

ROTURA DE LA MATRIZ EN MATERIALES COMPUESTOS FIBROSOS. EFECTO DE LAS CARGAS PARALELAS AL PLANO DE ROTURA.

F. París, E. Correa y J. Contreras
Escuela Superior de Ingenieros Industriales
Universidad de Sevilla.
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla
e-mail: paris@esi.us.es

Palabras Clave: Materiales compuestos, criterios de fallo, micromecánica.

Resumen: Muchos criterios de fallo de materiales compuestos asignan el fallo de la matriz a una cierta interacción (usualmente cuadrática) entre las componentes del vector tensión asociado al plano de fallo. En este trabajo se lleva a cabo un estudio micromecánico considerando, en base a observaciones de rotura, que el mecanismo de fallo se produce por grietas propagándose entre la fibra y la matriz. El objetivo de este análisis micromecánico es dilucidar si componentes del estado tensional no incluidas en el vector tensión asociado a un plano intervienen en la rotura en ese plano. Se usa el Método de los Elementos de Contorno para llevar a cabo el análisis, permitiendo contacto entre las superficies despegadas de la fibra y la matriz. Se aplican diferentes combinaciones de carga (perpendiculares y paralelas al plano de fallo) para comprobar su influencia en el índice de liberación de energía, que es el parámetro de fractura que se evalúa. Los resultados obtenidos demuestran que las tensiones no asociadas al plano macromecánico de rotura juegan un importante papel en el micromecanismo de fallo de los materiales compuestos fibrosos.

Abstract: Many failure criteria of composites assign the failure of the matrix to a certain interaction (typically quadratic) between the components of the stress vector associated to the plane of failure. In this paper, a micromechanical study is conducted considering, based on failure observations, that the mechanism of failure is produced by a crack running between the fibre and the matrix. The objective of this micromechanical analysis is to elucidate if components of the stress state not included in the stress vector associated to a plane play a role in the failure of the plane. The numerical analysis is performed using the Boundary Element Method, allowing contact between the debonded surfaces of fibre and matrix. Different combinations of loads are applied (perpendicular and parallel to the plane of failure) to check its influence in the energy release rate, which is the fracture parameter evaluated. The results obtained prove that stresses not associated to the macromechanical plane of failure plays an important role in the micromechanism of failure of fibrous composites.

1.- INTRODUCCIÓN

Aunque los materiales compuestos fibrosos se han diseñado tradicionalmente para trabajar en la dirección de las fibras, hay situaciones en las que el fallo de la matriz juega un papel importante en la resistencia de todo el laminado o, al menos, de una serie de láminas del laminado. Muchas de las propuestas existentes para predecir este fallo son variaciones de la propuesta original de Hashin y Rotem¹, expresiones (1) y (2), que consistía básicamente en estimar que el fallo que se produce en un plano del compuesto está gobernado por las componentes del vector tensión asociado a dicho plano, proponiéndose además una interacción cuadrática entre dichas componentes.

Fallo de la matriz a tracción:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Fallo de la matriz a compresión:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

donde:

σ_{22} es la tensión nominal en la lámina en la dirección transversal a las fibras.

σ_{12} es la tensión de cortadura nominal en el plano de la lámina.

Y_t es la resistencia a tracción en la dirección transversal a las fibras.

Y_c es la resistencia a compresión en la dirección transversal a las fibras.

S es la resistencia a cortadura.

De acuerdo a lo acostumbrado los ejes 1 y 2 (1 coincidente con la orientación de las fibras) definen el plano de la lámina.

Hashin² intentó extender esta idea al caso tridimensional. Al encontrar dificultades para determinar el plano de fallo decidió asignar dicho fallo a una interacción cuadrática entre los invariantes de tensiones, cancelando la contribución de σ_{11} , basándose en el hecho de que cualquier posible plano de fallo es paralelo a las fibras con lo que las componentes del vector tensión de cualquier plano de estos planos no dependen de σ_{11} . En el fallo de la matriz a tracción despreciando el término lineal y particularizando al caso bidimensional se llega a la expresión (1). En el caso de fallo por compresión se llega a una expresión más compleja que involucra a la resistencia a cortadura transversal. Un estudio más general sobre estos criterios puede verse en París³ y uno más específico sobre el papel de esta resistencia transversal en París et al⁴.

La idea de que las componentes del vector tensión controlan la rotura de un plano ha sido con posterioridad a las propuestas de Hashin retomada por diversos autores (e.g.: Sun et al⁵

y Kroll y Hufenbach⁶) introduciendo coeficientes del material para tomar en consideración la mayor resistencia a iso-compresión perpendicular a las fibras.

El objetivo de este trabajo es dilucidar si la hipótesis principal (i.e.: la rotura en un plano o está gobernada por las componentes del vector tensión asociado a dicho plano) es una suposición con base física. Con esta finalidad se desarrollará un análisis micromecánico basado en el Método de los Elementos de Contorno. En primer lugar, el modelo micromecánico, basado en una celda unitaria con una única fibra parcialmente despegada a lo largo de la interfase se describirá, así como los principales aspectos del análisis numérico llevado a cabo. En esta situación se aplicarán algunas cargas en una y dos direcciones.

2.- ASPECTO MICROMECAÍNICO DE LA ROTURA

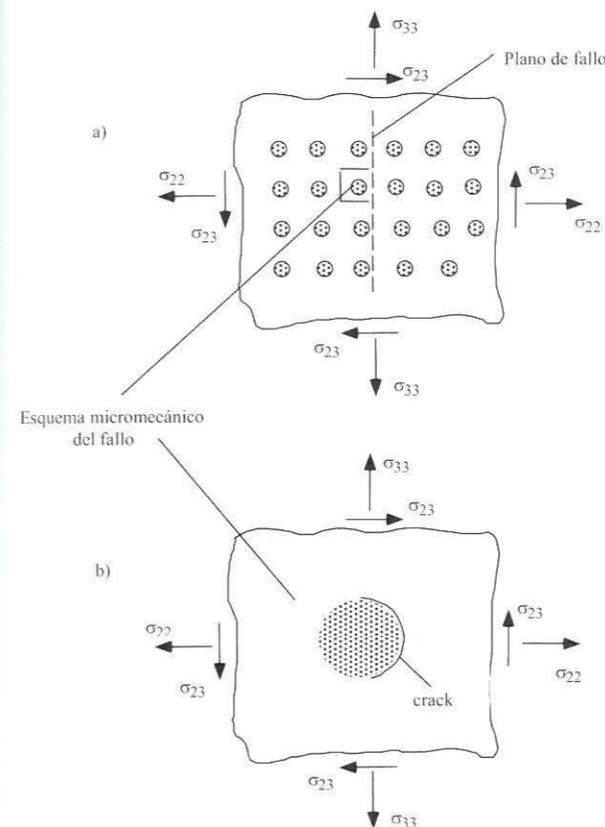


Fig. 1. Implicaciones micromecánicas de asociar la rotura en un plano a las tensiones asociadas a dicho plano.

Para poder distinguir las tensiones involucradas en el mecanismo de fallo y su interacción, el modelo tiene que considerar el actual mecanismo de rotura del material. En este caso (rotura de la matriz), se considera, sobre observaciones de especímenes dañados, que el daño comienza en el nivel micromecánico por grietas que progresan circunferencialmente entre las fibras y la matriz. Cuando estas grietas han crecido una cierta longitud interaccionan con las otras, dando lugar a una macro-rotura del composite. El crecimiento de la grieta a través de la interfase fibra y matriz es el mecanismo que se considera en este estudio. Se estima que éste es el periodo de daño más significativo en los composites. En la figura la aparece la rotura en un plano vertical con una configuración idealizada de un composite fibroso. Esta rotura incluye, como mecanismo de fallo posible, la presencia de una grieta creciendo entre la fibra y la matriz, como se indica en la figura 1b. Inicialmente se va a

estudiar una sección transversal de una fibra aislada embebida en matriz con despegue inicial entre fibra y matriz, ante carga transversal y en deformación plana. La geometría y características del modelo aparecen en la figura 2. Esta geometría llevaría, en un composite real, cuando el daño se extiende, a una macro-fisura en el plano vertical. La cuestión bajo consideración, con el modelo de la figura 2, es descubrir si las componentes del vector tensión que no están asociadas al plano de fallo (σ_{33} y σ_{23} en la figura 1b) juegan algún papel en la propagación de la grieta. En el estudio numérico llevado a cabo, y debido a la representatividad de los resultados obtenidos, sólo se modelará la componente σ_{33} .

3.- MODELO NUMERICO

El análisis numérico se va a desarrollar sobre la configuración mostrada en la figura 2 con el Método de los Elementos de Contorno, París y Cañas⁷. Una configuración similar, con un propósito diferente se estudió en París et al⁸. El modelo permite el desarrollo de zona de contacto (θ_d - θ_s en la figura 2) entre las superficies despegadas de la fibra y la matriz. Los dos contornos de la interfase se han modelado utilizando elementos rectos lineales continuos. Para caracterizar el problema desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura se usa el índice de liberación de energía. La expresión empleada cuando la grieta de tamaño α se propaga un incremento δ ($\delta \ll \alpha$) es la siguiente:

$$G_{\delta}^{arc}(\alpha) = \frac{1}{2\delta} \int_{\alpha}^{\alpha+\delta} \{ (\sigma_{rr})_{\alpha} \cdot (u_r)_{\alpha+\delta} + (\sigma_{r\theta})_{\alpha} \cdot (u_{\theta})_{\alpha+\delta} \} d\theta \quad (3)$$

donde σ_{rr} y $\sigma_{r\theta}$ representan respectivamente la tensión radial y tangencial a lo largo de la interfase, y u_r y u_{θ} sus desplazamientos asociados. Los dos modos de fallo, I (asociado a σ_r) y II (asociado a $\sigma_{r\theta}$) son considerados. La presencia de zona de contacto entre las superficies despegadas alterará en cualquier caso el carácter del modo de fallo.

Cuando el modelo numérico no detecta zona de contacto (por ejemplo, para una tracción lejana (en la dirección horizontal en la figura 2) para pequeños despegues, menores de 30°, París et al⁸, ambas tensiones σ_r y $\sigma_{r\theta}$ son singulares y la grieta trabaja en modo mixto.

Cuando la zona de contacto es detectada, sólo σ_r (en referencia a las componentes del vector de tensiones en el fondo de grieta) alcanza un valor singular y la grieta trabaja en modo II puro. El carácter singular de la presión de contacto de la zona de contacto del fondo de la grieta no juega ningún papel en el proceso de fractura. El valor del índice de liberación de energía será normalizado, para fines comparativos en las representaciones, de la siguiente forma:

$$G(\theta_d) = G(\theta_d, \sigma_0) \frac{\mu_m}{a\sigma_0^2} \quad (4)$$

siendo μ_m el módulo de cizalladura de la matriz.

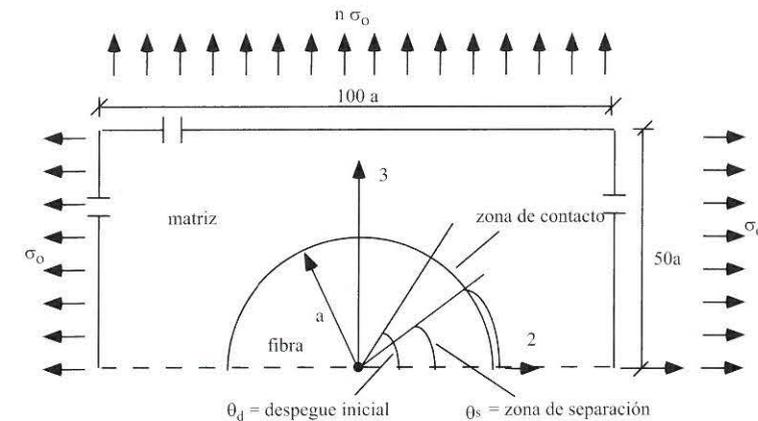


Fig. 2. Modelo Numérico.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se organizan de la siguiente manera. En un primer bloque se describen los valores del índice de liberación de energía en presencia de grietas de diferentes longitudes bajo carga uni o bidireccional. Los resultados correspondientes a las variaciones de la carga transversal al plano de fallo (σ_{33} en la figura 1) se agrupan en un bloque por separado porque constituyen el objeto principal de estudio de este trabajo.

Todos los resultados se han obtenido para un sistema grafito-epoxy con las siguientes propiedades: ν_f = Coeficiente de Poisson de la fibra = 0.22, ν_m = Coeficiente de Poisson de la matriz = 0.33, E_f = Módulo de elasticidad de la fibra = $7.08 \cdot 10^{10}$ Pa, E_m = Módulo de elasticidad de la matriz = $2.79 \cdot 10^9$ Pa, carga aplicada $\sigma_0 = 1$ Pa.

Sólo se han incluido en este estudio despegues mayores de 60 grados (30 en el modelo, debido a la simetría) porque no aparecen efectos cruciales para casos menores.

En el apartado 4.1 se considera el caso de carga en una única dirección (perpendicular o paralela al plano de fallo). Debido a la naturaleza no lineal del problema, por la presencia de zona de contacto, las diferentes combinaciones derivadas de la actuación de dos cargas (perpendicular y paralela al plano de fallo) se estudian en el apartado 4.2.

4.1. Carga en una dirección

En primer lugar se estudia el caso de una carga perpendicular al plano de fallo. Los resultados de la energía unitaria liberada (normalizada) para diferentes valores del ángulo de despegue aparecen en las figuras 3 y 4.

Con referencia al caso de tracción representado en la figura 3, se puede observar que la energía unitaria liberada normalizada tiene un máximo alrededor de los 60° (en la parte simétrica resuelta) que coincide con la aparición de la zona de contacto de tamaño finito. La generación de esta zona de contacto está motivada por el cambio en la orientación relativa del fondo de grieta respecto a la carga cuando la longitud de la grieta aumenta, Paris et al.⁸. La existencia de una grieta entre materiales disimilares implica siempre, desde un punto de vista conceptual, la presencia de zona de contacto, Comninou⁹.

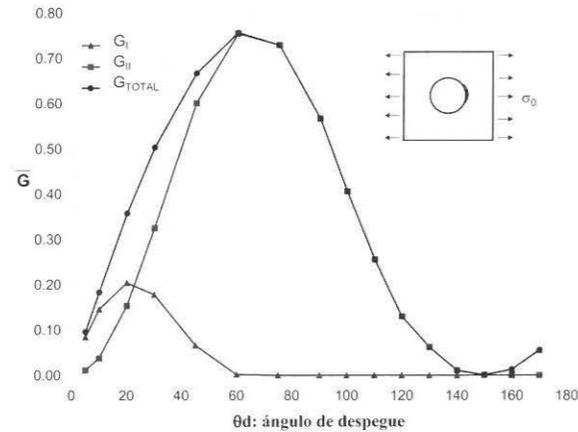


Fig. 3. Energía liberada normalizada, componentes y total para el caso de tracción.

inestable hasta la posición de máxima energía liberada, seguido de crecimiento estable para ángulos mayores. El problema es, en cualquier caso, más complicado debido a la presencia de modo mixto durante un cierto intervalo de valores del ángulo de despegue. Se puede observar cómo G_{II} domina sobre G_I en todo el intervalo de despegues considerado. Para despegues alrededor de los 60° el modelo numérico detecta la presencia de zona de contacto, con lo que el modo I desaparece, quedando así claro el carácter estable del crecimiento de la grieta bajo modo II puro.

Haciendo referencia ahora al caso de compresión, figura 4, las diferencias cuantitativas y cualitativas de la curva con respecto al caso de tracción son aparentes.

Con referencia al nivel es obvio que la energía unitaria liberada en el caso de compresión debería ser más pequeña que en el caso de tracción. Respecto a la forma, la explicación viene de la interacción entre los dos modos de fallo, representándose en la figura 4 sus correspondientes componentes de liberación de energía. El modo I es significativo sólo en la cercanía de los 90° . Esto es bastante evidente ya que la fibra es más rígida que la matriz y cuando el despegue alcanza los 90° la fibra y la matriz tienden a separarse en el fondo de grieta.

El modo II presenta dos picos en 45° y 135° , despegues que tienen asociados orientaciones

En cualquier caso, el tamaño de dicha zona de contacto puede ser tan pequeño que un método tan preciso como el MEC, y en presencia de una discretización tan fina como la utilizada aquí, no sea capaz de detectarla. Por el contrario, el efecto de la orientación relativa de la carga con respecto al final de la grieta puede dar lugar a zonas de contacto de tamaño finito, a las que se hizo referencia anteriormente. En cualquier caso, el problema es más complejo y ha sido analizado con detalle en Paris et al.¹⁰. La forma de la curva para este caso sugiere un crecimiento

del fondo de grieta que se corresponden con aquellas en las que el valor nominal de la tensión tangencial en un cuerpo ante compresión uniaxial alcanza el máximo. Así la suma del modo I y del modo II da lugar a la forma de la curva observada en la figura 4. El hecho de que se alcance el segundo período de crecimiento inestable dependerá de la aparición de un modo de rotura diferente que involucre básicamente a la matriz.

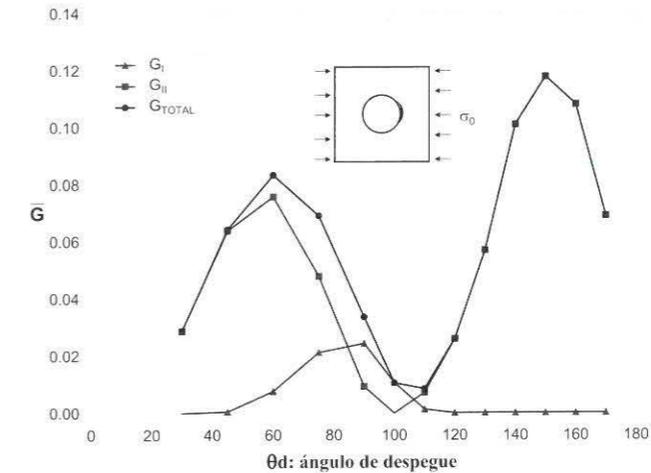


Fig. 4. Energía liberada normalizada, componentes y total, para el caso de compresión.

Es también pertinente el estudio del caso de carga paralela al plano supuesto de fallo (vertical de acuerdo con la figura 1). Se representan los resultados para tracción y compresión en la figura 5.

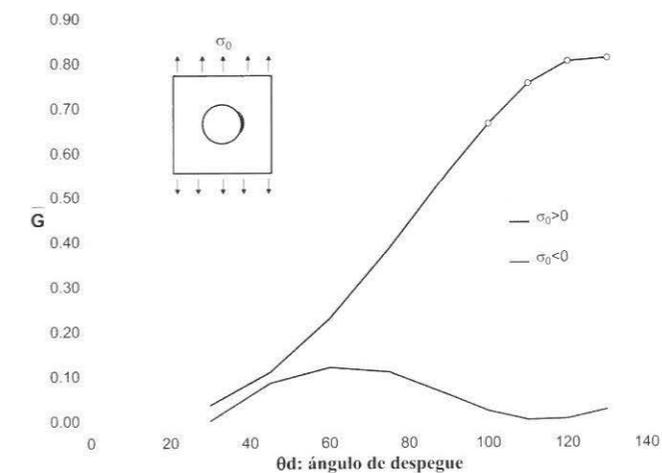


Fig. 5. Energía unitaria liberada para tracción o compresión paralela al plano de fallo.

Estos resultados se incluyen para completar la información dada por el caso previo de carga estudiado y como preparación para comprender los resultados correspondientes al estado biaxial de cargas.

La conclusión más significativa de los resultados de la figura 5 es que los valores de la energía unitaria liberada normalizada para el caso de tracción son muy bajos para despegues pequeños pero que alcanzan un alto nivel (similar al caso de tracción perpendicular al plano de rotura, figura 3) cuando el despegue crece. En cualquier caso, el máximo valor aparece para un despegue para el cuál, de acuerdo con la evidencia experimental, un mecanismo de fallo diferente al considerado aquí (probablemente involucrando a la matriz) tendrá lugar.

4.2. Carga en dos direcciones

La figura 6 muestra la energía unitaria liberada normalizada para las cuatro combinaciones de tracción y compresión en sentido horizontal y vertical. Para tener una referencia con el caso de carga uniaxial antes analizado se han incluido también los casos de tracción y compresión en sentido perpendicular al daño. En los casos de carga biaxial, el primer símbolo corresponde a la tensión en sentido horizontal.

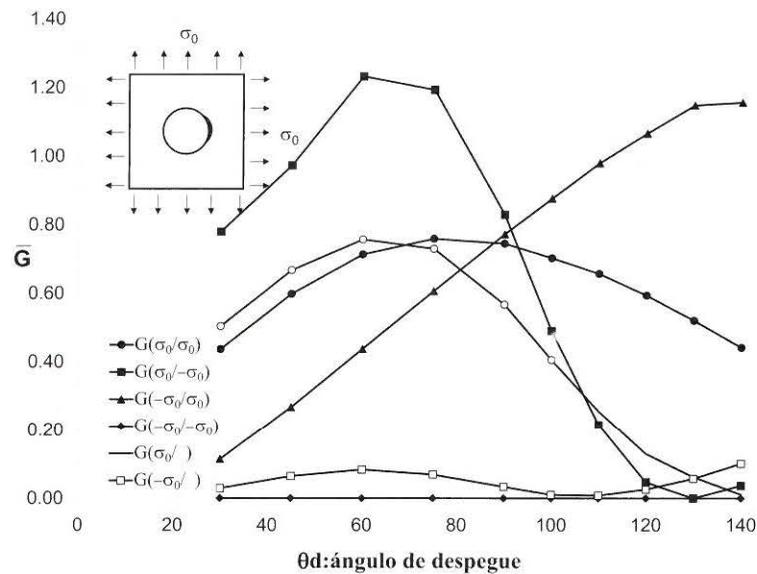


Fig. 6. Energía unitaria liberada normalizada para cargas en dos direcciones.

En primer lugar resulta muy instructivo de los resultados obtenidos comprobar cómo el modelo desarrollado predice el aumento de resistencia para casos de iso-compresión transversal a la fibra, dado que la energía unitaria liberada es prácticamente nula. Se obtiene

así una explicación micromecánica para un hecho experimentalmente contrastado, lo que avala la representatividad del modelo desarrollado.

En segundo lugar y a efectos de la cuestión bajo consideración en este trabajo, puede observarse el papel relevante que tienen las tensiones en sentido vertical (tensiones que no quedarían recogidas por las componentes del vector tensión asociadas al plano de fallo, el plano vertical) en la liberación de energía unitaria. Esta cuestión puede apreciarse, por ejemplo, en la influencia de una compresión en sentido vertical superpuesta sobre la tracción horizontal. Para observar más claramente esta cuestión en la figura 7 se representan las diferentes energías unitarias liberadas para los casos en que la tracción horizontal se mantiene fija y la compresión vertical es variable (valores de n entre 0 y 1).

Los resultados ponen claramente de manifiesto la enorme influencia que tiene en la propagación del daño, materializada en el modelo desarrollado por la liberación de energía, la presencia de una componente de tensión no vinculada al vector tensión asociado al plano de fallo.

Así por ejemplo, para el material estudiado, la presencia de una compresión paralela al plano de fallo de valor equivalente a la tracción perpendicular a dicho plano, $n=1$, puede casi duplicar el valor de la energía unitaria liberada en la zona de máximo interés (en el entorno de los 60 grados de despegue en el modelo estudiado) donde se produce previsiblemente el cambio de crecimiento estable a inestable de la grieta.

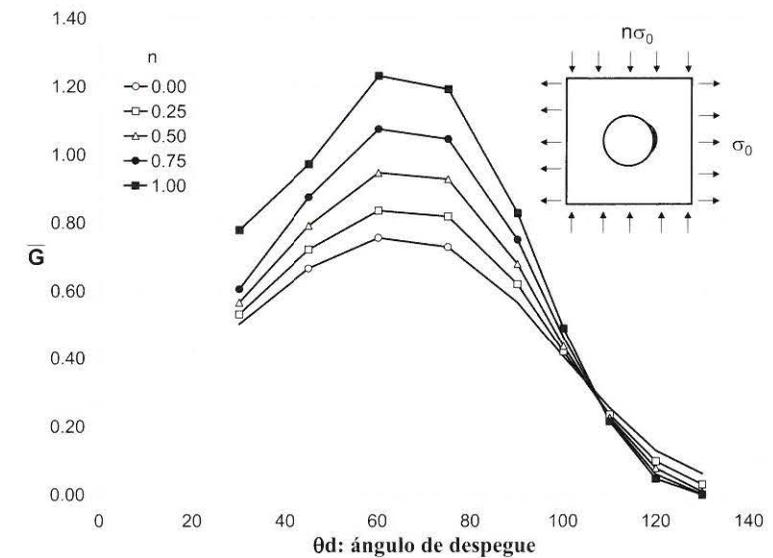


Fig. 7. Efectos de una compresión paralela al plano de rotura en la energía unitaria liberada.

5.- CONCLUSIONES

Del estudio realizado se concluye que para los materiales compuestos fibrosos, aceptando que lo que habitualmente se conoce como fallo de la matriz se materializa (de acuerdo a observaciones del fallo) en grietas que despegan transversalmente la fibra y la matriz, no hay base física para la suposición, muy extendida, de que el fallo en un plano está gobernado por las componentes del vector tensión asociado a dicho plano. Se ha puesto de manifiesto cómo la energía unitaria liberada por una grieta transversal en la interfase fibra - matriz se ve fuertemente afectada por la presencia de tensiones normales paralelas al plano de fallo y por tanto no asociadas al vector tensión asociado al plano de fallo.

6.- REFERENCIAS

1. Hashin Z., Rotem, A. (1973), A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 448-464.
2. Hashin Z. (1980), Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 329-334.
3. París F. (2001), On failure criteria of fibrous composites materials. NASA/CR-2001-210661.
4. París F., Marín J. C., Cañas J. (2001), Sobre las propuestas de Hashin de fallo de la matriz en compresión. Aceptado para publicación. MATCOMP'01. IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Gijón.
5. Sun C. T., Quinn B. J., Tao J., Oplinger D. W. (1996), Comparative evaluation of failure analysis methods for composite laminates. DOT/FAA/AR-95/109.
6. Kroll L., Hufenbach W. (1997), Physically based failure criterion for dimensioning of thick-walled laminates. *Appl. Compos. Mater.*, Vol. 4, pp. 321-332.
7. París F., Cañas J. (1997), *Boundary Element Method. Fundamentals and Applications*, OUP.
8. París F., Varna J., Del Caño J.C. (1997), The fiber-matrix interface crack. A numerical analysis using Boundary Elements. *International Journal of Fracture*, Vol. 87, pp. 11 -29.
9. Comninou M. (1977), The interface crack. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 44, pp. 631-636.
10. París F., Correa E., Jurado A., Mantic V. y Graciani E. (2001), Aspectos micromecánicos de grietas transversales de interfase entre fibra y matriz. Aceptado para publicación. MATCOMP'01. IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Gijón.