

CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO DE ACUERDO A LA MECÁNICA DE LA FRACTURA EN LAMINADOS 0/90

F. París*, A. Blázquez** y V. Mantić*

* Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092-Sevilla, España

** Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Rioja, C/ Luis de Ulloa 20, 26004-Logroño, España

Resumen.

Los laminados 0/90 de materiales compuestos fibrosos cuando son sometidos a carga en la dirección de las fibras a cero grados, presentan un daño consistente en la aparición de grietas transversales en las láminas a 90 grados y de grietas de delaminación entre las láminas de 0 y 90 grados. En este estudio se presenta la caracterización de esta aparición y de la propagación de estas grietas a la luz de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal. Se dedica una particular atención a la interacción entre las dos grietas anteriormente descritas. El estudio se realiza con el Método de los Elementos de Contorno, permitiendo el contacto entre los labios de la grieta. Se realiza un modelo plano suponiendo un estado de deformación plana generalizada.

Abstract.

The damage which appears in 0/90 laminates of fibrous composites under tension parallel to fibers in the 0 degree lamina consists in transversal cracks in the 90 degrees lamina and in delamination cracks between the 0 and 90 degrees laminas. An analysis of the appearance and growth of these cracks by the methods of the Linear Elastic Fracture Mechanics is presented in this study. A particular attention is paid to the interaction between both transversal and delamination cracks. A plane model considering the generalized plane strain state is applied. A Boundary Element Method code able to consider contact between crack faces is used in this study.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores dificultades cuando se diseñan estructuras y componentes de materiales compuestos es la disponibilidad de métodos fiables de predicción de fallo. El fallo es predicho mediante la satisfacción de un criterio. Desde que se utilizan industrialmente se han propuesto numerosos criterios de fallo, ninguno de los cuales tiene base física que permita correlacionarlo con la estructura interna de estos materiales. Además, son aplicados a campos tensionales (la mayoría de los criterios están en términos de las tensiones) bajo la suposición de que el material no está dañado.

El progreso futuro en la predicción de fallo de los materiales compuestos sólo será posible si las predicciones están basadas en mecanismos de fallo previos al fallo catastrófico de la estructura.

Dvorak y Laws [1] y Tan y Nuiesmer [2] estudian el proceso de fallo de una lamina por la formación y crecimiento de grietas transversales.

Los estudios sobre delaminación consideran la existencia previa de una grieta transversal completa, es decir su tamaño es el espesor de la lámina a 90°. París et al. [3] y Mantić et al. [4] estudian la evolución del estado tensional generado en el vértice de la grieta de delaminación conforme esta crece.

En este trabajo se estudia el proceso de fallo de un laminado 0/90 simétrico, desde que se forma y progresa la grieta en la lámina a 90° hasta que se produce una

delaminación considerable que origina el fallo del laminado.

En el apartado 2 se define el laminado bajo estudio, las características del material y las cargas. En el apartado 3 se analiza el proceso de crecimiento de la grieta transversal. El apartado 4 se dedica al estudio de la evolución de las tensiones en la interfaz entre las dos láminas conforme avanza la grieta transversal. En el apartado 5 se considera la presencia de una grieta de delaminación incipiente. En el apartado 6 se analiza la influencia de la delaminación sobre las condiciones en la grieta transversal. En el apartado 7 se estudia el crecimiento de la grieta de delaminación. En el apartado 8 se estudia la influencia del tamaño de la probeta. Finalmente en el apartado 9 se presentan las conclusiones y se resume el proceso de fallo por delaminación del laminado bajo estudio.

2. EL PROBLEMA ESTUDIADO

Se ha considerado un laminado $[0_n, 90_m]_s$ bajo tracción como se describe en la Fig. 1a. La sollicitación ha consistido en un desplazamiento impuesto en las caras extremas $u_y=0.01L$, o lo que es equivalente una deformación media $\epsilon_{yy}=0.01$. El modelo de cálculo se muestra en la Fig. 1b. Haciendo uso de la simetría del problema, sólo se ha modelado una cuarta parte. Se ha considerado un modelo plano, en hipótesis de deformación plana generalizada, siendo la deformación normal perpendicular al plano del modelo la obtenida

según la teoría del laminado: $\varepsilon_{zz} = -0.001258$. Nótese que las condiciones de contorno aplicadas se corresponden con un laminado en el que en la lámina a 90° hay grietas transversales separadas $2L=4\text{mm}$.

El material utilizado ha sido un composite de fibra de carbono y matriz epoxi. Las láminas se han considerado homogéneas, de comportamiento ortótropo y características elásticas las dadas en la Tabla 1, donde 1 es la dirección de la fibra.

Tabla 1. Características del material

$E_{11}=45.6\text{GPa}$	$\nu_{12}=0.278$	$G_{12}=5.83\text{GPa}$
$E_{22}=16.2\text{GPa}$	$\nu_{13}=0.278$	$G_{13}=5.83\text{GPa}$
$E_{33}=16.2\text{GPa}$	$\nu_{23}=0.4$	$G_{23}=5.786\text{GPa}$

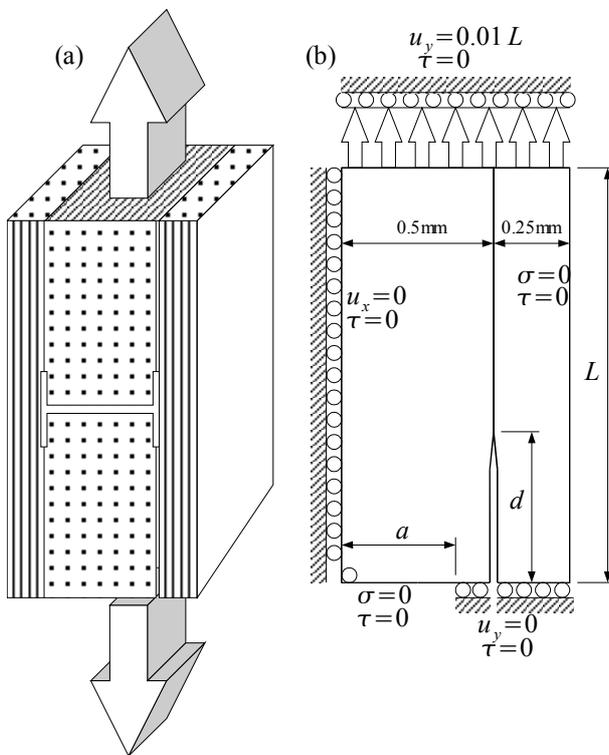


Fig. 1. Configuración del problema: a) laminado bajo estudio, b) modelo de cálculo y dimensiones.

El análisis se ha realizado con el Método de los Elementos de Contorno [5]. En la malla se han empleado elementos lineales continuos clásicos, concentrándolos en la zona de los vértices de las grietas, donde se han utilizado elementos de longitud 10^{-9}mm aproximadamente, mientras que en las zonas más alejadas el tamaño de los elementos ha sido 0.1mm aproximadamente. Para modelar las condiciones de contacto, si se producen, entre las superficies de la grieta se ha empleado una formulación débil de dichas condiciones en la forma descrita por Blázquez et al. [6]. La naturaleza del problema desde el punto de vista del contacto mecánico hace posible aplicar la carga en un

solo incremento, una vez que se detecta el tamaño correcto de la zona de contacto. En este trabajo se ha considerado que el contacto es sin fricción.

3. LA GRIETA TRANSVERSAL EN LA LÁMINA A 90°

En este apartado se va a estudiar la evolución de la energía unitaria liberada, G , de la grieta transversal con su longitud. Se va a considerar el caso en el que la grieta transversal está centrada en la lámina a 90° .

En la Fig. 2 se presentan los valores de la energía unitaria liberada, G_T , de la grieta transversal (normalizada con σ_{yy}^2) frente a la longitud de la grieta, a . La G se ha calculado utilizando la conocida expresión debida a Irwin:

$$G = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta} \int_d^{d+\delta} ([\sigma]_d [\Delta u_n]_{d+\delta} + [\tau]_d [\Delta u_t]_{d+\delta}) ds \quad (1)$$

donde σ y τ representan las componentes normal y tangencial del vector tensión aguas arriba de la grieta y Δu_n y Δu_t las separaciones y deslizamientos relativos entre las superficies de la grieta. En este trabajo se ha utilizado el valor $\delta = 10^{-6}\text{mm}$, y en la expresión (1) se han empleado directamente los valores numéricos obtenidos en la resolución del sistema de ecuaciones.

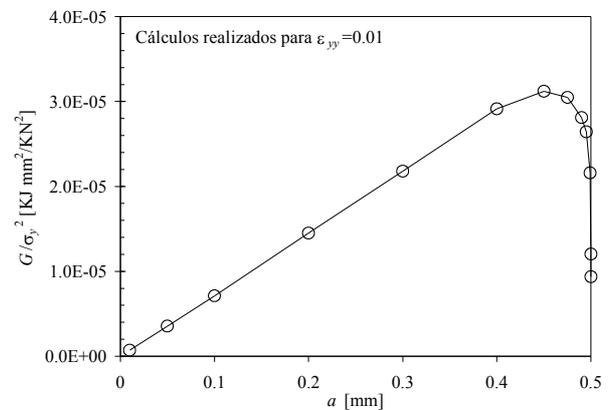


Fig. 2. Evolución de la energía unitaria liberada para la grieta transversal en la lámina orientada a 90° .

Puede observarse que inicialmente existe un periodo de crecimiento inestable hasta un tamaño de grieta de aproximadamente el 95% del espesor de la lámina a 90° . No obstante, el restante 5% es un crecimiento estable, que impide a la grieta alcanzar la interfaz con la lámina a 0° debido a que el valor de la energía unitaria liberada tiende abruptamente a 0 cuando la grieta transversal alcanza la interfaz.

Desde un punto de vista teórico, este resultado es conforme con los obtenidos por Zak y Williams [7] y Lu y Erdogan [8] para materiales isotrópicos. Según estos autores, cuando una grieta progresa en un material y se aproxima a la interfaz con otro material más rígido la

energía unitaria liberada tiende a cero.

Desde un punto de vista experimental, pueden obtenerse fotografías mediante el microscopio en las cuales se aprecia claramente que la grieta transversal se para antes de alcanzar la interfaz. La Fig. 3 es una fotografía de un laminado similar al estudiado en la que este hecho se pone de manifiesto, mostrando la zona con dos aumentos y señalando el vértice de la grieta.

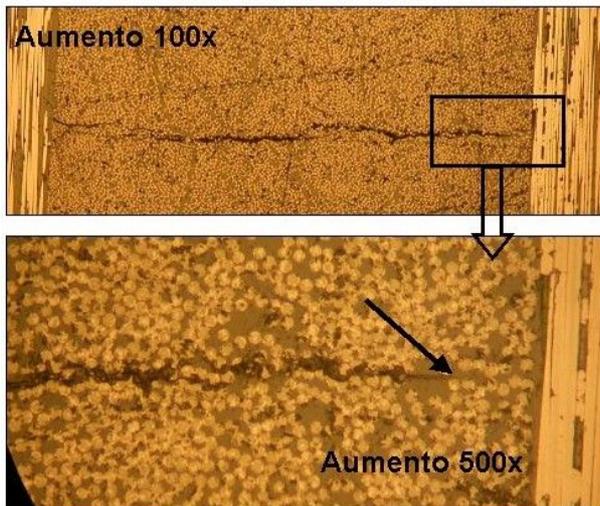


Fig. 3. Fotografía de una grieta transversal en un laminado $[0_n, 90_m]_s$.

4. TENSIONES EN LA INTERFAZ

La conclusión anterior cuestiona la hipótesis, generalmente aceptada, de que la grieta de delaminación en los laminados 0/90 siempre se produce una vez la grieta transversal alcanza la interfaz con la lámina a 0° . Según la Fig. 2 las grietas transversales que progresan en la lámina a 90° tenderán a pararse a una cierta distancia de la interfaz, dependiente del valor crítico de G . En esta situación resulta ilustrativo estudiar la evolución de las tensiones normales a lo largo de la interfaz entre ambas láminas. La Fig. 4 muestra estas distribuciones

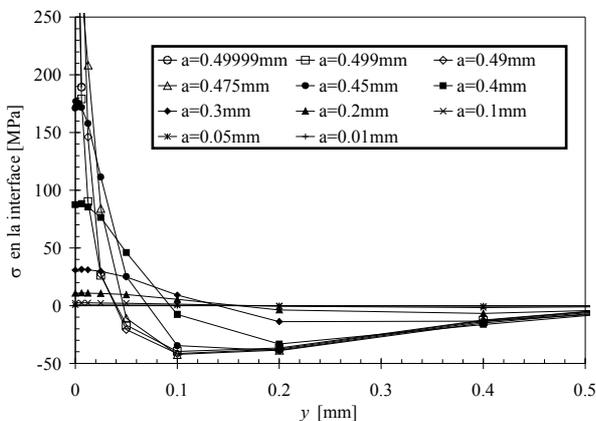


Fig. 4. Distribución de la tensión normal a lo largo de la interfaz para diferentes longitudes de la grieta transversal.

para diferentes tamaños de la grieta transversal, a .

Puede observarse como la distribución de tensiones en la interfaz cambia desde valores nulos cuando el laminado no está dañado (no existe grieta transversal) a valores de tensión muy elevados y concentrados en la zona delante del vértice de la grieta transversal cuando éste está próximo a la interfaz.

La Fig. 5 muestra la evolución de la tensión normal en el punto delante del vértice de la grieta transversal frente a la longitud de la grieta.

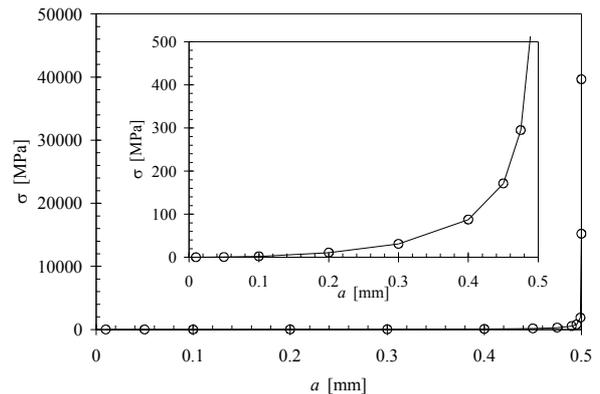


Fig. 5. Evolución de la tensión normal en la interfaz delante del vértice de la grieta.

En esta figura puede apreciarse claramente que cuando la grieta transversal se para, es decir (admitiendo que esto se produce cuando el crecimiento se vuelve estable) para una longitud >0.45 mm en el laminado estudiado, el valor de la tensión normal es mayor que los valores típicos de tensión de rotura de la matriz, cuyas propiedades suponemos que controlan la delaminación.

5. APARECE LA DELAMINACIÓN

Llegado este punto, es razonable admitir que el daño de delaminación aparecerá sin que la grieta transversal haya alcanzado la interfaz entre las láminas. Aunque la aparición de este daño se ha asumido que está controlado por las tensiones normales en la interfaz y sus valores admisibles, también resulta razonable admitir que, una vez que el daño ha aparecido pueda asimilarse a una grieta y que su crecimiento venga controlado por su valor de energía unitaria liberada, G_D .

Para tener una idea, la Fig. 6 muestra la evolución de los valores de G_D con el tamaño de la grieta de delaminación para diferentes longitudes de la grieta transversal, a . Los dos valores extremos de longitud de grieta transversal considerados han sido el correspondiente al punto donde el crecimiento de la grieta transversal se vuelve estable ($a \approx 0.45$ mm) y el correspondiente a la grieta transversal completa ($a = 0.5$ mm).

En todos los casos presentados en la Fig. 6 existe un

periodo inicial de crecimiento inestable. Cuanto más grande es la grieta transversal más pequeño es este intervalo de crecimiento inestable. Este hecho, unido a que los valores de d a los cuales el crecimiento de la delaminación se vuelve estable son muy pequeños, indican que aunque la aparición del daño de delaminación sea previo a que la grieta transversal alcance la interfaz entre las dos láminas, el crecimiento de la grieta de delaminación exige un incremento de la carga aplicada al laminado.

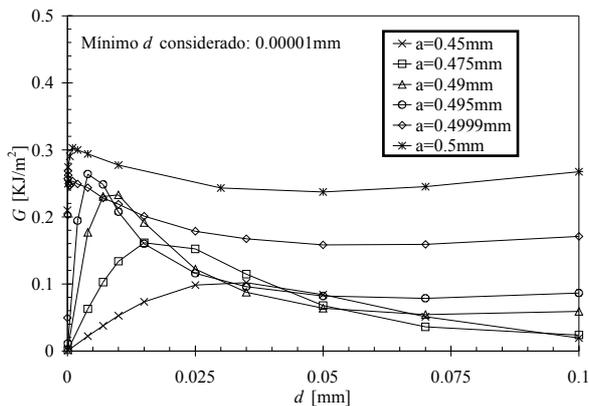


Fig. 6. Evolución de la energía unitaria liberada de la grieta de delaminación frente a su longitud para diferentes tamaños de grieta transversal.

6. INFLUENCIA DE LA DELAMINACIÓN EN EL CRECIMIENTO DE LA GRIETA TRANSVERSAL

Llegado este punto, se plantea la pregunta de cómo afecta la presencia de esta delaminación incipiente al crecimiento de la grieta transversal. Para dilucidar esta cuestión, en la Fig 7 se muestra la evolución de la energía unitaria liberada para la grieta transversal frente a su longitud, en el intervalo desde $a=0.4\text{mm}$ hasta $a=0.5\text{mm}$, para diferentes tamaños de la grieta de delaminación. Se incluye el caso $d=0$, correspondiente al ya estudiado en la Fig. 2, en el que se destacan los resultados para $a=0.49999\text{mm}$ y $a=0.499999\text{mm}$ con el fin de enfatizar el carácter estable final de la grieta transversal.

En principio, la presencia de delaminación modifica radicalmente las condiciones en la interfaz hacia la que se aproxima la grieta transversal, que ahora es una superficie libre de tensiones. Por lo tanto es de esperar un cambio profundo en el comportamiento de la energía unitaria liberada para la grieta transversal, que ahora se vuelve inestable. Esto se aprecia claramente en la Fig. 7, en la que también se nota un ligero incremento de G_T aunque se considera poco significativo. En cualquier caso es importante notar que el cambio en el comportamiento de la grieta transversal se produce cuando el vértice de la misma se sitúa extremadamente cerca de la interfaz, correspondiéndose, de hecho, con distancias en las cuales empieza a ser cuestionable la

aplicación de la hipótesis de medio continuo.

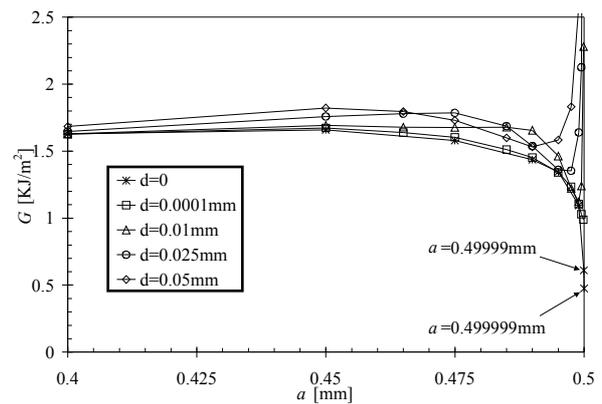


Fig. 7. Evolución de la energía unitaria liberada de la grieta transversal en la lámina a 90° para diferentes tamaños de la grieta de delaminación.

Con todo lo anterior no resulta posible establecer que una vez alcanzado el punto en el que el crecimiento de la grieta transversal se vuelve estable se produzca una delaminación significativa que a su vez desencadene un crecimiento adicional en la grieta transversal. Al contrario, los resultados numéricos hacen pensar que antes de que la grieta transversal sea completa se produce un cierto fallo en la interfaz, pero este fallo no afecta significativamente a las condiciones en la grieta transversal. El aumento del daño (progresión de la grieta transversal y extensión de la delaminación) requiere, en términos generales, un incremento en las cargas, de forma que la formación de la grieta transversal completa (es decir que alcance la interfaz entre las dos láminas) sólo es posible cuando se ha producido una delaminación significativa.

Todo ello debe entenderse asumiendo la hipótesis de medio continuo. La presencia de un modelo heterogéneo puede alterar algunas de las situaciones predichas por el análisis numérico, debido a que empieza a ser relevante la influencia de algunos fenómenos asociados a la presencia de fibras rodeadas de matriz.

7. LA DELAMINACIÓN PROGRESA

Una vez el daño en el laminado ha progresado suficiente, nos encontramos en una situación en la que la grieta transversal se ha completado y existe una grieta de delaminación de tamaño significativo, aunque pequeño. Nos planteamos en este apartado cómo progresa la delaminación. Para ello, en la Fig. 8 se muestra la evolución de la energía unitaria liberada para la grieta de delaminación, G_D , en función de su longitud, d . En todos los casos presentados se ha considerado que la grieta transversal es completa. En la figura se han separado las partes correspondientes a cada modo de fractura.

Puede observarse que, salvo para longitudes de

delaminación muy pequeñas, el crecimiento de la grieta de delaminación viene controlado por el modo II, lo cual es coherente con la orientación relativa en la que se encuentra la grieta respecto de la aplicación de la carga. No obstante resulta muy significativo que en los primeros estados el modo dominante sea el modo I, debido al bajo valor de la tenacidad a fractura en dicho modo, y que justifica el estudio realizado en el apartado 4 de este trabajo sobre las tensiones normales en la interfaz mostradas en la Figs. 5 y 6.

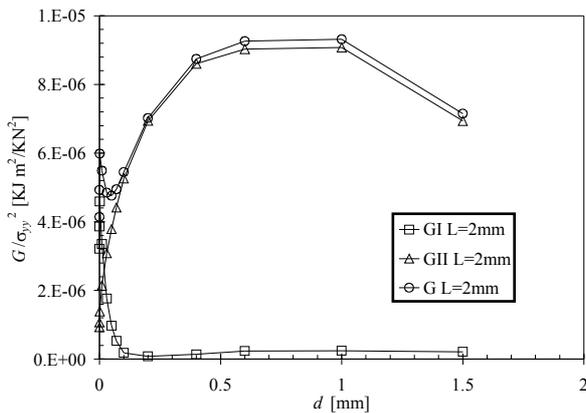


Fig. 8. Evolución de la energía unitaria liberada para la grieta de delaminación.

Del análisis de la Fig. 8 se deduce una primera fase de crecimiento estable de la grieta dominado por el modo I, seguido de un periodo inestable hasta una longitud aproximada del 10% del tamaño de la probeta en la configuración estudiada. Ello sugiere la existencia de grietas de delaminación de una cierta longitud característica. Finalmente aparece una fase de crecimiento estable, coherente con el hecho de que G_D debe tender a cero cuando d tiende a L .

Un análisis más detallado para tamaños de delaminación muy pequeños, pone de manifiesto la existencia de una zona inicial, extremadamente pequeña, de crecimiento inestable. Ello puede entenderse, acudiendo a la Fig. 6, en la que se pone de manifiesto esta zona inicial para diferentes tamaños de la grieta transversal, y como dicha zona va disminuyendo conforme la grieta transversal aumenta.

8. INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LA PROBETA

Como se citó en el apartado 2 de este trabajo, las condiciones de contorno aplicadas se corresponden con un laminado en el que en la lámina a 90° hay grietas transversales separada cada $2L=4\text{mm}$. Ahora pretendemos estudiar la influencia de esta separación en la energía unitaria liberada para la grieta de delaminación, G_D . Para ello se han resuelto problemas con longitudes de la probeta $L=4, 8, 16$ y 32mm . La evolución de G_D (normalizada con σ_{yy}^2) para cada caso

en función de la longitud de la delaminación se muestra en la Fig. 9.

En ella se muestra claramente que la dependencia de G_D con σ_{yy} tiene la forma:

$$G_D = \sigma_{yy}^2 F(d) \quad (2)$$

para d pequeño en comparación de L . Una consecuencia inmediata de (2) es que la energía unitaria liberada es independiente de la longitud de la probeta, o lo que es equivalente, la separación entre grietas transversales. Ello permite establecer comparaciones entre estos resultados y los resultados analíticos para probetas de longitud infinita.

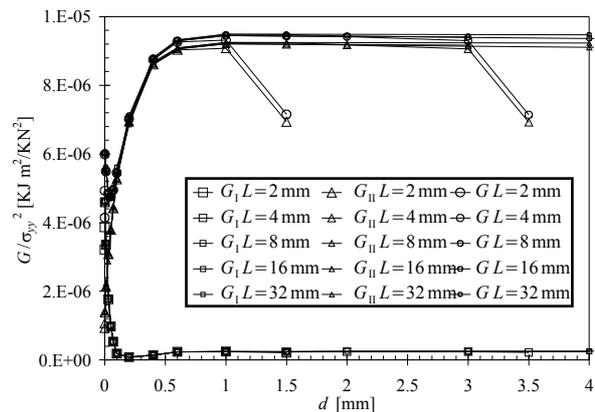


Fig. 9. Evolución de la energía unitaria liberada para la grieta de delaminación para distintas longitudes de la probeta.

O'Brien en [9] presenta un modelo muy sencillo en el cual se predice un valor de G_D independiente del tamaño de la delaminación, y que en la geometría que nos ocupa resulta ser: $G/\sigma_{yy}^2 = 1.09 \times 10^{-5} \text{ KJmm}^2/\text{KN}^2$, mientras que el resultado numérico aquí obtenido ha sido $G/\sigma_{yy}^2 = 0.94 \times 10^{-5} \text{ KJmm}^2/\text{KN}^2$.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis numérico, basado en el Método de los Elementos de Contorno, de la evolución del daño en un laminado 0/90 cuando es sometido a una tracción, desde el laminado sin daño hasta el momento en que aparece la delaminación y esta progresa a lo largo de la interfaz entre las dos láminas.

Se ha observado que la presencia de la interfaz tiende a frenar a la grieta transversal (en el caso analizado aproximadamente a 0.05mm de la interfaz), lo que permite prever la existencia de una longitud característica de las grietas transversales.

La presencia de la grieta transversal y la cercanía del vértice a la interfaz hace aumentar de forma muy importante la tensión normal en la zona de la interfaz situada en frente del vértice, alcanzando valores muy

superiores a la tensión de rotura de la matriz (cuyas características se puede admitir que definen la tenacidad de la interfaz). Se trata de un aumento muy pronunciado y localizado, que justificaría la aparición de daño en la interfaz antes de que la grieta transversal sea completa (es decir alcance la interfaz).

Este daño en la interfaz se ha modelado como una grieta de delaminación. No obstante, se ha comprobado que la presencia de la grieta de delaminación no afecta de forma importante a las condiciones en el vértice de la grieta transversal (salvo en situaciones en las que el vértice se sitúa extremadamente cerca de la interfaz). Llegado este punto para aumentar el daño debemos aumentar la carga, pues tanto la grieta transversal como la grieta de delaminación, presentan un comportamiento estable.

Una vez aplicada la carga suficiente, admitiendo que la grieta transversal alcanza primero la fase de crecimiento inestable, esta progresa hasta la interfaz. En esta situación, la evolución de la G_D presenta una fase inicial de crecimiento inestable hasta longitudes de delaminación de aproximadamente 0.05mm, lo que permite suponer la existencia de un tamaño característico de delaminación. Esta fase va seguida de una fase de crecimiento estable hasta alcanzar un valor de G_D constante.

La evolución de la energía unitaria liberada para la grieta transversal ha resultado ser función exclusiva del tamaño de la delaminación y de la carga aplicada, independiente del tamaño de la probeta, lo que permite comparar estos resultados con modelos analíticos sobre probetas de longitud infinita.

No obstante, todas las conclusiones anteriores se han realizado obviando la tenacidad a fractura de la lámina a 90° y de la interfaz, admitiendo que las grietas progresan o se paran según el carácter estable o inestable de su crecimiento. Es claro que el conocimiento de los valores críticos de las energías unitarias liberadas para las grietas transversal, G_{cT} , y de delaminación, G_{cD} , y su dependencia con la contribución de cada modo de fractura, permitirían establecer con mayor exactitud la evolución del fallo y el valor de la carga necesaria.

10. AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ciencia y Tecnología, MAT2000-115 y MAT2003-03315.

11. REFERENCIAS

- [1] Dvorak, G.J. y Laws, N., "Analysis of progressive cracking in composite laminates II. First ply failure", *J. of Composite Materials*, 21, 309-329 (1987).
- [2] Tan, S.C. y Nuismer, R.J., "A theory for progressive matrix cracking in composite laminates", *J. of Composite Materials*, 23, 1029-1047 (1989).
- [3] París, F., Blázquez, A., Mantič, V. y McCartney, N.L., "Caracterización en grietas de delaminación en laminados 0-90 simétricos", *Actas del IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos'01*, Gijón, España, pp. 241-248, Asociación Española de Materiales Compuestos y Universidad de Oviedo (2001).
- [4] Mantič, V., Blázquez, A., París, F. y McCartney, N.L., "Analysis of delamination cracks in 0/90 symmetric laminates by BEM", *IABEM 2002*, Austin, Texas, USA, en CD, Int. Assoc. for Boundary Element Methods (2002).
- [5] París, F. y Cañas, J. "Boundary Element Method", Oxford University Press, (1997).
- [6] Blázquez, A., París, F. y Mantič, V., "BEM solution of two-dimensional contact problems by weak application of contact conditions with non-conforming discretizations", *Int. J. of Solids and Structures*, 35, 24, 3259-3278 (1998).
- [7] Zak, A.R. y Williams, M.L. "Crack point stress singularities at a bi-material interface", *J. of Applied Mechanics*, 30, 142-143 (1963).
- [8] Lu, M.C. y Erdogan, F., "Stress intensity factors in two bonded elastic layers containing cracks perpendicular to and on the interface- I. Analysis, II. Solution and results", *Engineering Fracture Mechanics*, 18, 491-528 (1983).
- [9] O'Brien, T.K., "Analysis of local delaminations and their influence on composite behavior", en *Delamination and Debonding of Materials*, ASTM STP 876, 282-297 (1985).