

S. Rubiera<sup>a</sup>, A. Argüelles<sup>a</sup>, J. Viña<sup>b</sup>, C. Rocandio<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

## Comportamiento a fatiga frente a deslaminación bajo modo mixto I/II y ensayo ADCB de un material compuesto carbono/epoxi

### RESUMEN

#### Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

#### Palabras clave:

Modo mixto

Fractura interlaminar

Fatiga

Compuesto

Algunas morfologías de materiales compuestos son susceptibles de perder capacidad resistente por la presencia de deslaminaciones interlaminares. 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 una metodología de ensayo tipo ADCB.

De una previa caracterización estática del material se obtuvo el valor crítico de la tasa de liberación de energía, a partir de la cual se definieron los niveles de tasa de liberación de energía crítica a aplicar en los ensayos de fatiga, los valores considerados fueron: 45, 50, 55, 60, 65, 70 y 75% de Gcr. En todos los ensayos dinámicos, se ha utilizado un coeficiente de asimetría de  $R=0,1$ . A partir de estos datos experimentales se obtuvieron las curvas de iniciación a fatiga  $\Delta G-N$  (número de ciclos necesarios para la nucleación de una grieta, para una tasa de liberación de energía dada) observándose límites de vida a fatiga del orden del 38% de Gcr. Además se representaron las curvas de velocidad de propagación de la grieta  $da/dN-G$ , que mostraron seguir la tendencia de la ley de Paris. Por otra parte se llevó a cabo un análisis fractográfico de las superficies deslaminadas, observándose la presencia de tipologías de fractura típicas de ambos modos, I y II, tanto en la iniciación como en la propagación de la grieta, constatando la presencia de modo mixto I/II en el ensayo tipo ADCB.

## Fatigue behaviour against delamination under mixed-mode I/II and ADCB test of a carbon/epoxy composite material

### ABSTRACT

#### Keywords:

Mixed Mode

Interlaminar fracture

Fatigue

Composite

Some composite morphologies are susceptible to loss of capacity due to the presence of interlaminar delaminations. The objective of this work is to experimentally evaluate the generation and propagation of these interlaminar cracks in a carbon-epoxy composite subjected to dynamic stress under mixed fracture mode I / II, using an ADCB type test methodology for this purpose.

From a previous static characterization of the material the critical value of the energy release rate was obtained, from which the levels of the critical energy release rate to be applied in the fatigue tests were defined, the values considered were: 45, 50, 55, 60, 65, 70 and 75% Gcr. In all the dynamic tests, an asymmetry coefficient of  $R = 0.1$  was used. From these experimental data the fatigue initiation curves  $\Delta GN$  (number of cycles necessary for the nucleation of a crack, for a given rate of energy release) were obtained, observing fatigue life limits of the order of 38% of Gcr. In addition, the crack propagation velocity curves  $da / dN-G$  were shown, which showed the trend of the Paris law. On the other hand, a fractographic analysis of the delaminated surfaces was carried out, showing the typical fracture typologies of both modes, I and II, both in the initiation and propagation of the crack, showing the presence of mixed mode I / II in the ADCB type assay.

## 1 Introducción

La presencia, cada vez más habitual, de los materiales compuestos en distintos sectores industriales de alto valor añadido, como aeronáutico, naval, etc. lleva consigo la necesidad de estudiar en profundidad su comportamiento y sus mecanismos de daño. Las distintas condiciones y ciclos de carga a los que estarán sometidos durante su vida en servicio, hacen que sea complejo determinar con exactitud su comportamiento, cuando el objetivo final es la realización un diseño óptimo y económico de piezas fabricadas con estos materiales. Por otra parte su fabricación, en muchos casos, mediante el apilamiento de capas de preimpregnado, pueden favorecer la generación y propagación de grietas interlaminares y que bajo ciertos estados de sollicitación originan la separación de capas adyacentes, fenómeno conocido como deslaminación. Este fallo puede estudiarse, a nivel experimental, utilizando cualquiera de los modos puros de fractura (I, II o III) o en combinaciones de estos, dando lugar a los modos mixtos de fallo.

Por lo cual, se han desarrollado numerosos tipos de ensayos que permiten determinar el comportamiento frente a deslaminación de estos materiales, basándose en la mecánica de la fractura. Algunos de los ensayos más utilizados son, el ensayo DCB (Double Cantilever Beam) para el estudio del fallo en modo I, que se encuentra normalizado según la norma ASTM D5528. La deslaminación en modo II se estudia habitualmente mediante el ensayo ENF (End Notched Flexure) que ha sido normalizado recientemente según la norma ASTM D7905.

El estudio de la deslaminación en modo III aún no ha sido ascendido a norma internacional, aunque existen varias propuestas de ensayo para determinar la fractura bajo este modo y varios grupos están desarrollando nuevos modelos de ensayo.

De los diferentes tipos de modos mixtos de fractura, el más destacable es el modo mixto I/II. Para su estudio se han desarrollado distintos ensayos, siendo el más utilizado el MMB (Mixed Mode Bending) regido por la norma ASTM D6671 que combina los ensayos DCB y ENF. Aunque se han desarrollado muchos otros ensayos para el estudio de la deslaminación en modo mixto I/II; el ensayo ADCB (Asymmetric Double Cantilever Beam), en el que el plano de la grieta está fuera del plano central de la probeta, destaca por presentar una configuración de ensayo sencilla a la vez que permite producir un estado de carga en modo mixto. Se trata de un ensayo que utiliza una metodología semejante al ensayo DCB, para modo I, con la diferencia de la asimetría de la grieta en la probeta de ensayo, permitiendo obtener distintos grados de mixticidad en función de la disposición de la grieta respecto al plano medio del laminado.

La determinación analítica de la tasa de liberación de energía para este ensayo no es simple. La ausencia de norma que defina el ensayo ADCB hace que existan diferentes formulaciones en la bibliografía para su determinación.

Para realizar un estudio global del problema es necesario tener en cuenta otro de los fenómenos asociados a la deslaminación, en estos materiales, a parte de la iniciación, y que es su propagación a lo largo de la vida útil del elemento,

especialmente cuando está sujeto a cargas cíclicas, línea de trabajo poco estudiada hasta el momento, debido posiblemente al elevado costo económico que supone su desarrollo a nivel experimental.

La propagación de estas grietas interlaminares da lugar a una disminución de las propiedades mecánicas del elemento de composite, pudiendo llegar al fallo catastrófico de este. Por este motivo es necesario realizar un estudio exhaustivo de su comportamiento en condiciones similares a las que estará sometido durante su vida en servicio.

El crecimiento de grietas por fatiga, bajo otros modos de sollicitación a fractura, ha sido estudiado por diferentes investigadores [1-5] y sin embargo, incluso para estos modos estándar de sollicitación, el comportamiento de los composites frente a este fenómeno sigue sin estar claramente definido. Algunos de los principales problemas a los que se enfrentan los científicos a la hora de caracterizar la propagación de grietas por fatiga en estos materiales son el incremento en la resistencia al avance de la deslaminación provocado, generalmente, por la presencia de puentes de fibra que produce valores de las tasas de liberación de energía artificialmente elevados, así como la dispersión en los resultados

Los objetivos de este trabajo son explorar la viabilidad del ensayo ADCB en la caracterización frente al proceso de deslaminación a fatiga bajo modo mixto de un material compuesto carbono epoxi, de última generación, así como la aportación de datos necesarios para el cálculo resistente bajo sollicitación dinámica y este tipo de sollicitación de elementos fabricados con este material. Para lo cual se estudió a nivel experimental el proceso de inicio y crecimiento por fatiga de grietas interlaminares bajo modo mixto I/II en un material compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de carbono unidireccional, utilizando para ello el ensayo tipo ADCB.

## 2 Procedimiento experimental

En este trabajo se ha estudiado un compuesto de matriz epoxídica y refuerzo unidireccional de fibra de carbono, fabricado a partir del preimpregnado MTM45-1/IM7 (12k)-134gr/m<sup>2</sup> con un 32% de resina en peso. Las placas de material compuesto se han fabricado mediante el apilamiento manual de laminas de este preimpregnado. Durante este proceso se ha introducido un inserto generador de la deslaminación inicial, siguiendo la secuencia de apilamiento [0°15//0°45].

La asimetría en la colocación del inserto genera, cuando la probeta se carga de forma similar al ensayo DCB (modo I), un grado de mixticidad GII/G de 0.24. La utilización en este trabajo de este tipo de material compuesto, de los considerados de última generación, se justifica por presentar la ventaja, frente a otros compuestos similares, de que su proceso de curado se produce a temperatura y presión relativamente baja, lo que facilita el proceso de fabricación de piezas estructurales relativamente grandes, manteniendo unas excelentes propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas del material, constantes elásticas (E y G) y resistencias últimas ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) en la dirección longitudinal



de las fibras "11" y en dirección transversal "22", se muestran en la Tabla 1.

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	2.16	93.06

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material IM7/MTM45-1.

Las probetas a ensayar se mecanizan a partir de las planchas de compuesto fabricadas, con las dimensiones que se muestran en la Figura 1.

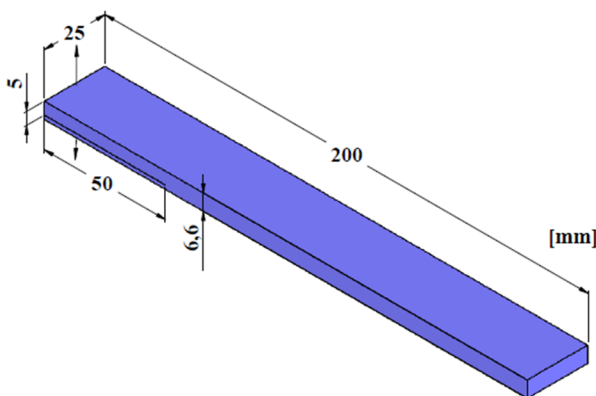


Figura 1. Dimensiones de las probetas.

## 2.1 Metodología experimental

Los ensayos analizados en este estudio se han realizado en una máquina servohidráulica de ensayos con una célula de carga de 5kN.

Para el estudio del comportamiento frente a deslaminación en modo mixto I/II se ha utilizado la configuración más representativa del ensayo ADCB, tanto a nivel estático como a fatiga.

### 2.1.1 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 a partir de estas determinar los parámetros de estudio a fatiga.

De entre las formulaciones presentes en la bibliografía para el cálculo de la tasa de liberación de energía, en este trabajo se ha utilizado la propuesta por Bao et al. [5]

### 2.1.2 Caracterización a fatiga

El programa experimental a fatiga realizado ha tenido como objetivos: determinar las curvas de iniciación del proceso de deslaminación y estudiar su fase de propagación cuando se somete a fractura bajo modo mixto I/II, con un ensayo tipo ADCB.

La ejecución de estos ensayos, se ha realizado a siete niveles de sollicitación constantes (40% $G_{cr}$ , 45% $G_{cr}$ , 50% $G_{cr}$ ,

55% $G_{cr}$ , 60% $G_{cr}$ , 65% $G_{cr}$ , 70% $G_{cr}$ ). Para su definición se han 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  $G_{cr}$ .

Todos los ensayos a fatiga se realizaron en una máquina servohidráulica de ensayos bajo control de desplazamiento, empleando un coeficiente de asimetría de desplazamientos de  $R=0.1$  y una frecuencia de 3Hz.

## 3 Resultados

### 3.1 Ensayos estáticos

Para la caracterización estática del material se llevaron a cabo cinco ensayos cuyos resultados medios de tasas de liberación de energía se muestran a continuación.

La Tabla 2 recoge las tasas de liberación de energía crítica total y sus particiones de modo I y II, así como el grado de modo mixto ( $G_{II}/G$ ), obtenido en la iniciación del crecimiento de la deslaminación.

Propiedad	Valor	C.V. (%)
$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	371.93	14.59
$G_I$ (J/m <sup>2</sup> )	285.02	14.52
$G_{II}$ (J/m <sup>2</sup> )	86.92	14.80
$G_{II}/G$	0.234	0.73

Tabla 2. Tasa de liberación de energía crítica obtenida en ensayos estáticos

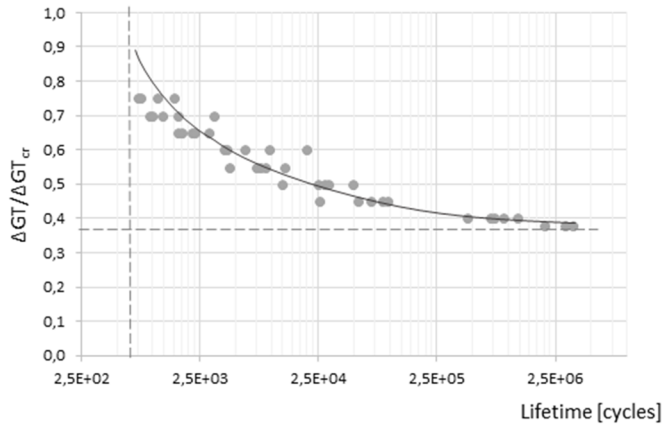
### 3.2 Ensayos dinámicos

#### 3.2.1 Iniciación por fatiga

En la Figura 2 se ha representado las curvas  $\Delta G-N$  de iniciación de la deslaminación, es decir, el número de ciclos de carga necesarios para la nucleación de la grieta, para una tasa de liberación de energía dada. Se expresan los niveles de sollicitación ensayados como porcentajes de las tasas de liberación de energía total crítica ( $G_I+G_{II}$ ) obtenida durante la fase de caracterización estática del material. Se ha considerado como límite de fatiga dos millones y medio de ciclos de carga y se ha considerado que la deslaminación se ha iniciado cuando se aprecia visualmente mediante microscopio óptico de 70x en uno de los laterales de la probeta y simultáneamente se produce un cambio en la flexibilidad de la probeta

Se observó que la deslaminación no se inicia para un porcentaje de la energía de fractura inferior al 38% de  $G_{cr}$  que corresponde con una energía de deslaminación de aproximadamente 141 J/m<sup>2</sup>, valor que se puede considerar como límite experimental de fatiga.

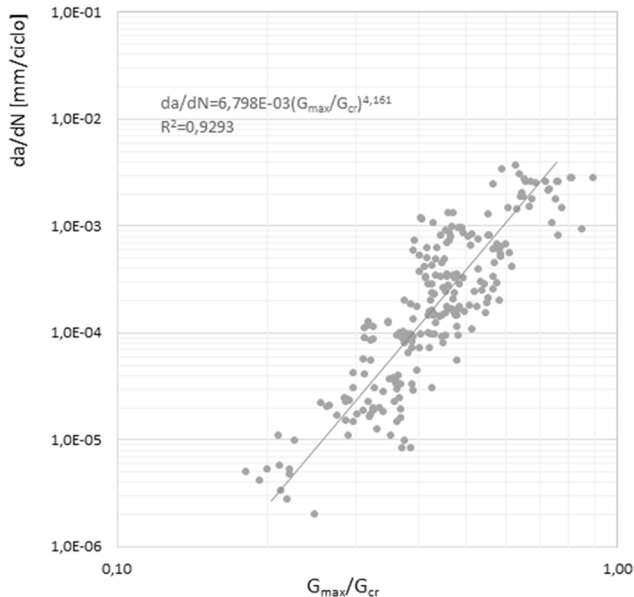




**Figura 2.** Curvas de iniciación de la deslaminación a fatiga en función del nivel de sollicitación.

### 3.2.2 Crecimiento por fatiga

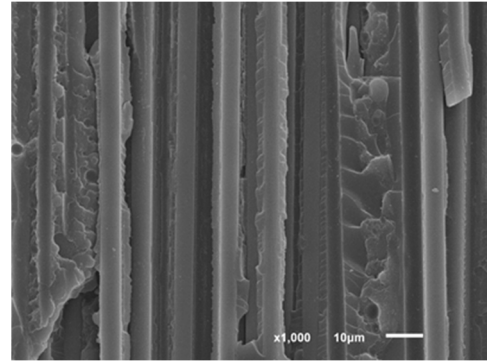
En la figura 3 se ha representado la velocidad de crecimiento de grieta, bajo sollicitación a fatiga, frente a las tasas de liberación de energía total máxima aplicada en los ensayos dinámicos respecto a la total crítica estática, también se presenta la ley de París obtenida en la región II. Se observa que las velocidades de crecimiento de la deslaminación en función de las tasas de liberación de energía siguen una tendencia similar y responde a la ley de Paris en la región II. Del tipo:  $da/dN=C (\Delta G)^m$ , Con parámetros para este material de  $C= 6.798 \cdot 10^{-03}$  mm/ciclo y  $m=4.161$  cuando se considera la energía total de modo mixto.



**Figura 3.** Velocidad de propagación en función de la tasa de liberación de energía aplicada.

### 3.2.3 Fractografía

En la figura 4 se pueden observar morfologías de fractura observadas, típicas tanto de modo I (river markings) como de modo II (hackles o cusps) constatando la presencia de modo mixto I/II en el ensayo tipo ADCB. También se observan fibras rotas procedentes de la rotura de los puentes de fibra generados durante el proceso de deslaminación.



**Figura 4.** Superficie de fractura con morfologías de modo mixto I/II.

## 4 Conclusiones

De los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones: La iniciación de la deslaminación no se producirá por debajo del 38% de la energía de fractura crítica. La velocidad de propagación de las grietas interlaminares se ralentiza según va aumentando la longitud de la deslaminación, lo cual se puede achacar a la presencia de puentes de fibra y al aumento en su número al avanzar la deslaminación. La velocidad de crecimiento de la deslaminación aumenta al aumentar la tasa de liberación de energía aplicada siguiendo una tendencia similar a la de la ley de Paris. El análisis fractográfico revela la presencia de tipologías de fractura típicas de modo I y modo II, constatando la presencia de un modo mixto I/II en el ensayo tipo ADCB. Las velocidades de crecimiento observadas mediante las estrías presentes en el análisis fractográfico se corresponden con las registradas durante la realización del ensayo.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el ministerio de ciencia e innovación, gobierno de España, dentro del proyecto de investigación MAT2013-48107-C3-3-R.

## Referencias

- [1] V. Mollón, J. Bonhomme, J. Viña and A. Argüelles, "Theoretical and experimental analysis of carbon epoxy asymmetric dcb specimens to characterize mixed mode fracture toughness" *Polymer testing*, **29**, pág. 766-770 (2010).
- [2] A. Argüelles, J. Viña, A. F. Canteli and J. Bonhomme, "Fatigue delamination, initiation, and growth, under mode I and II of fracture in a carbon-fiber epoxy composite" *Polymer Composites*, **31**, Nº. 4, pág. 700-706 (2010).
- [3] J. Bonhomme, A. Argüelles, J. Viña and I. Viña, "Fractography and failure mechanisms in static mode I and mode II delamination testing of unidirectional carbon reinforced composites" *Polymer Testing*, **28**, pág. 612-617 (2009).
- [4] O. Al-Khudairi, H. Hadavinia, A. Waggott, E. Lewis and C. Little, "Characterising mode I/mode II fatigue delamination growth in unidirectional fibre reinforced polymer laminates" *Materials & Design*, **66**, pág. 93-102 (2015).
- [5] G. Bao, S. Ho, Z. Suo and B. Fan, "The role of material orthotropy in fracture specimens for composites" *Int. J. of Solids Structures*, **29**, Nº 9, pág. 1105-1116 (1992).

