

adhesión) puede ser una superficie débil frente a la propagación de la grieta y por consiguiente la grieta se puede quedar atrapada en la misma propagándose en modo mixto de fractura (sin que se desvíe a una lámina adyacente), lo que no ocurre en materiales homogéneos, en los cuales las grietas se propagan típicamente en modo I (predominante) y sólo a veces en modo II. Para caracterizar la resistencia a fractura de una unión encolada se puede por tanto requerir la determinación de la tenacidad a fractura como una función de la mixicidad de los modos de fractura (ratio de las contribuciones de cada modo de fractura). Los autores han realizado en los últimos años varios trabajos teóricos y numéricos dedicados a la nueva relación de las dos medidas de mixicidad de modos de fractura (basadas en el concepto del Factor de Intensificación de Tensiones y en el Índice de Liberación de Energía) de una grieta de interfase entre dos materiales isótropos (Mantic y París, 2004), y a la propagación de grietas de interfase en materiales compuestos, desde un punto de vista macromecánico (Mantic y otros, 2002) y micromecánicos (París y otros, 1996, 2003). Una presentación más extensa de estas cuestiones puede encontrarse en Mantic y otros (en prensa).

Por otro lado, la caracterización experimental de las uniones encoladas y de los tejidos pelables, se realiza actualmente mediante el ensayo de tenacidad a fractura interlaminar (Grc) según AITM 1-0005 e I+D-E-290. Dicho ensayo ha sido ampliamente estudiado en la bibliografía (Hodkinson (2000), Whitney J. y otros (1984)). Algunas modificaciones sobre la configuración original han sido propuestas más recientemente (L. Chen y otros (2001)) para evitar el fallo por compresión en el laminado.

Sin embargo dichos ensayos no fueron ideados para evaluar las uniones encoladas por lo que la representatividad de los mismos puede ser cuestionada. En concreto, la energía a fractura interlaminar liberada (Grc), resultado propio del ensayo, no depende exclusivamente del encolado propiamente dicho ni de la preparación superficial realizada, por lo que un valor de aceptación o rechazo de la unión vendría asociado a otros muchos parámetros.

2. CARACTERIZACIÓN DE Grc MEDIANTE EL ENSAYO DE LA DOBLE VIGA EN VOLADIZO

El ensayo que en la actualidad se utiliza en la industria aeronáutica para evaluar la tenacidad a la fractura interlaminar en uniones composite-composite es el de la doble viga en voladizo. El procedimiento de ensayo está normalizado, ver AITM 1.0005 y/o I+D-E 290 y se representa de forma esquemática en la figura siguiente:

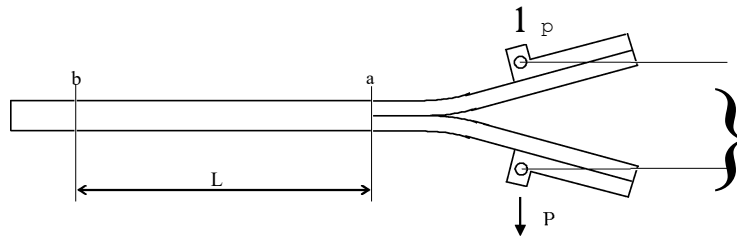


Fig. 1.- Esquema del dispositivo de ensayo.

Para el cálculo de Grc se determina la energía liberada por unidad de superficie durante la propagación de una grieta de interfase entre dos marcas, para lo cual se registra la

curva de carga desplazamiento y se mide el área que queda encerrada entre las dos marcas de ensayo y el origen de la gráfica tal y como se muestra en la siguiente figura:

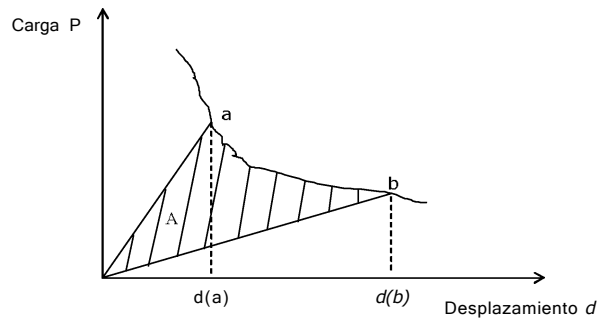


Fig. 2.- Curva carga-desplazamiento y cálculo de la energía unitaria liberada.

El cálculo de G_{Ic} se realiza con la expresión: $G_{Ic} = \frac{A}{W.L} \times 10^3$ donde: G_{Ic} es la Energía liberada en la deformación por unidad de superficie (J/m^2) en la zona de propagación considerada. A es el área de la curva carga-desplazamiento correspondiente para propagar la grieta de una longitud determinada desde a hasta b ($N.mm$), ver Fig.2, W es el ancho de la probeta (mm) y L la distancia entre dos secciones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta, correspondientes a dos de las marcas efectuadas sobre la misma, entre las que se ha propagado la grieta durante el ensayo (mm).

Es evidente que dicha caracterización de la tenacidad a la fractura interlaminar no sólo queda dependiente de las características de la unión, su preparación superficial y las propiedades del adhesivo, sino que se ven claramente influenciadas por cualquier parámetro que afecte a la forma de la curva, entre los cuales tenemos:

- Influencia del útil, rigidez y colocación del mismo.
- Influencia de la rigidez de las láminas (espesor) y colocación en su caso de tabs a lo largo de toda la longitud del tejido para aumentar la rigidez.
- Influencia de la secuencia de apilado.
- Influencia de la zona de medida en el gráfico que se obtiene del ensayo.
- Influencia de la longitud inicial de grieta en la medida.
- Correlación apertura de grieta-longitud de grieta.
- Influencia del ciclo de curado y preparación superficial

G_{Ic} es una propiedad mecánica (un valor admisible) de la unión adhesiva y como tal, su valor debería ser una constante independientemente del método utilizado para su determinación. Puesto que claramente el valor de G_{Ic} en este ensayo es fuertemente dependiente de muchas variables, parece razonable analizar el papel que juegan dichas variables en el ensayo. Dicho análisis se ha llevado a cabo mediante la simulación numérica del ensayo y un posterior estudio paramétrico del mismo.

3. ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL ENSAYO DE G_{Ic}

Dado que experimentalmente se observa una clara influencia en la evaluación de G_{Ic} de determinados aspectos geométrico o de utillaje, sería de gran interés cuantificar dicha

influencia en un estudio paramétrico.

Dado que un estudio experimental de estas características sería muy costoso, se ha desarrollado un modelo numérico simple (con Elementos Finitos) del ensayo que se desarrolla en este apartado y que se muestra en la Fig.3. El modelo numérico que se ha desarrollado para el análisis paramétrico del ensayo de la doble viga en voladizo servirá de herramienta base para la nueva propuesta de ensayo.

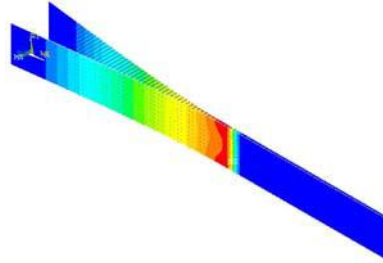


Fig. 3.- Modelo numérico del ensayo.

Un primer intento de modelización consistió en el empleo de elementos tipo muelle para modelar el comportamiento del adhesivo. Estos elementos tenían la capacidad de ser “eliminados” tras alcanzar una elongación determinada, para simular el carácter cohesivo de la capa de adhesivo. Este primer modelo presentaba problemas ya que se originaban interpenetraciones de las láminas de material compuesto por detrás del frente de grieta, razón por la cual se recurrió a un modelo de contacto. Se ha utilizado el programa ANSYS con elementos shell181 para los laminados, el par contact173–target170 para el contacto de superficies planas y el elemento combin37 para los muelles con capacidad de desactivación alcanzada una elongación determinada. Resueltos los problemas de modelización, algunos de los resultados se muestran a continuación.

Un primer análisis efectuado para evaluar la influencia de la rigidez de la capa de adhesivo y ajustar el modelo para que represente el comportamiento experimental del ensayo, se muestra en la Fig. 4. Se representa la solución numérica del ensayo para distintos valores de la rigidez K del adhesivo. No se aprecia un cambio significativo en la pendiente del primer tramo elástico, por lo que la rigidez del adhesivo no juega un papel significativo en este tramo, sin embargo y puesto que la eliminación del elemento tipo muelle está fijada por un nivel de desplazamiento crítico, sí se aprecia cómo a medida que la rigidez del adhesivo disminuye, la eliminación del elemento adhesivo (y consecuentemente el avance del frente de la grieta) se produce a cargas menores.

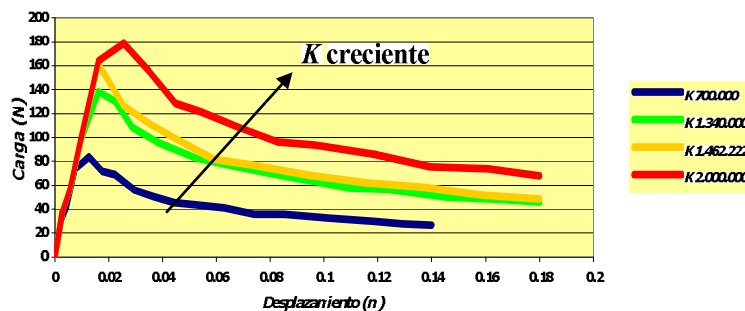


Fig. 4.- Influencia de la rigidez del adhesivo.

Un segundo análisis se realizó variando el valor de la elongación crítica de los muelles para su desaparición (y el correspondiente avance de la grieta). En la Fig. 5 se muestran

los resultados de la simulación. A medida que aumenta el valor de R (alargamiento crítico) hace falta mayor carga, el modelo responde bien a esta evidencia. Con este análisis se podría ajustar el valor de este parámetro para que el modelo responda fielmente a la realidad.

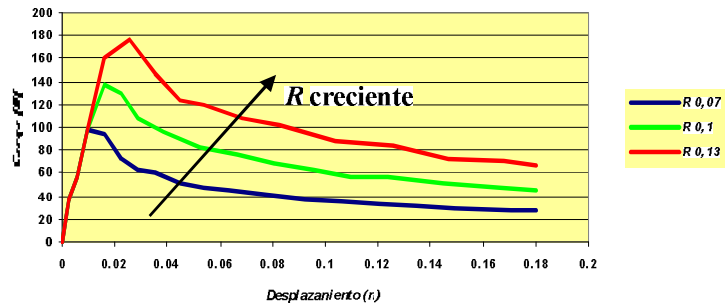


Fig. 5.- Influencia del valor de alargamiento crítico.

En la Fig. 6 se muestra la influencia en la simulación del espesor de las láminas de material compuesto que se utilizan en el ensayo (o de la rigidez de las mismas). Se muestra claramente el efecto de este cambio.

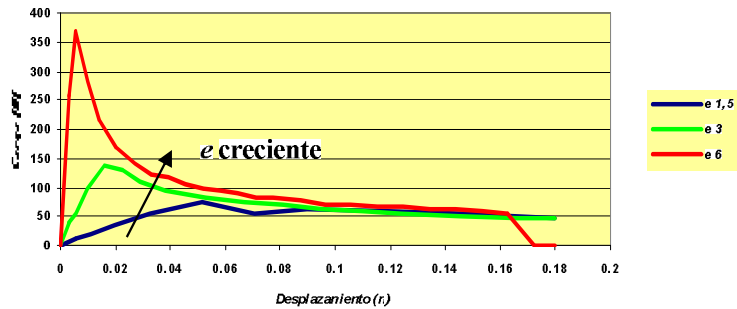


Fig. 6.- Influencia de la rigidez de los adherentes.

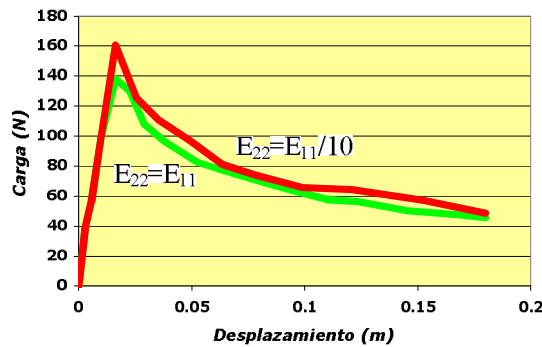


Fig. 7.- Influencia de la ortotropía de los adherentes.

En la Fig. 7 se analiza el papel del grado de ortotropía de los adherentes, se han

analizado dos configuraciones: una con un laminado con igual rigidez en las dos direcciones del plano del laminado $E_{22} = E_{11}$ y otra configuración que representa un laminado con mayor presencia de fibras en la dirección longitudinal (dirección 1) de forma que la rigidez en la dirección 1 es 10 veces superior a la rigidez en la dirección 2, $E_{22} = E_{11}/10$. En la Fig. 7 se aprecia una influencia leve de este efecto de ortotropía de los laminados, siendo en todo caso el avance de grieta algo mayor en la simulación con un grado de ortotropía más elevado.

Con este estudio paramétrico se pone de manifiesto que la rigidez de los adherentes y el valor del alargamiento crítico son los parámetros que más influencia tienen en el ensayo. La evaluación experimental de estos valores serviría para poner a punto la herramienta de simulación numérica.

4.- UNA NUEVA PROPUESTA DE ENSAYO

Una primera alternativa que minimiza la dependencia de factores geométricos como el que presenta el ensayo de la doble viga en voladizo, es la utilización de dispositivos de ensayo que hagan progresar la grieta bajo una carga constante.

Precisamente en el ámbito de la caracterización de uniones adhesivas existen ensayos de pelado a carga constante como el pelado de campana (ASTM D 3167), el pelado en T (ASTM D 1876) o el pelado tambor (ASTM D 1781), que sin embargo no son de aplicación a la determinación de G_{Ic} dado que, en todos los casos, la curvatura a la que se vería sometido el laminado de material compuesto provocaría antes la rotura por flexión que por propagación de la grieta de interfase.

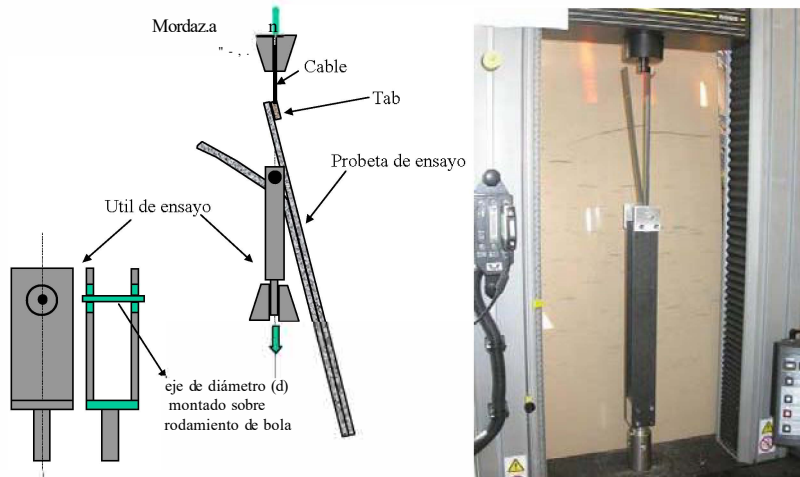


Fig. 8.- Esquema y montaje de la nueva propuesta de ensayo.

El pelado de campana está dirigido a encolados metal-metal mientras que si bien se puede utilizar el pelado de tambor para composites, éste se utiliza con exclusividad en estructura tipo *sandwich* con un laminado "piel" de pocas capas.

Una primera alternativa sencilla a los ensayos propuestos anteriormente es la que se muestra en la Fig. 8. La grieta de interfase se hace crecer introduciendo un rodillo entre ambos adherentes.

La tracción de la probeta hace que el rodillo avance entre los adherentes de forma que la distancia del frente de grieta al rodillo permanece aproximadamente constante y la fuerza que recoge la célula de carga es también aproximadamente constante tal y como se aprecia en la Fig. 9, obtenida de un ensayo real. En cualquier caso y tal y como se hace en los ensayos de pelado, tras el ensayo se procedería al cálculo de un valor medio de la carga de pelado a lo largo de una distancia fijada y a correlacionar dicho valor de la carga de pelado con el valor de G_{Ic} que se pretende calcular.

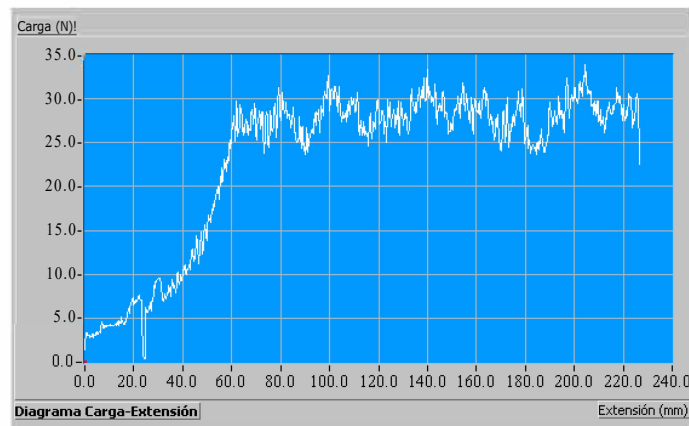


Fig. 9.- Grafica carga-desplazamiento con el nuevo dispositivo de ensayo.

Si bien queda por determinar la influencia de parámetros como: el diámetro del rodillo, velocidad de avance, influencia del rozamiento del rodillo, número y disposición del rodillo para minimizar los efectos del rozamiento, etc. Si se ha puesto de manifiesto, al menos, que existen configuraciones de ensayo donde la carga que provoca la propagación de la grieta de interfase se puede mantener razonablemente constante.

5.- CONCLUSIONES

En el presente estudio se hace una revisión crítica de las técnicas de ensayo actuales para la determinación de la tenacidad a la fractura interlaminar G_{Ic} tras poner de manifiesto que la determinación del valor de G_{Ic} se realiza mediante un ensayo donde la carga que hace crecer la grieta de interfase, no permanece constante y el resultado está significativamente influenciado por parámetros como: la rigidez de los adherentes, distancias entre las que se calcula la propagación y otras variables de ensayo. Se ha realizado un modelo numérico del ensayo para entender el papel que cada parámetro juega en el desarrollo del ensayo y se han ajustado los distintos parámetros de forma que la simulación numérica represente fielmente el comportamiento del ensayo real.

Finalmente se plantea una nueva configuración de ensayo donde al menos la progresión de la grieta de interfase se realiza a una carga media constante, siendo el resultado de

este ensayo una carga media de pelado. El trabajo inmediato a realizar con la nueva configuración propuesta es correlacionar esta carga media de pelado con la tenacidad a la fractura interlaminar, estudiar con el modelo numérico, puesto a punto con el ensayo tradicional, la influencia de los parámetros geométricos que intervienen en esta nueva configuración.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de intercambios ERASMUS por la estancia de G Peigné en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.

REFERENCIAS

- CHEN, L., IFJU, P.G. & SANKAR, B.V., (2001) A novel double cantilever beam test for stitched composite laminates, *J. Composite. Materials*, 35, No 13. pp: 1137-1149.
- CHEN, L., IFJU, P.G., SANKAR, B.V. (2001), A novel double cantilever beam test for stitched composite laminates, *Journal of Composites Materials*, 35, 1137-1149.
- GERBERICH, W., YANG, W. (Eds), (2003), Interfacial and Nanoscale Failure (Vol.8), In: *Comprehensive Structural Integrity*, I. Milne, R.O. Ritchie, B. Karthalo (Editros-in-Chief), Elsevier Pergamon.
- HODGKINSON, J.M., (2000) Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. Ed. Woodhead Publishing Limited.
- HUTCHINSON; J.W. & SUO, Z. (1992) Mixed-mode cracking in layered materials *Advances in Applied Mechanics* 29, pp:63-191.
- MALYSHEV, B.M. & SALGANIK, R.L., (1965) The strength of adhesive joints using the theory of cracks. *Int. J Fracture* 26, pp:261-275.
- MANTIC, V., BLÁZQUEZ, A., CORREA, E., PARÍS, F., Analysis of interface cracks with contact by 2D BEM (Chapter), In: *Fracture and Damage of Composites*, M Guagliano and M.H. Aliabadi (Eds.), WIT Press, (en prensa).
- MANTIC, V., BLÁZQUEZ, A., PARÍS, F., MCCARTNEY, N.L., (2002) Analysis of delamination in 0/90 symmetric laminates by BEM, *IABEM 2002, Proceedings of International Association for Boundary Elements (CD)*, The University of Texas, Austin.
- MANTIC, V., PARÍS, F., (2004) Relation between SIF and ERR based measures of fracture mode mixity in interface cracks, *Int. Journal of Fracture*, 130, pp:557-569.
- MANTIC, V., PARÍS, F., CORREA, E., (2004), On fracture mode mixity measures in interface cracks. An application to BEM analysis of fibre/matrix debonding in composites, *Proceedings of the 2004 Int. Conf on Computational & Experimental Engineering & Sciences*, Madeira, A. Tadeu, S.N. Atluri (Eds.), JCCES'04(CD).
- W. GERBERICH AND W. YANG eds. (2003), Interfacial and Nanoscale Failure, Vol. 8 of *Comprehensive Structural Integrity*, Elsevier Science.
- WHITNEY J., DANIEL, I.M, BYRON PIPES, R., (1984) *Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials*. 1984