

“INFLUENCIA DE DIFERENTES FACTORES SOBRE EL VALOR DE LA ENERGIA DISIPADA EN ROTURAS INTERLAMINARES DE MATERIALES COMPUESTOS CARBONO/EPOXI”.

J. M. Pintado S.

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, E. T.
División de Materiales y Estructuras.
Cra. Ajalvir P.K. 4'5, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid

Resumen. Durante los últimos años ha ido creciendo de forma considerable la importancia atribuida a las delaminaciones como uno de los procesos dominantes de fallo comúnmente hallados en laminados de material compuesto. Esta breve comunicación presenta algunos resultados experimentales correspondientes al valor de “G” (energía disipada por unidad de superficie de fractura generada) medido en fracturas interlaminares de materiales compuestos carbono/epoxi actualmente empleados en estructuras primarias aeroespaciales. Se pretenden evaluar de forma empírica las posibles diferencias de comportamiento durante la fractura debidas, tanto a la propia estructura del material (secuencia de apilamiento, propiedades de fibras y matriz, etc.), como a la influencia de variables extrínsecas, tales como agua absorbida por el material, velocidad y forma de aplicación de carga (modo-I, modo-II y modo-I+II), temperatura de ensayo, morfología de la delaminación iniciadora, etc..

Abstract. During last years, the attributable importance to delaminations as one of the dominant failure processes that can be usually found in composite material laminates, has growth in a considerable way. This brief communication presents some experimental results corresponding to “G” value (fracture surface energy release rate) as measured during interlaminar fracture of carbon/epoxy composite materials that are used in actual aerospace primary structures. Possible fracture behaviour differences arising from the whole material structure (stacking sequence, fiber and matrix properties, etc.) and/or influence of extrinsic variables like material absorbed water, speed and way of load application (mode-I, mode-II and mode-I+II), test temperature, shape of starting notch, etc., are empirically evaluated.

1. INTRODUCCION

La problemática planteada por el crecimiento de grietas interlaminares o delaminaciones es tema fundamental en la evaluación de laminados de material compuesto de cara a la estimación de duración y tolerancia al daño de estas estructuras. La experiencia de los constructores de aeronaves ha llevado a la conclusión de que, cuando se realiza un ensayo para explorar los mecanismos de fallo en estructuras de material compuesto, la delaminación resulta ser el tipo de crecimiento de daño más importante en la limitación de la vida operativa de componentes estructurales realizados con estos nuevos materiales.

Una baja tenacidad a fractura interlaminar es causa fundamental de problemas de suma importancia, tales como una mala resistencia a compresión en el plano, delaminaciones internas y de borde o baja resistencia al impacto, problemas todos ellos que limitan en muchos casos las posibilidades de un empleo más generalizado de estos materiales.

Al plantearse su utilización, el aspecto de cómo se manifiesta el fenómeno de fractura, es decir, de cómo se comporta el material compuesto (punto de vista del utilizador, típico de la ingeniería de diseño y cálculo estructural), debe resolverse, al igual que con cualquier otro

material estructural, mediante la cuantificación de diferentes aspectos de su comportamiento mecánico bajo ciertas condiciones de ensayo, tratándose, en principio, de un conocimiento empírico basado en los resultados obtenidos mediante el proceso de caracterización de un material concreto y perfectamente definido.

En el caso concreto que se trata en esta comunicación, la fractura interlaminar suele caracterizarse mediante la determinación del valor de la variación de energía necesaria para generar una unidad de superficie de fractura. El concepto de energía liberada por unidad de superficie de fractura generada, G, utilizado con éxito para caracterizar la “resistencia a fractura” de materiales isótropos, se utiliza asimismo en el caso de la fractura de los materiales compuestos fibrosos, a pesar de la gran diferencia en el comportamiento micromecánico en fractura de ambos tipos de material.

En principio y en términos generales, la aplicación de la mecánica lineal elástica de fractura al crecimiento genérico de grietas en materiales compuestos presenta serias dificultades, debido no sólo al elevado grado de anisotropía que complica el análisis de esfuerzos, sino al problema fundamental de que, por una parte, la grieta no suele propagarse de forma auto-consistente y, por otra, la zona

de daño en punta de grieta a menudo se extiende sobre un gran volumen del material, invalidando, por consiguiente, la aplicabilidad del método.

Sin embargo, la delaminación o crecimiento interlaminar de grieta (al menos desde un punto de vista macroscópico) es uno de los pocos casos en que la mecánica de fractura puede aplicarse al estudio macroscópico del fallo en determinados laminados de material compuesto, pues se suele producir un crecimiento de grieta bastante autoconsistente. Cualquier micromecanismo que absorba energía incrementará la "resistencia a fractura" del material y una zona de daño mayor producida en punta de grieta dará como resultado mayor tenacidad y tolerancia al daño.

La iniciación y crecimiento de una grieta interlaminar puede producirse bajo tracción (modo-I), cortadura (modo-II), desgarró (modo-III) y/o una combinación de varios o todos ellos, produciendo una progresiva degradación de la rigidez de la estructura y pudiendo eventualmente conducir al fallo total. Debe tenerse presente que el constituyente "débil" del material compuesto es la matriz y ésta precisamente debe soportar los esfuerzos interlaminares.

2. MATERIALES Y PROBETAS.

Con el fin de evaluar la influencia de algunas variables intrínsecas del material sobre su "resistencia a la fractura" interlaminar, se han escogido cuatro diferentes preimpregnados carbono/epoxi (en concreto: AS4/3501-6, UHM/3501-6, AS4/8552 e IM7/8552) de amplia utilización en estructuras aeroespaciales, pero que presentan diferencias importantes en las características mecánicas fundamentales de sus constituyentes. Las propiedades básicas de las fibras y matrices utilizadas se presentan en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Todos los preimpregnados en forma de cinta unidireccional se laminaron en un área limpia con secuencias [0]₂₀; [0]₂₄; [90/(0)₈/90]₈; [90/(0)₈/90/0/90/(0)₆/90/0] y [±45/(0)₆/-45/45]₆ y, tras realizar la correspondiente bolsa de vacío (sin sangrado), se curaron en un autoclave mediante un ciclo con un curado isoterma de 70 minutos a 120°C y 6 bares de presión absoluta seguido de otra meseta isoterma de 120 minutos a 180°C y 7 bares de presión absoluta, para construir paneles de 380 x 305 mm y unos 3 mm de espesor. Los contenidos volumétricos en fibra determinados experimentalmente, estuvieron comprendidos entre el 55% y el 60% en todos los casos y los contenidos volumétricos en microvacíos fueron siempre menores del 1%.

FIBRA	AS4	UHM	IM7
Densidad (g/cm ³)	1'78	1'88	1'78
Diámetro (μ)	7	4'5	5
Sección (forma)	Circular	Circular	Circular
Resist. Tracc. (MPa)	4000	3795	5382
Módulo Tracc. (GPa)	235	449	276
Deform. última (%)	1'6	0'8	1'8

Tabla 1. Algunas propiedades de las fibras utilizadas.

MATRIZ	3501-6	8552
Densidad (g/cm ³)	1'27	1'30
G _{lc} (J/m ²)	130	680
Resist. Tracc. (MPa)	68'95	120'7
Módulo Tracc. (GPa)	4'433	4'668
Deform. última (%)	1'7	4

Tabla 2. Propiedades de matrices 3501-6 y 8552. (Datos del fabricante).

Los paneles curados, de los que se cortaron mediante disco diamantado las probetas correspondientes a los ensayos de crecimiento de grieta interlaminar, se prepararon incluyendo en su plano medio una delaminación iniciadora, en forma de una lámina de tejido desmoldeante de espesor de 75 μm.

Las probetas de forma rectangular y dimensiones 150 mm x 25 mm se cortaron de cada panel de forma que el eje principal de éste coincidiera con el longitudinal de aquéllas, por lo que las secuencias de apilamiento de las probetas son las que ya se indicaron para los laminados. Todas tienen en su plano medio una delaminación artificial iniciadora con una longitud de 50 mm en el caso de las probetas de tipo "Flexión con Entalla Final" (FEF) (figura 1) y de 60 mm en el de las de tipo "Viga Doble en Voladizo" (VDV) (figura 2) y "Flexión en Modo Mixto" (FMM) (figura 3). Estas últimas presentan, además, un corte en el extremo delaminado y para la semiprobeta inferior de 41 mm medidos desde el citado extremo.

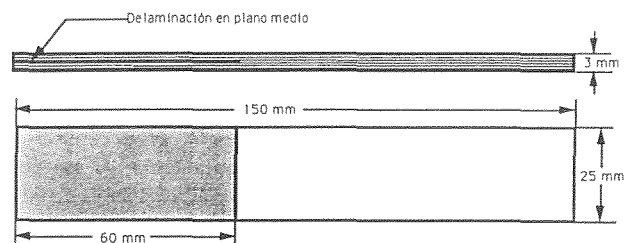


Figura 1. Dimensiones de la probeta tipo "Viga Doble en Voladizo" (VDV).

3. METODOS DE ENSAYO Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

Las curvas de respuesta carga-desplazamiento de cada probeta se obtuvieron mediante un registro X-Y, empleando para llevar a cabo los ensayos una máquina universal de tipo hidráulico MTS 810, controlada en modo de desplazamiento con velocidad constante de 0'042 mm/s en todos los casos, excepto en aquellos en que se pretendía evaluar la posible influencia de la velocidad de aplicación de carga, para los que se fijaron velocidades constantes de 1'000 mm/s y 10'00 mm/s. Como medida del desplazamiento se utilizó el del puente de la máquina, previa calibración de la flexibilidad del conjunto máquina de ensayos-utilaje. Una vez medidas las probetas, se marcan en su canto para situarlas en el utilaje de ensayo de forma adecuada y poder realizar la calibración en flexibilidad (C = f(a)) de una probeta de cada muestra.

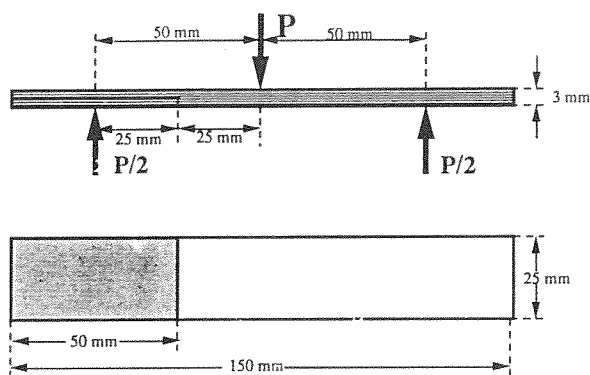


Figura 2. Dimensiones y condición de carga de la probeta para ensayo de "Flexión con Entalla Final" (FEF).

La mayor parte de los ensayos se realizaron a temperatura ambiente sobre probetas "secas" (0% en peso de contenido en agua), aunque el material AS4/3501-6 se ensayó asimismo a temperaturas de -60°C , 160°C y 200°C y, en algunos casos, con probetas "húmedas" (1'6% en peso de contenido en agua), habiéndose previamente secado en estufa a 70°C las probetas "secas" y acondicionado en cámara climática a 70°C y 95% de humedad relativa las "húmedas". Se ensayaron al menos 6 probetas para cada conjunto de condiciones experimentales.

En el ensayo con probeta de tipo "Viga Doble en Voladizo" (VDV), la carga de tracción se introduce perpendicularmente al plano del laminado mediante dos piezas de acero que se fijan a cada semiprobeta en el extremo delaminado y se unen a la máquina de ensayos con sendas articulaciones. Para los ensayos de las probetas de tipo "FEF" y "FMM", se utilizó un utilaje de flexión en tres puntos diseñado y construido al efecto, colocando las probetas cuidadosamente sobre dicho útil de forma que la carga se introduce tal como se indica en las figuras 2 y 3, consiguiendo esfuerzos de cortadura pura en el plano de la delaminación en el primer caso y una combinación de cortadura y tracción en el segundo, con una contribución teórica del 43% correspondiente a cortadura.

En el caso de las probetas de tipo FEF y FMM y salvo para aquéllas utilizadas precisamente a fin de estudiar la influencia sobre el valor experimental de "G" del fondo de la delaminación iniciadora, ésta se prolongó bajo modo-I

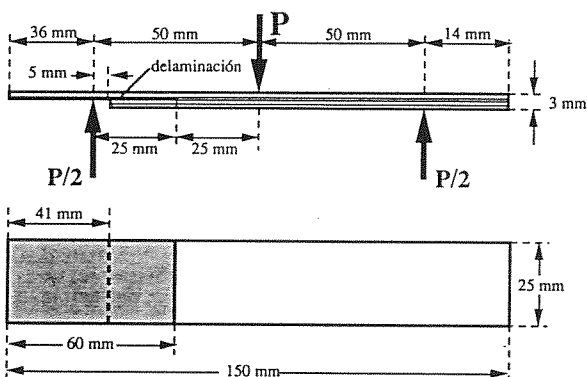


Figura 3. Dimensiones y condición de carga de la probeta para ensayo de "Flexión Modo Mixto" (FMM).

una pequeña distancia con el fin de lograr un fondo de grieta iniciadora "natural".

En relación con los procedimientos experimentales empleados, hay que considerar que las curvas de calibración de flexibilidad para modo-I se obtienen con probetas en las que está garantizada la ausencia total de efectos de puenteo en la delaminación iniciadora, ya que se determinan sin haber prolongado ésta y antes de hacer crecer la grieta interlaminar. Para el caso de los ensayos bajo modo combinado, la calibración de flexibilidad también se realiza antes de haber hecho crecer la delaminación, pero habiendo prolongado previamente bajo modo-I la delaminación iniciadora, lo que en algunos casos y debido a efectos de macropunteo por bandas de fibras entre las caras de la delaminación, da lugar a una curva de calibración en la que las flexibilidades medidas son menores de las que realmente se obtendrían de no existir el efecto de "macropunteo". Finalmente y para los ensayos bajo modo-II, la validez de la curva de calibración de la flexibilidad (obtenida después del crecimiento de la delaminación) es muy dudosa en las probetas del tipo 45/45, razonablemente buena en las probetas del grupo 0/0 y discutible para el resto de probetas (90/90 y 90/0).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

La reducción de los datos experimentales para la obtención de los valores de "G" se realizó a partir de los registros carga-desplazamiento ($P-\delta$) obtenidos en cada ensayo, midiendo sobre ellos la carga correspondiente al comienzo de crecimiento de la grieta interlaminar, P_c , la flexibilidad, C , y la energía disipada durante el crecimiento de la delaminación (área bajo la curva $P-\delta$), en combinación con las correspondientes medidas de longitudes de grieta inicial y final y superficie delaminada sobre cada probeta ensayada.

Con estos datos se calculó el valor medio de "G" correspondiente a cada muestra, utilizando la teoría lineal elástica de vigas en flexión, el método de la calibración de la flexibilidad de las probetas y el método directo de las áreas, habiéndose resumido los resultados más representativos en las figuras 4 a 11 que pretenden mostrar alguna de las tendencias cualitativas observadas en los ensayos.

Los valores de G calculados en este trabajo mediante teoría de vigas en flexión y calibración de la flexibilidad son valores de "inicio", es decir, correspondientes al momento de comenzar el crecimiento de la grieta interlaminar a partir de la grieta o delaminación "iniciadora". Son válidos en tanto en cuanto se cumplan las hipótesis que permitan utilizar teoría lineal elástica de vigas en flexión, la grieta sea realmente interlaminar y se trate de una sola grieta que comience a crecer de forma autoconsistente y sin efectos de "puenteo". Dependen de cómo sea el fondo de la delaminación iniciadora, de si las caras de la delaminación iniciadora se encuentran "puenteadas" por "bandas" o haces de fibras y en qué cantidad y, muy posiblemente, de la uniformidad, rectitud y perpendicularidad respecto al eje de la probeta del fondo de la grieta iniciadora.

Los valores de G calculados por el método directo de las

áreas, representan un valor medio de energía disipada por unidad de superficie de fractura generada durante toda la propagación de la grieta, desde la longitud inicial hasta la final. Por consiguiente y en principio, cabe esperar que estos valores sean, en términos generales y si se presentan efectos de "puenteo", superiores a los de inicio y, de hecho, cuando se comparan valores realmente correspondientes a grietas interlaminares, tanto en inicio como en crecimiento y cuando realmente sólo se observan efectos de "puenteo" al crecer la grieta, los valores obtenidos por el método de las áreas son superiores a los correspondientes a teoría de vigas en flexión y curva de calibración.

Cuando las hipótesis de partida utilizadas para deducir los métodos teóricos de reducción de datos se cumplen y la delaminación crece de forma autoconsistente y sin efectos de "puenteo", los valores proporcionados por la teoría de vigas en flexión, calibración de la flexibilidad y método directo de las áreas son similares, lo que suele suceder en interláminas 0/0 (figura 4).

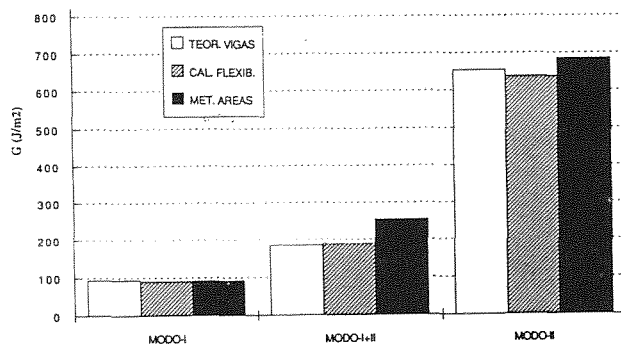


Figura 4. Valores de G para material AS4/3501-6 "seco" e interlámina 0/0 obtenidos a 23°C y 1'000 mm/s.

La razón de que el valor de G_{I+II} sea mayor para el método de las áreas que los de teoría de vigas y flexibilidad (figura 4), puede explicarse por el hecho de que en las probetas de tipo FMM (modo-I+II), al crecer la grieta interlaminar se produce un crecimiento intralaminar de grieta, paralelo al plano medio de la probeta y por la lámina orientada a 0°, apareciendo considerable "macropuenteo" paralelo mediante grupos de fibras orientadas a 0° que van contribuyendo a tener que aumentar la energía elástica necesaria para seguir haciendo crecer la delaminación, con lo que el valor medio de G (método de las áreas) aumenta al ir creciendo la delaminación.

Los resultados muestran (figuras 4, 5 y 10) que el valor de G obtenido experimentalmente para el conjunto de ensayos realizado sobre material AS4/3501-6, es siempre considerablemente mayor para modo-II "puro" de crecimiento de grieta interlaminar que para modo-I "puro"; en el caso de modo-I+II o combinado, se obtiene generalmente un valor intermedio entre los dos anteriores, bastante más cercano al correspondiente a modo-I que a modo-II (figuras 4, 5, 10 y 11).

En general (figuras 5, 9 y 11), los valores experimentales de G (calculados por el método de las áreas) para interlámina 45/45 han sido, en todos los casos considerados, bastante mayores que los correspondientes a interlámina 0/0. Esto es consistente con el hecho de que la superficie

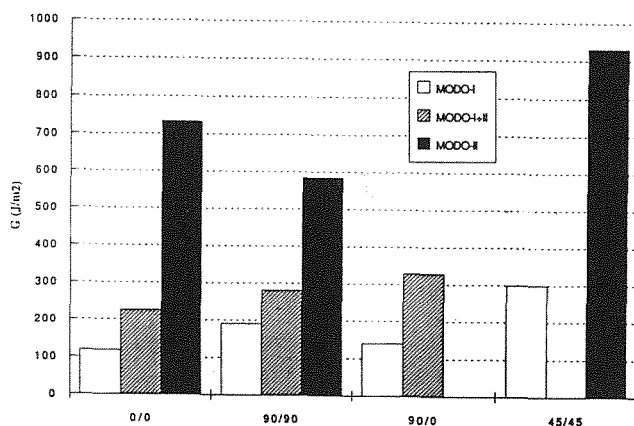


Figura 5. Valores de G para material AS4/3501-6 "seco" obtenidos a 23°C y 0'042 mm/s (método de las áreas).

real de fractura generada incluye delaminaciones superpuestas sobre varios planos a la vez y considerables efectos de "macropuenteo" por bandas de fibras a 45°, factores ambos que conducen a incrementar artificialmente el valor de G deducido por el método de las áreas.

A la vista de los resultados mostrados en la figura 6, la velocidad de aplicación de la carga, entre 0'042 mm/s y unos 10'00 mm/s, no parece influir sobre los valores de G_{II} obtenidos mediante probetas de tipo FEF y correspondientes a material AS4/3501-6 con secuencia $[0]_n$, tanto seco como húmedo (figura 11) y ensayado a temperatura ambiente. La aparente tendencia de G_{II} a disminuir en algunos casos al aumentar la velocidad de aplicación de carga parece ser artificial, consecuencia de la inercia del registro X-Y utilizado para la adquisición de datos. En efecto, en la figura 6 se puede apreciar la diferencia en el valor de G según la teoría de vigas para una velocidad de 10 mm/s cuando se realiza el cálculo a partir del valor de carga máximo de la curva carga-desplazamiento suministrada por el registro X-Y y cuando se utiliza el valor proporcionado por el sistema electrónico de captura del máximo del equipo de ensayo (valor indicado con un asterisco).

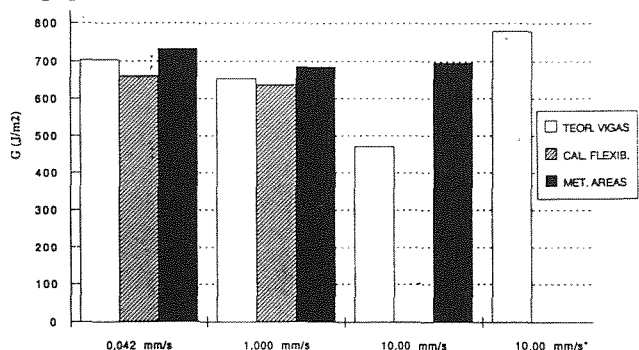


Figura 6. Valores de G_{II} para material AS4/3501-6 "seco" e interlámina 0/0 obtenidos a 23°C.

La figura 7 parece confirmar el hecho intuitivo de que una matriz más tenaz (8552) conduce a mayores valores de G, pero esta afirmación debe hacerse con suma cautela. En efecto, en dicha figura resulta notable la disminución que sufre el valor de G_{II} por el hecho de haber reforzado la misma matriz 3501-6 con fibras de carbono de alto módulo (UHM) en vez de con fibras de alta resistencia (AS4). Este

resultado parece poner de manifiesto que no es únicamente la matriz el constituyente responsable de la tenacidad a fractura interlaminar de un laminado de material compuesto, sino que la interacción de la matriz con las fibras es, asimismo, factor esencial a considerar.

Por otro lado, los resultados que se muestran en la figura 8 para la matriz 3501-6 indican que el fondo de la delaminación iniciadora para los ensayos de crecimiento de grieta interlaminar con probeta de flexión con entalla final (FEF), tiene una gran influencia sobre los resultados obtenidos, al menos para los materiales y condiciones de ensayo considerados en la investigación realizada y de modo que, si no se consigue un fondo "natural" de grieta iniciadora, los valores de G obtenidos de la reducción de los datos experimentales resultan artificialmente elevados, pudiendo llegar a ser del orden de 2 a 3 veces los correspondientes a fondos de grieta "naturales".

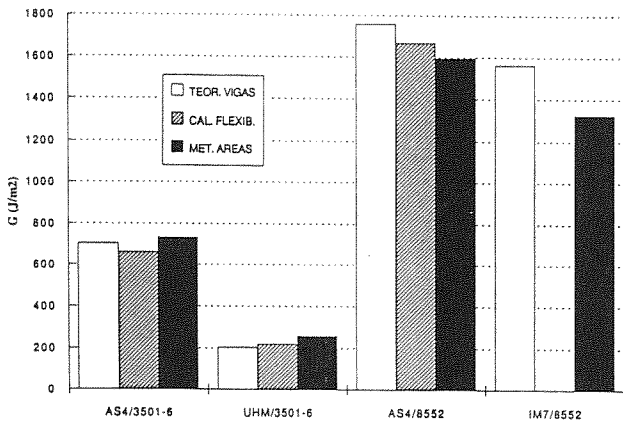


Figura 7. Valores de G_{II} para material "seco" e interlámina 0/0 obtenidos a 23°C y 0'042 mm/s.

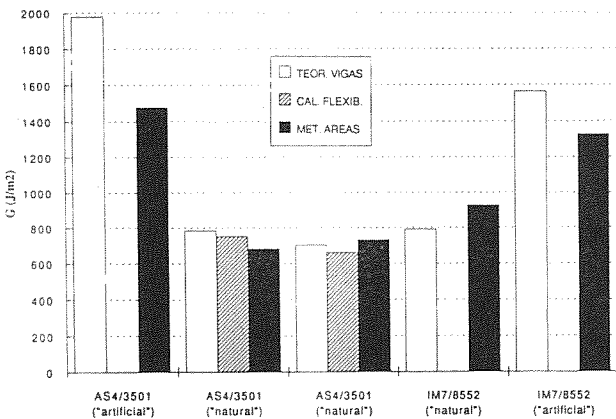


Figura 8. Valores de G_{II} para material "seco" e interlámina 0/0 obtenidos a 23°C y 0'042 mm/s.

También resulta ilustrativo el hecho (figuras 7 y 8) de que el valor de G_{II} correspondiente a los materiales con matriz 8552, sea del mismo orden que el obtenido para material AS4/3501-6 con fondo de grieta iniciadora artificial, pero es que en los ensayos bajo modo-II de los materiales con matriz 8552, no se consiguió prolongar la delaminación iniciadora bajo modo-I y, en alguna probeta en que se logró, el valor de G_{II} obtenido fué similar al correspondiente a material AS4/3501-6, lo que parece indicar que la

matriz modificada es posiblemente mucho más resistente al crecimiento de grieta interlaminar bajo modo-I que la matriz 3501-6 que no está modificada, pero de resistencia parecida en relación con el crecimiento de grieta interlaminar bajo modo-II, poniendo de nuevo este hecho de manifiesto la gran importancia que la interacción fibra-matriz tiene en la respuesta del material frente a este modo de crecimiento de grieta interlaminar. Estos resultados, aunque escasos como para realizar afirmaciones concluyentes, ponen sobre el tapete el tema de si realmente compensa modificar una matriz epoxi para mejorar su tenacidad a costa de perder propiedades (hecho que suele ser usual en los sistemas actuales) de tipo húmedo/caliente, ya que parece existir un umbral por encima del que el valor de G_{II} depende poco de la matriz y mucho de la interacción fibra-matriz. El problema, sin duda, requiere posteriores investigaciones.

Los valores (figura 9) de G obtenidos para modo-II e interláminas del tipo 0/90 (incluye laminados 90/90 y 90/0) son en general menores que los obtenidos para interlámina 0/0, lo que podría explicarse en base a una mayor activación del micromecanismo de fallo por despegado de la interfase fibra-matriz y, al mismo tiempo, una menor incidencia del efecto de "micropunteo", al presentar la interlámina 0/90 ausencia de interpenetración de fibras. Esta interlámina presenta, asimismo, una menor incidencia del mecanismo de microgrietamiento múltiple de la matriz, es decir, las fibras orientadas a 90° respecto al eje de la probeta parecen facilitar el desarrollo de mayores planos locales de descohesión de la matriz y promover el despegado por la interfase, dando lugar a una superficie de fractura con menor número de "escamas", quizás de mayor desarrollo y con mayor cantidad de roturas de entrecara.

La disminución aun mayor del valor de G_{II} a temperatura de -60°C, especialmente en las probetas de secuencia [90/0_s/90], puede explicarse considerando que el efecto recién mencionado en el párrafo anterior se acentúa debido a la "enfragilización" de la matriz a baja temperatura, debiendo además añadirse, en este caso concreto, un posible efecto de borde puesto de manifiesto por la "línea de interacción" observada en las roturas de las probetas y que divide en dos zonas la superficie delaminada (esa "línea" desaparece casi en su totalidad en las fracturas a temperatura ambiente). Es muy posible que en la zona externa a la línea de interacción haya existido una componente de modo-I que, al hacer crecer la grieta bajo modo mixto,

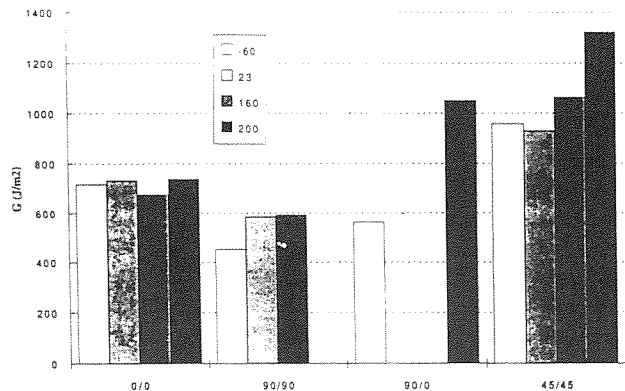


Figura 9. Valores de G_{II} en material AS4/3501-6 "seco" obtenidos a varias temperaturas y 0'042 mm/s (mét. areas).

conduce a una menor cantidad de energía disipada por unidad de área de fractura generada.

En lo referente al elevado valor obtenido a 200°C por el método de las áreas para la muestra de secuencia [90/0_g/90/0/90/0_g/90/0], el estudio de la superficie de fractura muestra una gran interacción a nivel macroscópico de la grieta con las fibras de la lámina a 90°, existiendo multitud de “bandas” de fibras “macropunteando” transversalmente las caras de la delaminación que no es en absoluto autoconsistente, habiendo crecido por varios planos al tiempo y habiendo tenido que aportarse energía elástica adicional durante la fractura para deformar, “desenterrar” y romper esas “bandas” puente.

El incremento de G_{II} con un aumento de la temperatura de ensayo es considerable para los laminados del grupo 45/45, especialmente al superar la transición vítrea de la matriz, pudiendo achacarse este hecho a un aumento de los efectos de “macropunteo” por bandas de fibras de las caras de la fractura, efecto que es considerablemente mayor y más generalizado (mayor cantidad de haces de fibras, más estrechos y con mayor número de planos de despegue) a 200°C que a 160°C.

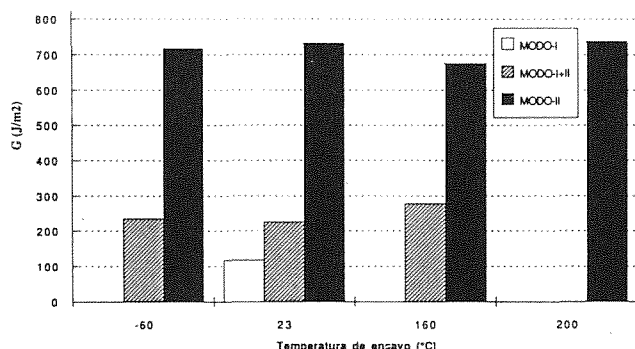


Figura 10. Valores de G para material AS4/3501-6 “seco” e interlámina 0/0 obtenidos a 0’042 mm/s (Mét. áreas).

En la figura 10 puede apreciarse la aparentemente nula influencia de la temperatura de ensayo sobre el valor de G medio de propagación para modo-II e interlámina 0/0 y la escasa influencia para modo-I+II pudiendo únicamente decirse para este último caso que “G” se eleva algo en el ensayo a 160°C, en que las fracturas muestran un incremento claro (pero en todo caso escaso) de efectos de “micropunteo” y rotura de fibras, factor que, indudablemente, contribuye a incrementar la energía consumida por unidad de área de fractura generada.

En las probetas “húmedas” del material AS4/3501-6 y según los resultados resumidos en la figura 11 para el caso de propagación (método de las áreas), parece existir una cierta tendencia a un aumento del valor de G respecto a las “secas”, al menos a temperatura ambiente, y para interláminas 0/0, pudiendo explicarse tal variación por el hecho de que el agua absorbida por la matriz plastifica ésta y, además, debilita en general el enlace fibra matriz. Ambos efectos podrían contribuir a incrementar la energía disipada durante la fractura interlaminar, el primero de ellos aportando mayor capacidad de deformación plástica a la matriz durante su descohesión, aumentando quizás la superficie (“rugosidad”) de fractura generada a nivel mi-

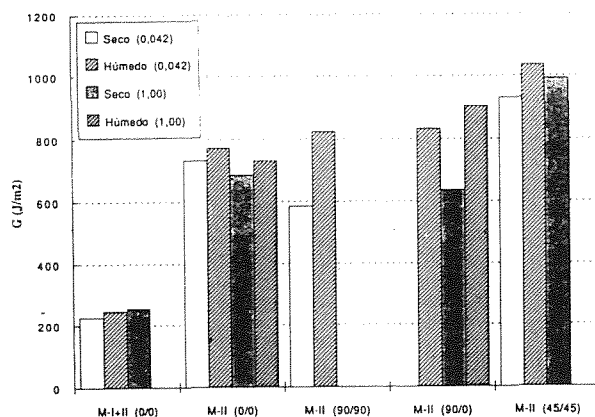


Figura 11. Valores de G a 23°C para material AS4/3501-6 obtenidos a 0’042 y 1’00 mm/s por el método de las áreas.

croscópico y el segundo facilitando el despegado fibra-matriz, efecto que, además de incrementar la superficie de fractura generada a nivel microscópico, facilita en cierta medida el efecto de “micropunteo”.

Para las interláminas del grupo 0/90, no sólo crece considerablemente el valor de G_{II} en relación con las mismas probetas “secas”, sino que también es algo más elevado que el obtenido para las “húmedas” e interlámina 0/0.

5. CONCLUSIONES

Cuando las hipótesis de partida utilizadas para deducir los métodos teóricos de reducción de datos se cumplen y la delaminación crece de forma autoconsistente y sin efectos de “punteo”, los valores proporcionados por la teoría de vigas en flexión, calibración de la flexibilidad y método directo de las áreas son similares.

Para las delaminaciones a lo largo de la interlámina 0/0 y modo-II puro, puede concluirse que el valor de G obtenido con material AS4/3501-6 (del orden de los 700 J/m²), parece depender poco del conjunto de variables considerado en la investigación y para los rangos de sus valores estudiados.

El valor de G obtenido experimentalmente para el conjunto de ensayos realizado sobre material AS4/3501-6, es siempre considerablemente mayor para modo-II “puro” de crecimiento de grieta interlaminar que para modo-I “puro”; en el caso de modo-I+II o combinado, se obtiene generalmente un valor intermedio entre los dos anteriores.

El constituyente responsable de la tenacidad a fractura interlaminar de un laminado de material compuesto no es únicamente la matriz, sino que la interacción de ésta con las fibras es, asimismo, factor esencial a considerar.

El fondo de la delaminación iniciadora para los ensayos de crecimiento de grieta interlaminar con probeta de flexión con entalla final (FEF), tiene una gran influencia sobre los resultados obtenidos, de modo que, si no se consigue un fondo “natural” de grieta iniciadora, los valores de G obtenidos de la reducción de los datos experimentales resultan artificialmente elevados.