologías de ensayos, basados todos ellos en la mecánica de fractura, tanto en modos puros [1-4] como en modos mixtos [5-7]. En este campo el modo mixto I/II más utilizado y normalizado por ASTM es el denominado MMB, Mixed-Mode Bending [8], aunque se han desarrollado otros métodos en los que el utillaje de ensayo es menos complejo y por tanto los resultados de los ensayos menos dependientes del operario encargado de los mismos, entre ellos el ensayo ADCB, Asymmetric Double Cantilever Beam, se está utilizando para el estudio del proceso de deslaminación en modo mixto I/II. Tiene la ventaja de presentar una configuración de ensayo sencilla, análoga a la utilizada en la caracterización del material a fractura bajo modo I, con utillajes de ensayo muy simples, la diferencia entre ambos radica en que la probeta, tipo ADCB, tiene su grieta fuera del plano de simetría, esta asimetría origina modos mixto I/II en el frente de grieta, variando la posición de la grieta se pueden obtener diferentes grados de modo mixto. En este campo, algunos de los primeros estudios realizados con esta configuración de ensayo fueron llevados a cabo por Bao et al. [9] proponen una formulación que permite obtener la tasa de liberación de energía total y sus particiones, componentes de modo I y II, teniendo en cuenta la ortotropía del material. Quiao et al. [10] modelizan varios tipos de geometrías de vigas según los tipos de unión en el frente de grieta. Más adelante, Ducept et al. [11] desarrollan dos métodos de cálculo y partición de la tasa de liberación de energía; el método global y local. Mientras que el método global solo fue capaz de predecir el comportamiento de modo I, se observó que el método local daba buenos resultados de partición de GI y GII y fue posteriormente utilizado y adaptado por diversos autores como Prombut et al. [12]. Mollón et al. [13, 14] desarrollan una adaptación de la teoría de vigas modificada para este ensayo mediante una calibración de la flexibilidad, de la de la cual se extraen dos parámetros de ajuste  $\Delta$  y  $E_{eq}$ . Por su parte, Shokrieh et al [15] desarrollan el método Modified Elastic Beam Theory (MEBT) a partir del propuesto por Mollón et al.

En este trabajo se analiza el comportamiento a fatiga de un material compuesto carbono epoxi bajo sollicitación dinámica a fatiga utilizando metodologías de ensayo ADCB y MMB con el objetivo de evaluar el potencial del ensayo ADCB como sustituto de la metodología de ensayo MMB para este tipo de ensayos.

## 2 Materiales y probetas

El material estudiado en este trabajo ha sido fabricado a partir de un preimpregnado de resina epoxi y un refuerzo unidireccional de carbono MTM45-1/IM7 (12k)-134 gr/m<sup>2</sup> con un 32% de resina en peso. En la tabla 1, se presentan sus constantes elásticas (E Y G) y resistencias últimas ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) en la dirección longitudinal de las fibras ("11") y en dirección transversal ("22").

Tabla 1. Propiedades material.

Módulos elásticos		Tensiones de rotura a tracción		Módulo a cortante	Tensión de cortadura
$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$\sigma_{11}$ (MPa)	$\sigma_{22}$ (MPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
173,83	12,59	2199,41	36,23	5,31	93,06

La fabricación de este material compuesto se realiza mediante el sucesivo apilamiento manual de capas de preimpregnado. Durante este proceso se introduce un inserto no adhesivo generador de la deslaminación inicial, dependiendo de la metodología de ensayo se sitúa en el plano medio del laminado para ensayos MMB o fuera del plano medio para ensayos ADCB variando el grado de modo mixto mediante variaciones en la asimetría en la que se coloca el inserto: Para  $G_{II}/G=0.2$ : [0<sub>15</sub>//0<sub>45</sub>] y para  $G_{II}/G=0.33$ : [0<sub>7</sub>//0<sub>53</sub>]

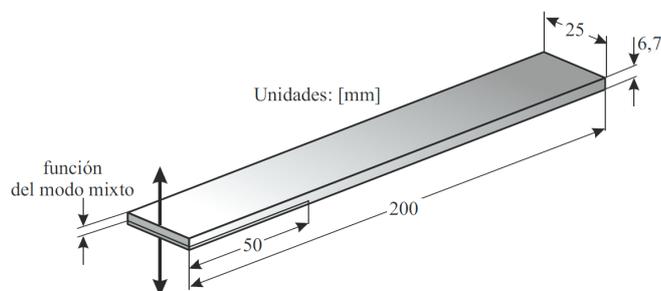


Figura 1. Geometría de probeta.

Es necesario reseñar que aunque el objetivo inicial del trabajo ha sido comparar dos grados de modo mixto previamente definidos 0,2 y 0,4 en el caso de ensayos ADCB el grado de modo mixto está limitado por la geometría de probeta y no ha sido posible alcanzar el grado 0,4, utilizando en este trabajo el máximo posible que ha sido 0,33.

## 3 Metodología experimental

Todos los ensayos fueron realizados en una máquina servohidráulica de ensayos MTS 810 con una célula de carga de 5KN.



### 3.1 Caracterización estática

Bajo sollicitación estática se determinaron las propiedades de fractura críticas del material: cargas, desplazamientos y tasas de liberación de energía críticos ( $P_{cr}$ ,  $\delta_{cr}$ ,  $G_{cr}$ ). Para la determinación de la tasa de liberación de energía se han utilizado las formulaciones propuestas por la norma ASTM D6671/D6671M-13e1 [8], para tipología de ensayo MMB y la propuesta por Mollón et al [13 y 14] para ensayos ADCB.

### 3.2 Caracterización dinámica

El programa experimental a fatiga realizado ha tenido como objetivo determinar las curvas de fatiga del material ensayado, cuando son sometidos a procesos de deslaminación a fractura bajo modo mixto I/II, y sollicitación dinámica. En este trabajo se ha considerado que el fallo por fatiga se ha producido en el elemento cuando se inicia la propagación de una grieta interlaminar en el mismo.

La ejecución de estos ensayos se ha realizado a niveles de sollicitación constantes ( $45\%G_c$ ,  $50\%G_c$ ,  $65\%G_c$ ,...), combinado con ensayos aislados. Para su definición se ha tomado como referencia los resultados obtenidos de la caracterización previa del material a nivel estático, calculando estos niveles como porcentajes de la tasa de liberación de energía crítica  $G_c$ . Todos los ensayos a fatiga se realizaron con un coeficiente de asimetría de  $R=0,1$ .

## 4 Resultados experimentales

### 4.1 Régimen estático

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados obtenidos para los dos grados de modo mixto estudiados y sollicitación estática utilizando las metodologías de ensayo MMB y ADCB, respectivamente.

**Tabla 2.** Resultados MMB, estáticos

	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )		$G_I$ (J/m <sup>2</sup> )		$G_{II}$ (J/m <sup>2</sup> )	
	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Media	271	469	216	280	54	189
Desv. Tip	23	36	19	21	4	15
C.V. [%]	8	7	9	8	8	8

**Tabla 3.** Resultados ADCB, estáticos

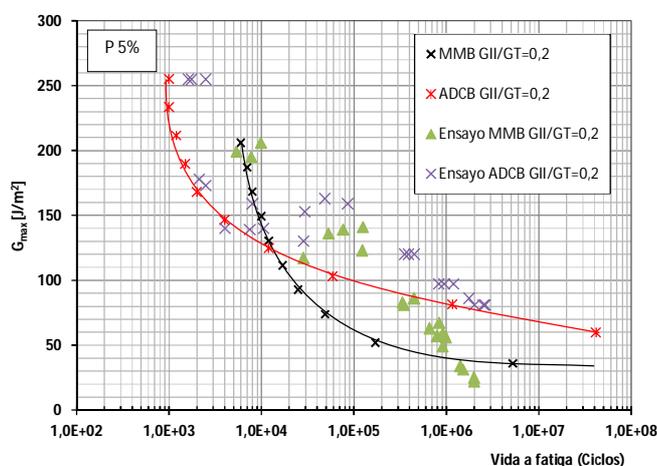
	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )		$G_I$ (J/m <sup>2</sup> )		$G_{II}$ (J/m <sup>2</sup> )	
	0.2	0.33	0.2	0.33	0.2	0.33
Media	372	480	285	320	87	161
Desv. Tip	25	108	32	21	7	15
C.V. [%]	9	22	11	8	8	9

### 4.2 Régimen Dinámico

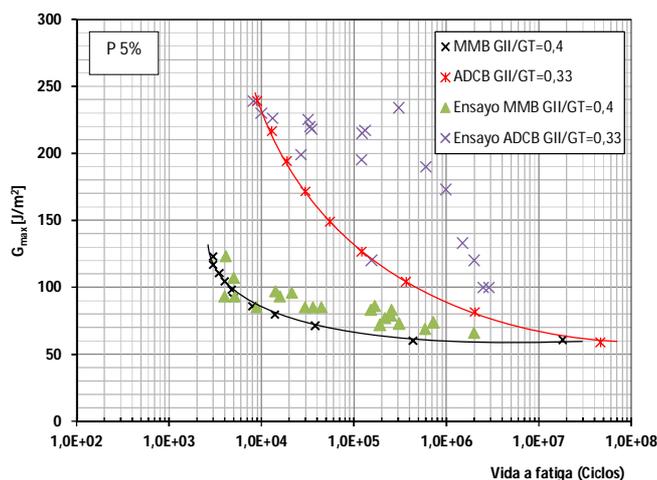
A continuación se presentan los resultados derivados de la caracterización dinámica realizada. Para su presentación, junto a los datos experimentales, se ha utilizado un modelo

estadístico basado en una distribución de Weibull propuesto por Castillo et al [16]. Este modelo permite obtener todo el campo de vida a fatiga, a partir una muestra representativa de datos experimentales a fatiga.

En las figuras 2 y 3 para ambas metodologías de ensayo y relaciones de modo mixto  $G_{II}/G_{total}=0,2$  y  $0,4$  (0,33 para ADCB) respectivamente se han dibujado las curvas que representan los datos experimentales junto con la probabilidad de fallo a fatiga, del 5%, de acuerdo al modelo de Weibull referenciado anteriormente, en las que se ha representado la energía de fractura total máxima ( $G_I+G_{II}$ ) bajo sollicitación en modo mixto I/II frente al número de ciclos necesarios para la iniciación de una grieta por fatiga. En este trabajo se ha considerado que el elemento falla por fatiga cuando se produce la iniciación del proceso de deslaminación y se constata visualmente en uno de los laterales de la probeta ensayada.



**Figura 2.** Comportamiento a fatiga para una relación de modo mixto  $G_{II}/G_{total} = 0,2$  y metodologías de ensayo MMB y ADCB



**Figura 3.** Comportamiento a fatiga para una relación de modo mixto  $G_{II}/G_{total} = 0,4$  para ensayo MMB y de 0,33 para ADCB

En relación al comportamiento a fatiga del material, en función de la metodología de ensayo utilizada MMB o ADCB, se observa un comportamiento diferente en las zonas de bajo número de ciclos y de alto número de ciclos, cuando se modifican las proporciones de modo mixto aplicadas a las



muestras ensayadas así, para la probabilidad de rotura considerada, para el ensayo tipo MMB la energía máxima de fractura para una relación de modo mixto de 0,4 es sensiblemente inferior a la alcanzada para el grado de modo mixto 0,2. Mientras que para ensayo tipo ADCB en la zona de bajo número de ciclos las energías de fractura alcanzadas son similares para los dos grados de modo mixto considerados.

En cuanto a la zona de vida infinita, se ha considerado en este trabajo el límite de fatiga cuando se superan los dos millones de ciclos, se observan comportamientos diferentes dependiendo del método de ensayo utilizado. Para el tipo ADCB los límites de fatiga son semejantes del orden de 60J/m<sup>2</sup> para ambas proporciones de modo mixto estudiadas.

Para la tipología MMB el límite de fatiga está condicionado por la proporción de modo mixto utilizada en la caracterización a fatiga del material, resultando límites de fatiga de: 36 J/m<sup>2</sup> para relación de modos de 0,2 y de 61 J/m<sup>2</sup> para relación de modos de 0,4.

## 5 Conclusiones

Seguidamente se presentan las conclusiones más relevantes en relación a la influencia de la metodología de ensayo en el comportamiento a fatiga de un material compuesto sometido a modo mixto de sollicitación I/II cuando se modifica el grado de modo mixto.

Respecto a los resultados experimentales obtenidos para las dos metodologías de ensayo y sollicitación estática, se obtienen valores ligeramente más elevados cuando se realizan bajo ensayo ADCB, para los dos grados de modo mixto estudiados. La caracterización a fatiga de un material compuesta bajo modo mixto I/II de sollicitación a fractura es más sencilla, desde el punto de vista experimental, utilizando la metodología de ensayo del tipo ADCB, aunque su ejecución está condicionada por el grado de modo mixto al que se desee realizar la caracterización del material compuesto. Para el grado de modo mixto más elevado, considerado en este trabajo: 0,4 para MMB y 0,33 para ADCB, los límites de fatiga alcanzados son prácticamente semejantes, en función de lo cual se podría utilizar el ensayo tipo ADCB como sustituto del ensayo MMB para la determinación del límite de fatiga del material utilizado en este trabajo. Para proporciones de modo mixto bajas, 0,2 en este trabajo, no se podría asegurar la anterior conclusión a la vista de los resultados aportados por la metodología MMB y que son sensiblemente inferiores a las aportadas por la metodología ADCB. Para el ensayo ADCB el límite de fatiga obtenido no depende del grado de modo mixto utilizado, aunque las dispersiones de los resultados de fatiga son más elevados cuando la proporción de modo II aumenta, en general las dispersiones de los resultados experimentales son más elevados para la metodología de ensayo ADCB que para la MMB y para los dos grados de modo mixto estudiados.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico dado para la realización del presente trabajo por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de proyecto RTI2018-095290-B-I00.

## Referencias

- [1] L. Yao, R. Alderliesten, M. Zhao y R. Benedictus, «Bridging effect on mode I fatigue delamination behavior in composite laminates,» *Composites: Part A*, vol. 63, pp. 103-109, 2014.
- [2] A. J. Brunner, S. Stelzer, G. Pinter y G. P. Terrasi, «Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer-matrix laminates: Towards the development of a standardized test procedure,» *International Journal of Fatigue*, vol. 50, pp. 57-62, 2013.
- [3] A. López-Menéndez, J. Viña, A. Argüelles, J. Bonhomme, V. Mollón y M. Lozano, «A new methodology for testing composite materials in mode III of fracture,» de ECCM16-16th European Conference on Composite Materials, Seville, Spain, 2014.
- [4] A. Argüelles, J. Viña, A. Canteli, P. Coronado y V. Mollón, «Influence of temperature on the delamination process under mode I fracture and dynamic loading of two carbon-epoxy composites,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 68, pp. 207-214, 2015.
- [5] R. Jones, S. Stelzer y A. J. Brunner, «Mode I, II and mixed mode I/II delamination growth in composites,» *Composite Structures*, vol. 110, p. 317-324, 2014.
- [6] M. V. Fernández, M. F. S. F. de Moura, L. F. M. da Silva y A. T. Marques, «Mixed-mode I+II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bedding test,» *Composites: Part A*, vol. 44, pp. 63-69, 2013.
- [7] J. G. Williams, «Observations on the analysis of mixed mode delamination in composites,» *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 189-198, 2015.
- [8] ASTM D6671/D6671M-13e1 Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites
- [9] G. Bao, S. Ho, Z. Suo y B. Fan, «The role of material orthotropy in fracture specimens for composites,» *Int. J. of Solids Structures*, vol. 29, nº 9, pp. 1105-1116, 1992.
- [10] P. Quiao y F. Chen, «On the compliance and energy release rate of generically-unified beam-type fracture specimens,» *Journal of composite materials*, 2010.
- [11] F. Ducept, D. Gamby y P. Davies, «A mixed-mode failure criterion derived from test on symmetric and asymmetric specimens,» *Composites Science and Technology*, nº 59, pp. 609-619, 1999.
- [12] P. Prombut, L. Michel, F. Lachaud y J. J. Barrau, «Delamination of multidirectional composite laminates at 0°/0° ply interfaces,» *Engineering Fracture Mechanics*, nº 73, pp. 2427-2442, 2006.
- [13] V. Mollón, J. Bonhomme, J. Viña y A. Argüelles, «Theoretical and experimental analysis of carbon epoxy asymmetric dcb specimens to characterize mixed mode fracture toughness,» *Polymer testing*, vol. 29, pp. 766-770, 2010.
- [14] V. Mollón, J. Bonhomme, J. Viña y A. Argüelles, «Mixed mode fracture toughness: An empirical formulation for Gi/GII determination in asymmetric DCB specimens,» *Engineering structures*, vol. 32, pp. 3699-3703, 2010.
- [15] M. M. Shokrieh y A. Zeinedini, «A novel method for calculation of strain energy release rate of asymmetric double cantilever laminated composite beams,» *Appl Compos Mater*, nº 21, pp. 399-415, 2014.
- [16] Castillo E., Fernández Canteli A.: A general regression model for lifetime evaluation and prediction. *Int J of Fracture*, 107, (2001) 117-137

