

ASPECTOS MICROMECAÑICOS DE GRIETAS TRANSVERSALES DE INTERFASE ENTRE FIBRA Y MATRIZ.

F. París, E. Correa, A. Jurado, V. Mantic, E. Graciani
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, Micromecánica, Elementos de Contorno, Mecánica de la Fractura.

Resumen: Se realiza un estudio micromecánico de la presencia de grietas transversales en materiales compuestos reforzados con fibra. El objetivo del estudio es clarificar la presencia de contacto entre la fibra y la matriz en la zona despegada en función del tamaño del despegue, así como las razones de la aparición de esta zona de contacto. Esta cuestión es de importancia para establecer los parámetros que controlan la fractura y el modo en que ésta se produce. Para dilucidar estas cuestiones un especial énfasis es puesto en la caracterización del estado tensional en el entorno del fondo de la grieta de interfase. El estudio se realiza por medio del Método de los Elementos de Contorno.

Abstract: A micromechanical study is carried out in presence of transversal cracks in fibre reinforced composite materials. The objective of the study is to clarify the presence of contact between the fibre and the matrix in the unbonded zone as a function of the size of the unbonded zone, as well as the reasons for the appearance of this contact zone. This question is of great importance to establish the parameters that control the fracture and the mode under which it appears. To elucidate these questions, a special emphasis has been put on the characterization of the stress state in the neighbourhood of the crack tip. The study is performed by means of the Boundary Element Method.

1.- INTRODUCCIÓN

Los estudios micromecánicos representan un instrumento que debe ser utilizado para la clarificación del comportamiento de los materiales compuestos en un nivel superior de modelización de los mismos. En este sentido, modelos micromecánicos planos de secciones transversales a la dirección de refuerzo de la fibra son adecuados para crear la base de conocimiento idónea para establecer criterios de rotura a nivel de lámina por fallo de la matriz (a tracción o a compresión), París¹.

La complejidad de los problemas resultantes de estudios micromecánicos es usualmente muy elevada y requiere en muchas ocasiones de modelos complejos. Tal es el caso de la modelización que se realiza para este estudio, que involucra el cierre de grietas y un estudio

basado en Mecánica de Fractura. Un modelo similar fue analizado en el contexto de la determinación de la tenacidad a fractura de la interfase fibra y matriz por París et al².

El objetivo fundamental de este estudio es el de validar la solución numérica obtenida del estado tensional, usando el Método de los Elementos de Contorno, de un modelo plano transversal (apartado 2) de un compuesto de una sola fibra con despegue parcial entre fibra y matriz. En primer lugar (apartado 3) se analiza en detalle la aparición de la zona de contacto en función del tamaño de la zona despegada entre fibra y matriz y de las propiedades del material. En segundo lugar (apartado 4) se analiza el carácter (singular o no) de las tensiones en el entorno del fondo de grieta. Finalmente (apartado 5) se estudia la variación de la energía unitaria liberada en modos I y II.

2.- MODELO EMPLEADO

La geometría del problema a tratar aparece en la figura 1 y consiste en analizar el caso de una grieta que progresa por la interfase entre una fibra y la matriz que la rodea bajo la hipótesis de deformación plana estando sometido el conjunto a carga transversal a la dirección de la fibra.

El modelo empleado considera la posibilidad de la aparición de zona de contacto (figura 1) entre las superficies de la fibra y la matriz que se encuentran despegadas.

Para el análisis numérico se utiliza un código basado en el Método de los Elementos de Contorno que permite la resolución de problemas de contacto entre sólidos utilizando para ello elementos rectos lineales continuos.



Fig. 1. Modelo.

Para caracterizar el problema desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura se utilizará el índice de liberación de energía G , que cuantifica la energía unitaria liberada por la grieta en su crecimiento. La expresión empleada cuando la grieta se propaga desde un cierto ángulo α un incremento δ ($\delta \ll \alpha$) es la siguiente:

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

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 asociados². Las propiedades de los materiales empleados son las siguientes: ν_f = Coef. de Poisson de la fibra = 0.22, ν_m = Coef. de Poisson de la matriz = 0.33, E_f = Mod. de elasticidad de la fibra = $7.08 \cdot 10^{10}$ Pa, E_m = Mod. de elasticidad de la matriz = $2.79 \cdot 10^9$ Pa, carga aplicada $\sigma_0 = 1$ Pa.

3.- ZONA DE CONTACTO

En el estudio de la propagación de la grieta por la interfase fibra-matriz es importante conocer la evolución de la zona de contacto de la grieta a medida que ésta crece en la interfase, para así dilucidar el modo de fractura en el que se produce el avance de la grieta. Esta zona es aquélla en la cual el desplazamiento relativo (en sentido normal a la superficie de contacto) de los puntos enfrentados de los labios de la grieta es nulo, es decir, no existe despegue entre las dos caras de la grieta.

3.1.- Acerca de la zona de contacto en grietas de materiales distintos

A partir de los resultados obtenidos por París et al² se comprueba que en grietas de interfase fibra matriz se detecta la aparición de una zona de contacto junto al fondo de la grieta que aumenta de tamaño a medida que crece dicha grieta. Se observa también que dicha zona de contacto comienza a ser significativa a partir de los 60°, no siendo detectable por el procedimiento numérico usado para ángulos de grieta menores de 30°.

La comprensión de la evolución de la zona de contacto a medida que la grieta progresa por la interfase fibra-matriz requiere del conocimiento del origen de la aparición de la zona de contacto. En principio, la aparición de la zona de contacto pudiera deberse al cambio de orientación que el extremo de la grieta sufre respecto a la carga, comenzando a ser perceptible dicha zona para los materiales aquí estudiados alrededor de los 60° en la posición del fondo de grieta de la interfase. En cualquier caso, el MEC comienza a captar zona de contacto, aunque muy pequeña, a partir de los 30°, y su existencia no puede ser explicada por el cambio de la orientación de la carga, por lo que es necesario retroceder al caso general de grietas que aparecen entre dos sólidos distintos para comprender el fenómeno anterior. En base a los estudios de Comninou sobre zonas de contacto en los extremos de grietas entre materiales distintos^{4,5}, se predice la aparición de una zona de contacto micromecánica independientemente de la longitud de la grieta. A este fenómeno se le denominará en este trabajo efecto Comninou. Este efecto presenta una doble naturaleza en función del tipo de carga que actúa sobre la grieta, según sea ésta de tracción o de tipo tangencial. Mientras que la tensión normal conduce a zonas de contacto de tamaño micromecánico la tensión tangencial puede llevar a zonas de contacto de tamaño apreciable. De lo anterior se puede deducir para el caso particular de estudio que, aunque el MEC no

capte zona de contacto para ángulos de grieta pequeños, ésta debería existir desde el momento en que existe una fisura, por pequeña que ésta sea.

Así, parece que son tres los efectos que pueden explicar la aparición de la zona de contacto: efecto Comninou debido a la tensión normal, efecto Comninou debido a la tensión tangencial y efecto de la orientación de la carga con respecto a la orientación del fondo de grieta, si bien la responsabilidad de dichos efectos en el tamaño de la zona de contacto para cada longitud de grieta aún no está clara. Clarificar esta cuestión es importante ya que todo lo que afecte al último efecto mencionado es independiente de las propiedades del material.

3.2.- Acerca de la zona de contacto en grietas entre materiales iguales

La aplicabilidad del efecto Comninou se restringe al caso de grietas entre materiales distintos, por lo que, si se estudiara la misma configuración geométrica pero con propiedades iguales para la fibra y la matriz, la aparición de la zona de contacto debería estar causada únicamente por el cambio de la orientación de la grieta con respecto a la carga. En base a lo anterior se llegó a la conclusión de que el estudio de la zona de contacto para el caso de materiales iguales podría ayudar a deducir la responsabilidad que cada efecto tiene sobre la zona de contacto en grietas de materiales distintos.

La figura 2 representa la evolución de la zona de contacto (en términos angulares) en función del tamaño de la grieta (en términos angulares), incluyéndose también los resultados para los casos en que la fibra y la matriz tuvieran las mismas propiedades. Los resultados son muy ilustrativos para la cuestión que se pretende dilucidar. En primer lugar se observa un retraso importante, con respecto al caso de fibra y matriz con distintas propiedades, de la aparición de la zona de contacto en materiales iguales. Esta aparición se produce alrededor de los 78° en la posición del fondo de la grieta, sin que hasta ese momento el programa captase contacto alguno en la grieta, es decir, que la diferencia con el caso de materiales distintos no estriba sólo en el retraso de la aparición de la zona de contacto de tamaño finito, que se producía alrededor de los 60° para materiales distintos, sino que la pequeña zona de contacto que aparecía desde los 30° es inexistente en este caso.

A continuación se puede deducir de los hechos anteriores que, como la zona de contacto en grietas entre materiales iguales sólo puede ser debida al efecto del cambio de orientación de la grieta respecto a la carga, y esta zona de contacto aparece alrededor de los 78° , toda la zona de contacto que pueda aparecer antes de esta posición del fondo de grieta para materiales distintos debe deberse al efecto Comninou en cualquiera de sus dos variantes.

Esquemáticamente podría explicarse la distribución de los distintos efectos como se muestra en la figura 2. Respecto al caso de propiedades reales de fibra y matriz, en un primer momento el tamaño de la zona de contacto es, cuando la grieta es muy pequeña, micromecánico y está causado por el efecto Comninou de la tensión normal. Cuando el fondo de la grieta deja de tener una orientación cuasi perpendicular a la carga, las tensiones tangenciales empiezan a ser significativas, manifestándose el efecto Comninou debido a dichas tensiones, lo que produce zonas de contacto de tamaño micromecánico que ya son detectables por el método numérico. A partir de posiciones del fondo de grieta por encima de 75° u 80° se suma a los anteriores efectos el de la orientación de la carga, que es el que

realmente da peso al tamaño de la zona de contacto, junto al efecto Comninou de la tensión tangencial cuando las propiedades de la fibra y la matriz sean distintas. Desde ese momento las gráficas para el caso de materiales iguales y el caso de materiales distintos se acercan, diferenciándose sólo en el efecto Comninou en sus dos variantes, aunque, básicamente debido a la tensión tangencial. Esta diferencia decrece a medida que el efecto de la orientación de la carga aumenta.

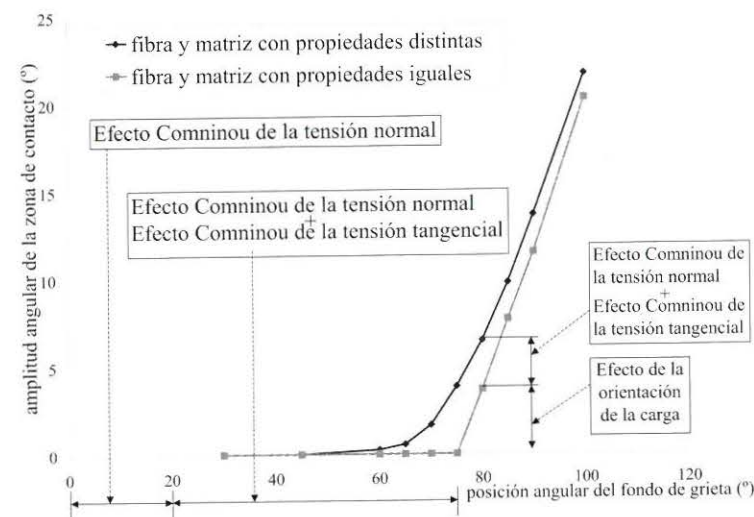


Fig. 2. Evolución de la zona de contacto con la posición del fondo de grieta y distribución de efectos.

4.- CARÁCTER DE LAS TENSIONES A AMBOS LADOS DEL FONDO DE GRIETA

La aparición de la zona de contacto en la grieta de interfase se siente especialmente en el carácter de las tensiones en la cercanía del fondo de grieta, Paris et al.². Así se exponía que, para ángulos de despegue menores de 60° , es decir, antes de la aparición de una zona de contacto finita, las tensiones normales y tangenciales en el fondo de grieta presentaban carácter singular, como predicen estudios analíticos simplificados, Toya⁶. Pero, para ángulos mayores en los que ya se hace patente la aparición de la zona de contacto, los resultados obtenidos difieren de los analíticos, encontrándose que la singularidad en las tensiones normales cuando la aproximación al fondo de grieta se realiza por la zona pegada de la interfase desaparece y, además, éstas son de tracción. Si el acercamiento se realiza por la zona de contacto se observa la presencia de tensiones de compresión singulares. Sobre las tensiones tangenciales, su carácter no se altera respecto a un ángulo de despegue menor. En ángulos de despegue aún mayores, alrededor de 80° , la tendencia observada para el caso de 60° se mantiene, pero las tensiones normales se convierten en compresiones en la zona pegada.

Por tanto, es interesante estudiar la evolución de las tensiones cuando la fibra y la matriz estén constituidas por materiales de iguales propiedades, materiales similares, de forma que, al igual que ocurre en el apartado anterior, sirva para obtener conclusiones al respecto.

4.1.- Estudio de las tensiones normales próximas al fondo de la grieta en la zona de interfase no dañada en el caso de fibra y matriz constituidas por materiales similares

La solución analítica para las tensiones normales en el entorno del fondo de grieta donde existe una singularidad es de la forma indicada en (2), donde σ es la variable que caracteriza a las tensiones normales y r representa la distancia de los puntos de la interfase al fondo de grieta.

$$\sigma = a \cdot r^\lambda \tag{2}$$

En términos logarítmicos (2) se expresa según:

$$\log(\sigma) = \log(a) + \lambda \cdot \log(r) \tag{3}$$

De (3) se deduce que las representaciones logarítmicas que se hagan de las tensiones normales frente a la distancia al fondo de grieta que muestren una evolución rectilínea serán aquéllas en las que las tensiones normales sean singulares, mientras que las que no se ciñan a esta evolución no presentarán dicha singularidad.

En la figura 3 aparecen las evoluciones logarítmicas de las tensiones normales para tres casos representativos en lo que a la aparición y tamaño la zona de contacto se refiere; éstos son 70°, 80° y 90° en la posición del fondo de grieta, en la situación en la que la fibra y la matriz están compuestas por materiales de propiedades iguales, en este caso las de la matriz.

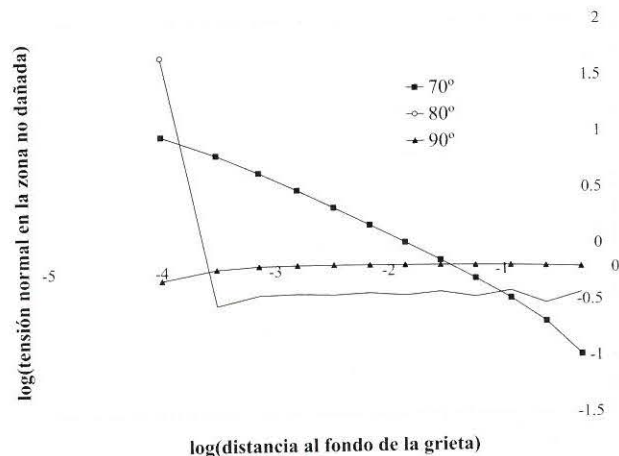


Fig. 3. Evolución de la tensión normal para las posiciones de 70°, 80° y 90° frente a la distancia al fondo de la grieta

La evolución logarítmica de las tensiones en el caso de 70°, tamaño de grieta para el cual no existe aún zona de contacto finita, permite comprobar cómo éstas mantienen el carácter singular predicho para el caso en el que no existe zona de contacto, al igual que ocurría en el caso de materiales disimilares. En los casos de 80° y 90° respectivamente, donde ya hay zona de contacto, la singularidad desaparece como se esperaba del estudio de materiales disimilares, ya que la zona de contacto aparece en el caso de materiales iguales aproximadamente para 78°. También se comprueba que estas tensiones son de compresión.

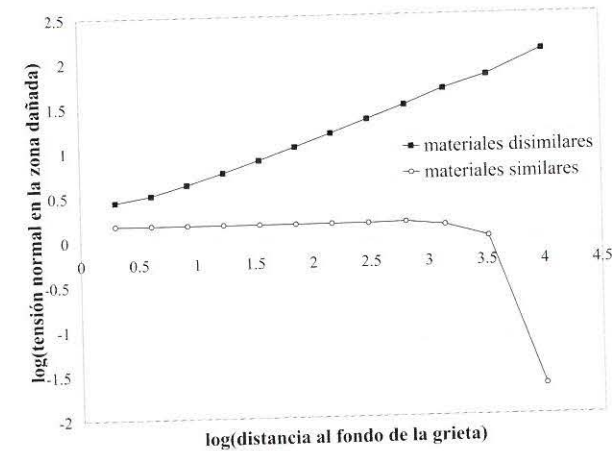


Fig. 4. Logaritmo de la tensión normal para el caso de 90° frente a la distancia al fondo de grieta.

4.2.- Estudio de las tensiones normales próximas al fondo de la grieta en la zona de contacto

En este apartado se comprueba, igual que en el anterior, si la evolución del carácter de las tensiones normales de compresión próximas al fondo de grieta en la zona de contacto, para el caso en el que la fibra y la matriz están constituidas por materiales similares, se corresponde con el caso de materiales disimilares.

Se deduce de la solución de Comninou para tensiones normales⁴ que en materiales similares el término singular de dicha solución se anula, por lo que no son esperables en ese caso tensiones normales singulares. Para comprobar este hecho se estudia la evolución logarítmica de las tensiones normales en la parte dañada de la interfase, cuando la posición del fondo de grieta sea de 90°, quedando dichas evoluciones reflejadas en la figura 4, tanto para materiales disimilares como para materiales similares.

Los resultados obtenidos en la figura 4 corroboran lo esperado, ya que la evolución que presenta el caso de materiales disimilares predice la existencia de singularidad en las tensiones, mientras que para materiales similares las tensiones no presentan dicha singularidad.

5.- EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA UNITARIA LIBERADA EN LA PROGRESIÓN DE LA GRIETA

Se pretende explicar la evolución de la energía liberada por la grieta en su propagación por la interfase fibra-matriz. Esta evolución será comparada con la del caso en el que la fibra y la matriz tengan las mismas propiedades. Los resultados energéticos se corresponden con valores adimensionalizados de la energía liberada por la grieta en su crecimiento según (4):

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

donde:

$G(\theta_d)$ = Energía liberada adimensional función del ángulo de despegue de la grieta,

$G(\theta_d, \sigma_0)$ = Energía liberada dependiente de la posición de dicho ángulo y de la tensión aplicada σ_0 ,

μ_m = Módulo de cizalladura de la matriz, a = radio de la fibra.

5.1.- Evolución de la energía liberada para el caso de materiales disimilares

En la figura 5 se ha representado la energía total liberada conjuntamente con sus componentes desacopladas en modo I y modo II. Sobre la energía total liberada puede apreciarse, en primer lugar, que presenta una zona de crecimiento inestable hasta llegar al máximo de la curva, alrededor de los 60°. Esto implica que la grieta progresará espontáneamente en este tramo sin necesidad de aumento de la carga. Después del máximo de la curva aparece una zona de crecimiento estable en la que sería necesario aumentar la carga para que la grieta pudiera propagarse. Hay que destacar que desde que se detecta la aparición de la zona de contacto, la contribución energética en modo I comienza a decrecer desapareciendo casi totalmente cuando esta zona se hace finita.

5.2.- Evolución de la energía liberada para el caso de materiales similares

La evolución tiene ciertas diferencias respecto al caso materiales similares. Se observa que el máximo se adelanta respecto a la aparición de la zona de contacto, produciéndose ahora alrededor de los 50°, mientras que la zona de contacto aparece alrededor de los 78°. A la vista de la figura 6, donde se representa la evolución de la energía para el caso en el que tanto la fibra como la matriz tienen propiedades iguales a las de la fibra, parece que este adelanto del máximo es debido a la mayor contribución del modo I con respecto al caso de materiales similares, ya que el máximo de la curva correspondiente al modo II sí aparece alrededor de los 78°, como se podría haber esperado para la energía total.

El hecho de que ambos modos sean cuantitativamente comparables en los alrededores del máximo hace que no se pueda hablar del carácter estable o inestable en esta zona. La razón es que al estar propagándose la grieta en modo mixto es desconocido el criterio energético que puede aplicar la Mecánica de la Fractura para predecir el tipo de fallo de la interfase.

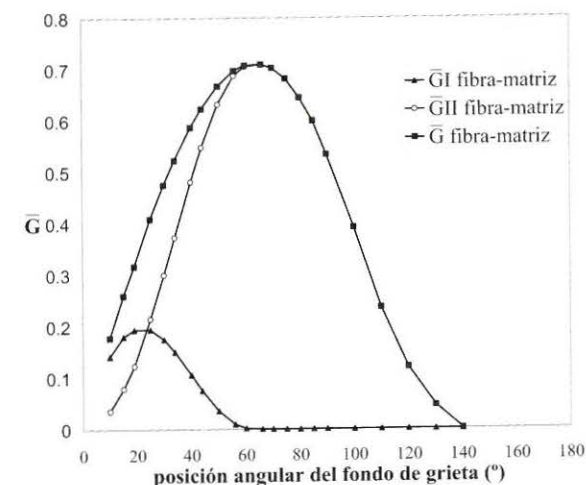


Fig. 5. Representación de las componentes de la energía liberada frente a la posición de la grieta en la interfase.

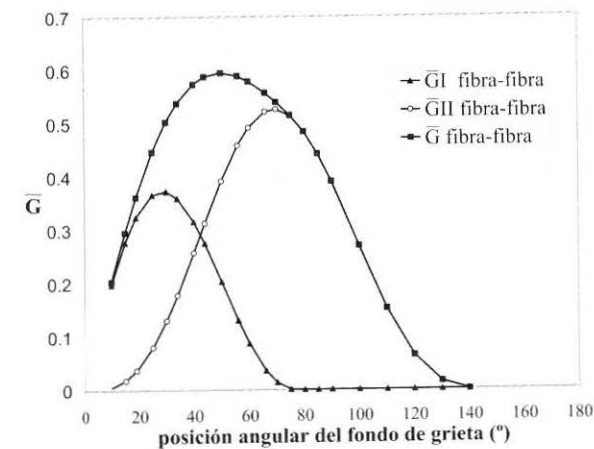


Fig. 6. Representación de las componentes de la energía liberada frente a la posición de grieta en la interfase.

6.- CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio detallado del estado tensional en el entorno de una grieta transversal entre fibra y matriz en materiales compuestos reforzados con fibra continua. El estudio ha clarificado la naturaleza de la zona de contacto que aparece entre la fibra y la matriz y que puede ser responsable del tipo de fallo (modo I, II o mixto) que puede aparecer.

Cuando el despegue entre fibra y matriz es pequeño la zona de contacto no es detectable y es debida al efecto Comninou originado por las tensiones normales perpendiculares al fondo de grieta, la cual se propagaría en modo mixto con dominancia del modo I.

Cuando el despegue entre fibra y matriz alcanza valores para los cuales la zona de contacto es ya detectable, la aparición de ésta se debe inicialmente al efecto Comninou originado por las tensiones tangenciales al fondo de la grieta, para incorporarse, a medida que el despegue es mayor, el efecto de la orientación del fondo de grieta con respecto a la carga. La grieta se propagaría en modo II una vez que la zona de contacto aparece. En este caso podría ya hablarse con seguridad de un crecimiento estable de la fisura. Esto ocurre aproximadamente para valores del despegue del orden de los 60 grados.

El análisis del carácter tensional de las tensiones en el entorno del fondo de grieta para el caso de materiales similares y disimilares ha validado la corrección de la Modelización realizada. Esta validación es imprescindible para el uso fiable de este modelo en el estudio de la razonabilidad de los criterios de fallo que se utilizan en materiales compuestos para predecir el fallo de la matriz ante carga transversal, París et al⁷.

7.- REFERENCIAS

1. París F. (2001), On failure criteria of fibrous composites materials. NASA/CR-2001-210661.
2. 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.
3. Varna J., París F., Del Caño J.C. (1997), The effect of crack-face contact on fiber/matrix debonding in transverse tensile loading. *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 523-532.
4. Comninou M. (1977), The interface crack. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 44, pp. 631-636.
5. Comninou M. (1988), The interface crack under combined loading. *Transactions of the ASME*, Vol. 55, pp. 580-586.
6. Toya M. (1975), A crack along the interface of a circular inclusion embedded in an infinite solid. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 22, pp. 325-348.
7. París F., Correa E., Contreras J. (2001), Rotura de la matriz en materiales compuestos fibrosos. Efecto de las cargas paralelas al plano de rotura. Aceptado para publicación. MATCOMP'01. IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Gijón.