

RESUMEN DE LA TESIS

Título: Formulación e implementación del Método de los Elementos de Contorno para problemas axisimétricos con contacto. Aplicación a la caracterización de la interfase fibra matriz en Materiales Compuestos

Autor: Enrique Graciani Díaz

Directores: Dr. Federico París Carballo

Dr. Vladislav Mantič Leščišin

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

La Tesis Doctoral presentada se ha llevado a cabo en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Sevilla y en el Grupo de Polímeros del Departamento de Materiales de la Universidad Tecnológica de Luleå, Suecia, donde se realizaron dos estancias de 12 semanas cada una (29.09.1996-21.12.1996 y 04.08.1997-26.10.1997), siendo los investigadores responsables del grupo en aquel momento el Dr. Lars Berglund y el Dr. Janis Varna.

Origen

El Trabajo que se recoge en la presente Tesis Doctoral entronca con dos de las líneas de investigación de dicho Grupo: por un lado, el desarrollo del Método de los Elementos de Contorno como herramienta numérica para modelar el Problema Elástico y, por otro, el estudio de las propiedades mecánicas y de resistencia de los Materiales Compuestos para profundizar en el conocimiento del comportamiento de los mismos y, sobre todo, desarrollar criterios de fallo específicos para los diferentes mecanismos de rotura que presentan.

La motivación inicial de la que surge el presente estudio fue desarrollar una herramienta numérica capaz de modelar una serie de ensayos que se emplean en la caracterización de la interfase entre la fibra y la matriz en materiales compuestos, tales como: el ensayo de extracción de fibras (pull-out), el ensayo de empuje de fibras (push-out) y el ensayo de fragmentación de fibra única (single fiber fragmentation test). En

todos estos ensayos, la probeta consta de una única fibra rodeada de matriz y, dadas las cargas aplicadas, el problema presenta simetría axial respecto al eje de la misma.

Dado que en todos estos ensayos se pretende medir la tenacidad a fractura de la interfase entre la fibra y la matriz gracias a que en ellos se produce la propagación estable de una grieta de despegue entre la fibra y la matriz, la cual está cerrada en la mayoría de los casos, el código a desarrollar debía de ser capaz de tratar problemas con múltiples sólidos, de contemplar la posibilidad del contacto entre los mismos y de tener en cuenta el efecto de la fricción en las zonas de contacto. Todo ello, además, con precisión suficiente como para poder llevar a cabo un estudio de las tensiones singulares que aparecen en el entorno del vértice de las grietas de despegue y permitiendo el empleo de discretizaciones no conformes en las zonas de contacto.

Objetivos

Con anterioridad al comienzo de este trabajo, en el citado Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales se habían desarrollado otras Tesis y Proyectos de Fin de Carrera con motivaciones similares a las descritas anteriormente, es decir, el desarrollo de un código, basado en el Método de los Elementos de Contorno, que permitiera el análisis numérico de ensayos de caracterización de materiales compuestos.

Como resultado de dichos trabajos, estaban disponibles una serie de códigos, desarrollados para problemas de tensión o deformación plana, que cubrían casi todos los aspectos citados. No obstante, con el objeto de reducir al máximo el tiempo de solución y la capacidad de almacenamiento de datos necesarios para realizar los modelos, estos códigos habían sido programados de forma específica para el estudio de los problemas que los motivaron, siendo muy compleja su modificación para el análisis de problemas diferentes de éstos.

Por consiguiente, los objetivos que se fijaron al comienzo de la Tesis Doctoral fueron los que se resumen en los siguientes puntos:

- Desarrollar un código informático, basado en el Método de los Elementos de Contorno para el análisis de problemas de contacto elástico con fricción entre sólidos que presentan simetría axial, permitiendo el empleo de discretizaciones no conformes en la zona de contacto.

- Aplicar dicho código al análisis de problemas de contacto y problemas con grietas de solución conocida para verificar la exactitud de los resultados obtenidos.
- Emplear el código para el análisis del ensayo de fragmentación de fibra única.
- Realizar la programación del código de manera que fuera sencilla la integración en el mismo de los códigos basados en el MEC desarrollados previamente en el Grupo y sirviese de base para el desarrollo de futuras aplicaciones.

Haciendo un breve resumen del trabajo realizado, puede decirse que se ha desarrollado el código que implementa el Método de los Elementos de Contorno en problemas de contacto con fricción en sólidos con simetría axial, demostrando una excelente precisión en la resolución de problemas de contacto y problemas con grietas, incluso cuando se emplean discretizaciones no conformes. Dicho código ha sido aplicado con éxito en el análisis del ensayo de fragmentación de fibra única.

En el estudio del ensayo de fragmentación de fibra única se han analizado tres situaciones diferentes, primero el caso en que no apareciese despegue en la fibra y, posteriormente, se ha evaluado la influencia que tiene la aparición de dicho despegue en la solución elástica del ensayo con dos enfoques diferentes: despreciando en primer lugar el efecto de la fricción entre las caras de la grieta de despegue y, en última instancia, considerando dicho efecto.

Desarrollo

El contenido de la Tesis Doctoral presentada se puede agrupar en los tres bloques que se describen en las siguientes secciones:

Formulación del problema y programación del código

En este bloque, que comprende desde el capítulo 2 hasta el capítulo 8 y los apéndices A, B y C, se desarrolla la formulación e implementación de las ecuaciones que permiten resolver el problema de contacto elástico con simetría axial mediante el Método de los Elementos de Contorno.

Sin entrar en detalles, cabe destacar, que el algoritmo desarrollado permite la solución de problemas de contacto elástico entre un número indeterminado de sólidos, incluyendo, entre otros aspectos, la posibilidad de definir sólidos múltiplemente conexos (es decir, con agujeros, o inclusiones). Además, permite también considerar un

calentamiento uniforme del sólido para tener en cuenta el efecto de las tensiones y deformaciones residuales creadas durante el enfriamiento del proceso de curado.

Los problemas de contacto, especialmente si se considera el efecto de la fricción entre las caras, tienen un carácter intrínsecamente no-lineal. Esto es debido a que el tamaño de la zona de contacto y las subzonas en que ésta se divide (adhesión y deslizamiento) son desconocidas a priori y, en general, pueden depender de la carga que se aplique. Por consiguiente, se ha desarrollado un algoritmo de solución incremental, en el cual, la carga se va aplicando progresivamente y se calcula, en cada incremento, la situación de la zona de contacto, hasta alcanzar la solución final.

Ejemplos de validación

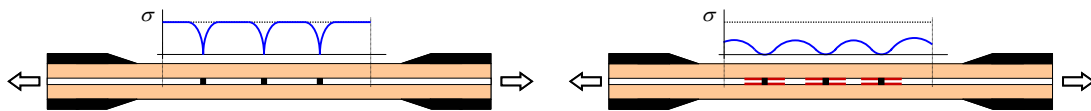
En este bloque, que comprende desde el capítulo 9 hasta el capítulo 11, se ha realizado el estudio de una batería de ejemplos de validación, con el objeto de contrastar que la solución ofrecida por el código de Elementos de Contorno desarrollada es suficientemente precisa para llevar a cabo los análisis que se pretenden. Con estos ejemplos se ha procurado chequear todas las características que aparecen en el análisis de un ensayo micromecánico de materiales compuestos, es decir: contacto entre sólidos de distintas propiedades, presencia de grietas en la fibra o la matriz y presencia de grietas en la interfase. Todo ello, además con la presencia de tensiones residuales debidas al proceso de curado.

Entre otros aspectos, en este bloque se muestran con detalle el cálculo de: los tamaños de la zona de contacto en diversos problemas (con y sin fricción), la evolución de las tensiones de contacto (incluyendo casos con comportamiento singular), la solución elástica (tensiones, factor de intensificación de tensiones e índice de liberación de energía) en el entorno de diversas fisuras en sólidos homogéneos en modo I, modo mixto y modo II (incluyendo el efecto de la fricción) y la solución elástica en el entorno de diversas fisuras en la interfase entre dos materiales (empleando el modelo abierto y el modelo de contacto). Los resultados obtenidos con el código desarrollado en el análisis de los ejemplos de validación poseen una excelente precisión en todos los casos.

Análisis del ensayo de fragmentación

En este bloque, constituido por el capítulo 12, se describe el ensayo de fragmentación de fibra única y se presentan los resultados obtenidos en el análisis numérico del mismo, realizado con el código de Elementos de Contorno desarrollado.

En primer lugar, se realiza una descripción del ensayo, tanto de su realización, como de los diferentes enfoques que se emplean para el análisis de los resultados. En pocas palabras, el ensayo consiste en una probeta de una única fibra, rodeada de matriz y cargada en la dirección de la fibra. Tal como se muestra en la figura inferior (izquierda), dado que la matriz admite mayor deformación que la fibra, al alcanzar un determinado nivel de carga, esta última empieza a fragmentarse. Cuanto más pequeños son los fragmentos mayor es su resistencia, por lo cual, si el ensayo se produce de forma correcta, aparecen grietas que nacen de los puntos de rotura de la fibra y crecen por la interfase como se muestra en la figura inferior (derecha).



Esquema del ensayo de fragmentación de fibra única

El enfoque seguido en la Tesis pretende caracterizar la tenacidad a fractura mediante el análisis de la propagación de dichas grietas de despegue. Para ello, es preciso conocer el estado tensional en entorno del vértice de las mismas. Dado que las dimensiones de las grietas son del orden del diámetro de la fibra, la realización de medidas fiables es prácticamente imposible, con lo cual, el análisis elástico se lleva a cabo mediante una simulación numérica.

La simulación numérica del ensayo, se divide en dos etapas. En la primera se estudia el proceso de fragmentación de la fibra, para determinar el tamaño mínimo de los fragmentos que es posible encontrar durante el ensayo. Posteriormente, se realiza un análisis de las grietas de despegue. De los análisis realizados se concluye, que dado que la fibra es muy larga en comparación con su diámetro, pese a hallarse fragmentada, los fragmentos son lo suficientemente largos como para que no exista interacción entre las grietas de los dos extremos de cada fragmento, con lo cual, el comportamiento de todas las grietas de despegue es análogo, y, por tanto, basta con modelar el comportamiento de un fragmento, lo cual simplifica notablemente el análisis.

Dado que el estudio de este ensayo era el objetivo final de la Tesis Doctoral, los resultados obtenidos en este análisis se expondrán más adelante, con mayor detalle, en la sección de resultados.

Conclusiones

El resultado más inmediato que se ha obtenido del presente trabajo es el código informático CBEM que implementa el Método de los Elementos de Contorno con una formulación débil del problema de contacto elástico, tanto entre sólidos con simetría axial y comportamiento isótropo, como en elasticidad plana con comportamiento isótropo y ortótropo. Se ha verificado además que la herramienta numérica desarrollada es adecuada para el análisis de los problemas que motivaron su creación, es decir, para el modelo numérico de los ensayos micromecánicos de caracterización de la tenacidad a fractura de la interfase entre fibra y matriz en materiales compuestos.

De los resultados obtenidos en el análisis de fragmentación (que se comentarán más adelante con mayor profundidad) se deduce que, como era obvio, la presencia de la grieta de despegue en la interfase disminuye la capacidad de transmitir carga a la fibra, siendo de esperar que la longitud media de los fragmentos al final del ensayo sea tanto mayor cuanto menor sea la tenacidad a fractura de la interfase. Del análisis del problema se ha comprobado que la fricción no es un factor que influya de manera importante en el tamaño de la zona de transferencia de carga entre la fibra y la matriz, especialmente cuando las grietas de despegue comienzan su propagación, con lo cual, aunque las tensiones axiales en la fibra son cualitativamente diferentes en ambos casos, estas diferencias son poco significativas en la zona que está expuesta a nuevas roturas, lo cual conlleva que el coeficiente de la fricción en la interfase no debe tener una influencia significativa en el tamaño final de los fragmentos obtenidos.

Por último, respecto al objetivo final del ensayo, es decir, el cálculo de la tenacidad a fractura de la interfase, se han obtenido una serie de curvas que relacionan la longitud de las grietas de despegue con la deformación aplicada a la probeta, en función de la tenacidad a fractura de la interfase. Mediante un ajuste de estas curvas con los resultados experimentales sería posible estimar el valor de la tenacidad buscada.

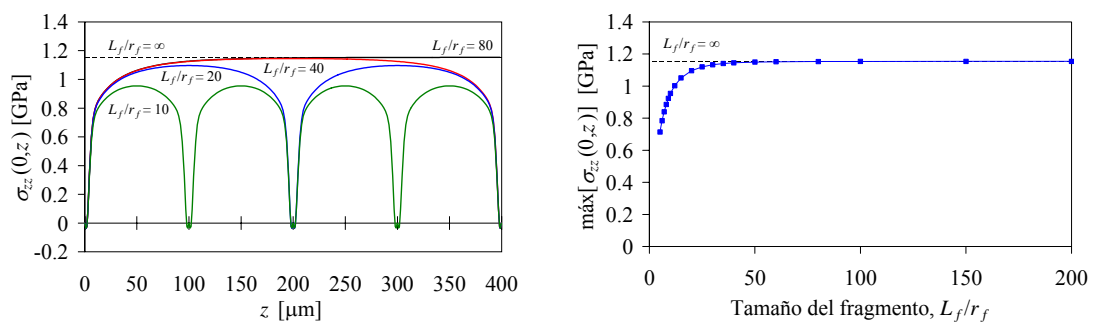
No obstante, dado que estas curvas se han obtenido despreciando el efecto de la fricción en la zona despegada no se espera que los resultados de un ajuste de este tipo sean cuantitativamente muy fiables, dado que, tal como ponen de manifiesto los resultados presentados, es probable que la fricción sí juegue un papel importante en la propagación de las grietas de despegue.

RESULTADOS

Como se ha comentado anteriormente, dado que el estudio del ensayo de fragmentación era el objetivo final de la Tesis Doctoral, dejando de lado los aspectos de desarrollo y validación del código, se va a centrar este apartado en comentar con mayor detalle los resultados obtenidos en el modelo numérico del ensayo de fragmentación.

El primer paso del análisis del ensayo de fragmentación de fibra única corresponde al estudio del estado tensional que existe en la probeta tras producirse la fragmentación en la fibra. Para estudiar la tensión axial en la fibra durante el proceso de fragmentación previo a la aparición de las grietas de despegue, se ha resuelto una serie de casos, en los cuales se ha variado únicamente el parámetro L_f , que define la longitud de los fragmentos, en el rango $5 \leq L_f / r_f \leq 200$, siendo $r_f = 5 \mu\text{m}$ el radio de la fibra. Para mostrar los resultados se ha tomado como referencia una deformación aplicada a la probeta de valor nominal $\varepsilon_\infty = 2\%$.

Como se observa en la figura inferior izquierda, al dividir sucesivamente los fragmentos ($L_f / r_f = 80, 40, 20, 10$), en las zonas que rodean cada rotura, la tensión cae a cero y, por tanto, cada vez será más difícil que se produzca una nueva rotura. Esto se pone claramente de manifiesto en la figura inferior derecha, en la cual se observa como la tensión máxima que se alcanza en el fragmento es prácticamente uniforme cuando los fragmentos son largos, hasta que decae rápidamente en torno a $L_f = 40 r_f$. Por tanto, no se espera que puedan obtenerse fragmentos de longitud inferior a este tamaño.



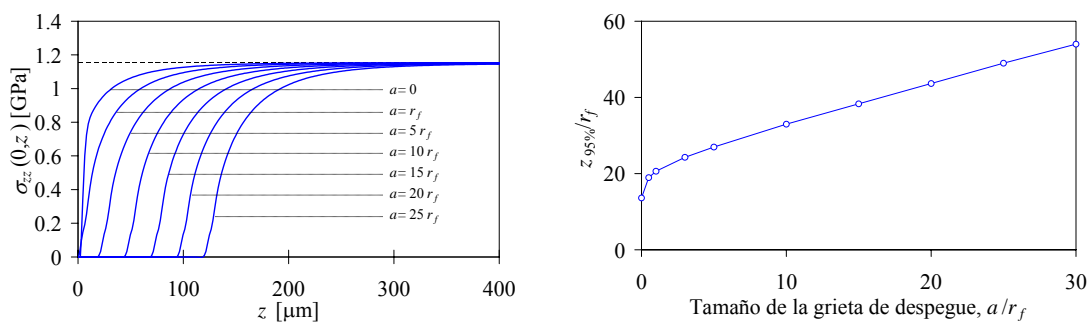
Efecto de la fragmentación sucesiva de la fibra en la tensión axial en la misma.

Una vez determinado el tamaño mínimo de los fragmentos esperados, se analiza el crecimiento de las grietas de despegue, centrándonos en dos aspectos fundamentales,

la propagación de la misma y el efecto que tiene dicha propagación sobre las tensiones en la fibra y, por tanto, sobre la continuación del proceso de fragmentación. Para estudiar la propagación del despegue se calcula el índice de liberación de energía, G_{II} , durante el crecimiento y se emplea un criterio del tipo $G_{II} = G_C$, siendo G_C la tenacidad a fractura de la interfase que se pretende determinar.

Para ver la influencia que tiene la presencia de una grieta de despegue que crece a lo largo de la interfase en la transferencia de carga a la fibra se ha analizado una serie de casos, en los cuales se ha mantenido constante la longitud del fragmento, $L_f = 100 r_f$, y se ha aumentado progresivamente el tamaño de la grieta de despegue (a) en el intervalo $0 < a \leq 25 r_f$. Como referencia, se ha considerado nuevamente una deformación aplicada a la probeta de valor $\varepsilon_\infty = 2\%$ y se ha despreciado inicialmente el efecto de la fricción.

Como se observa en la figura inferior izquierda, al aumentar el tamaño de la grieta de despegue, la zona en que la tensión de la fibra cae a cero aumenta y, por tanto, cada vez será más difícil que se produzca una nueva rotura. En la figura inferior derecha se muestra claramente como el tamaño de la zona de transferencia (definido como la longitud necesaria para recuperar un 95% de la tensión que provocó la rotura) aumenta con la longitud de la grieta de despegue, rápidamente al principio y de forma aproximadamente lineal para grietas de tamaño $a > 5 r_f$.

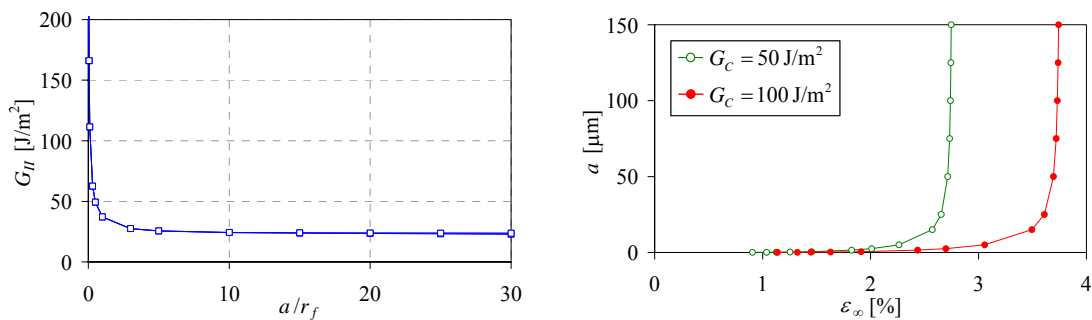


Efecto del crecimiento de la grieta de despegue sobre la tensión axial en la fibra.

Para estudiar la propagación de la grieta de despegue, se ha evaluado el índice de liberación de energía para una serie de configuraciones caracterizadas por tres tamaños diferentes de fragmento ($L_f / r_f = 50, 100, 200$), variando en cada uno de ellos la

longitud de la grieta en el intervalo $0.01 < a \leq 30 r_f$. Dado que la grieta está cerrada en toda su longitud, la propagación se hace en modo II puro. Una vez calculado G_{II} , teniendo en cuenta las tensiones residuales debidas al curado y considerando despreciable el efecto de la fricción entre las caras de la grieta, se ha empleado un criterio de propagación del tipo $G_{II} = G_C$ para calcular la deformación necesaria para que se produzca la propagación de cada una de las grietas analizadas, con lo cual se han obtenido curvas de crecimiento de grieta en función de unos valores supuestos de G_C .

En la figura inferior izquierda se muestra el comportamiento de G_{II} frente al tamaño de la grieta empleando una deformación $\varepsilon_\infty = 2\%$. Puede observarse, en primer lugar, que el índice de liberación de energía no depende del tamaño del fragmento ya que los resultados obtenidos para las tres longitudes analizadas son imposibles de distinguir en las gráficas. Si analizamos el comportamiento de G_{II} en función del tamaño de la grieta de despegue, se observa que el despegue aparece inmediatamente tras la aparición de la grieta en la fibra ($G_{II} \rightarrow \infty$ cuando $a \rightarrow 0$), crecen lentamente al principio (G_{II} decrece bruscamente) y rápidamente después, (G_{II} se vuelve constante). Esto se observa claramente en la figura inferior derecha en la que se muestra la propagación de la grieta de despegue para dos valores supuestos de G_C .



Análisis de la propagación de la grieta de despegue.

Mediante un ajuste de estas curvas con los resultados experimentales sería posible estimar el valor de la tenacidad buscada.

ORIGINALIDAD

La originalidad del análisis realizado puede resumirse en tres aspectos fundamentales: la herramienta desarrollada, los problemas de validación y el enfoque empleado en el análisis del ensayo de fragmentación.

En primer lugar, en cuanto a la herramienta numérica desarrollada, que permite la solución de problemas de contacto elástico entre sólidos con simetría axial mediante el Método de los Elementos de Contorno, se pueden destacar los siguientes aspectos novedosos incluidos en el código:

- Cálculo analítico del término libre de la EIC de los desplazamientos, siendo desarrollada por primera vez en esta Tesis una expresión analítica del mismo para puntos de colocación situados en el eje de simetría.
- Integración analítica de los términos singulares de la Ecuación Integral de Contorno de los desplazamientos con elementos lineales continuos. Se ha efectuado un desarrollo en serie finita que permite expresar analíticamente el comportamiento singular de las componentes de los núcleos integrales de la Ecuación Integral de Contorno de los desplazamientos correspondientes a la solución fundamental. Con la ayuda de dicho desarrollo en serie se han obtenido también expresiones analíticas de las constantes de integración correspondientes a dichos términos.
- Formulación débil de las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad en las interfases y zonas de contacto que permite el empleo de discretizaciones no conformes, siendo la primera vez que se aplica para el caso de contacto entre sólidos con simetría axial.

En los ejemplos de validación que se han llevado a cabo para verificar la precisión de los resultados obtenidos con el código de Elementos de Contorno desarrollado, también se han obtenido algunos resultados destacables por su originalidad, en general, relacionados con el análisis del efecto de la fricción en distintos problemas.

En primer lugar, analizando el efecto de la fricción en grietas cerradas (es decir en modo II puro) en el interior de sólidos homogéneos, se ha estudiado el problema de una grieta axisimétrica inclinada en el interior de un tubo sometido a compresión axial. En dicho problema se ha mostrado, por una parte, que cuando el tamaño de grieta es muy pequeño respecto al espesor del tubo, la solución del problema (para cualquier

coeficiente de fricción) es idéntica a la que corresponde a una grieta análoga en deformación plana que crece en el interior de un sólido infinito sometida a un campo lejano de tensiones constantes de compresión y cortadura. Por otra parte, se ha mostrado por primera vez el comportamiento del factor de intensificación de tensiones en función del tamaño de la grieta y el coeficiente de fricción.

En el análisis del efecto de la fricción en grietas de interfase se ha estudiado el problema de una grieta circular en la interfase entre dos semiespacios sometida a tracción. Este problema es ciertamente importante debido a que, localmente, cualquier grieta que surja en el interior de la interfase entre dos sólidos, en su etapa inicial, debe comportarse de forma análoga a la grieta analizada.

En este problema, se ha mostrado el comportamiento de la solución elástica en el entorno del vértice de la fisura, la cual, salvo por el orden de singularidad, no se ha encontrado publicada con anterioridad. En particular, se ha hecho un análisis del tamaño de la zona de cierre de grieta en el entorno del vértice de la fisura, encontrándose que el aumento la misma debido a la presencia de la fricción es idéntico para cualquier pareja de materiales empleados.

Por último, la principal originalidad de la Tesis Doctoral desarrollada está en el enfoque empleado en el análisis del ensayo de fragmentación para caracterizar la interfase entre fibra y matriz en materiales compuestos.

Como hemos dicho, en el ensayo de fragmentación, se produce en primer lugar una serie de roturas en la fibra, seguidas, en general, del fallo de la interfase. En los análisis clásicos, se intenta cuantificar la *resistencia de la interfase*, considerando el ensayo como una competición entre la rotura de los fragmentos de fibra y la interfase fibra-matriz. Dado que la resistencia de los fragmentos es conocida *a priori* y es mayor cuanto menor son los fragmentos, el hecho de que se produzca el despegue entre fibra y matriz se considera una consecuencia de que se ha alcanzado un tamaño de fragmento suficientemente pequeño como para que la resistencia de los mismos se igual a la *resistencia de la interfase*.

Este enfoque, que desde el punto de vista cuantitativo puede ser aceptable, en el sentido de caracterizar de forma sencilla una interfase como ‘buena’ o ‘mala’, tiene una serie de desventajas. La fundamental es que al ser el estado tensional en la interfase bastante complejo, la definición de *resistencia de la interfase* está claramente ligada al

ensayo y los resultados son de discutible extrapolación al comportamiento de dicha interfase ante estados diferentes de carga.

En la Tesis Doctoral presentada se ha empleado un enfoque alternativo, más moderno, basado en la Mecánica de la Fractura, con el cual se pretende obtener como resultado del análisis la *tenacidad a fractura de la interfase*.

La principal dificultad de este enfoque estriba en que es preciso un conocimiento de la solución elástica en el entorno del vértice de la grieta de despegue, para poder llevar a cabo el cálculo de la energía liberada en el crecimiento de la grieta. Por ello, en general, se han empleado soluciones semi-analíticas obtenidas a partir de hipótesis simplificativas.

En la Tesis Doctoral presentada se salvado esta dificultad desarrollando un código de análisis numérico, basado en el Método de los Elementos de Contorno que permite realizar una simulación del problema, obteniéndose soluciones muy precisas del estado tensional en toda la probeta y, en concreto, en el entorno del vértice de la fisura.

Finalmente, los resultados de la Tesis Doctoral muestran que la fricción debe jugar un papel importante en el crecimiento de las grietas de interfase, lo cual, desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura plantea un serio problema, ya que al existir una disipación no lineal asociada a la fricción durante el crecimiento de la grieta no es fácil determinar qué parte de la energía disipada es producto de la fricción y cual corresponde al crecimiento de la grieta.

Si embargo, la herramienta desarrollada ofrece una solución prometedora a este problema ya que permite integrar en la misma de forma natural (es decir, empleando las mismas incógnitas y el mismo proceso de solución) elementos cohesivos que permitan modelar el crecimiento de las grietas de despegue incluyendo el efecto de la disipación debida a la fricción.

APLICABILIDAD

Los objetivos que se pretenden cubrir con el código de Elementos de Contorno desarrollado superan con mucho los objetivos del trabajo descrito en la Tesis Doctoral presentada y, de hecho, en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla se está empleando en numerosos análisis micromecánicos sobre el comportamiento de los Materiales Compuestos de distinta naturaleza.

Cabe destacar que, además de la formulación del Problema Elástico de contacto entre sólidos con simetría axial, se han implementado en el código de Elementos de Contorno, bien por el doctorando o en colaboración con otros investigadores, la formulación del Problema de Potencial en dos dimensiones para su aplicación en análisis de contacto térmico (con materiales homogéneos y graduados funcionalmente, con comportamiento isótropo y anisótropo), la formulación del Problema Elástico Plano para su aplicación en análisis de contacto elástico (con materiales homogéneos con comportamiento isótropo, ortótropo y anisótropo), y la formulación del Problema Temoelástico Plano para su aplicación en análisis de contacto térmico y elástico acoplados (con materiales homogéneos con comportamiento isótropo).

Es por ello que el código de Elementos de Contorno desarrollado se está empleando en una serie de análisis que han dado lugar (dentro del ámbito de los Materiales Compuestos), entre otras, a las publicaciones en revistas y congresos que se citan a continuación:

- París F, Correa E y Mantič, V. “Kinking of Transversal Interface Cracks Between Fibre and Matrix”. *Journal of Applied Mechanics*, 2007 (en prensa).
- Mantic V, Graciani E, París F, Varna J. “An axisymmetric boundary element analysis of interface cracks” (invited paper). *Advances in Boundary Element Techniques VI*, A.P. Selvadurai, C.L. Tan, M.H. Aliabadi (Eds.), Engineering Conferences Ltd., Eastleigh, 21-26, Montreal (Canada), 27-29 de julio, 2005.
- Barroso A, Toro P, Mantič V, París F y Ortiz J. “Cálculo de los factores de intensificación de tensiones generalizados en uniones adhesivas metal-composite”. *MATCOMP’05*, 627-634. Valencia, 2005.
- Graciani E, Mantič V, París F y Varna J. “A BEM analysis of the Single Fiber Fragmentation test. The influence of curing temperature in crack propagation”.

Proceedings of the 11th European Conference on Composite Materials (CD, archivo A030.pdf). Rodas (Grecia), 2004.

- Barroso A, Mantič V y París F. “Evaluation of generalized stress intensity factors in anisotropic elastic multimaterial corners”. Proceedings of the 11th European Conference on Composite Materials (CD, archivo A032.pdf). Rodas (Grecia), 2004.
- Núñez JP, Mantič V, París F y Berger J. “Boundary element analysis of heat transfer in anisotropic functionally graded materials”. ICCES 2004, Advances in Computational & Experimental Engineering & Sciences (CD), A. Tadeu, S.N. Atluri (Eds.), Madeira (Portugal), 26-29 de julio, 2004.
- Graciani E, Mantič V, París F, Varna J. “Single fiber fragmentation test. A BEM analysis”. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, v 2, 988-997, 2003.
- París F, Correa E, Mantic V. “Micromechanical bases for the prediction of failure of the matrix in fibrous composites”. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, v 6, 4141-4151, 2003.
- Graciani E, Mantič V, París F y Varna J. “Análisis del ensayo de fragmentación mediante el método de los elementos de contorno”. Materiales Compuestos 03 (Actas del V Congreso Nacional de Materiales Compuestos), Editores A Miravete y J Cuartero, 295-303, Zaragoza, España (1-3 de julio), 2003.
- Núñez JP, Muñoz D, Mantič V y París F. “A weak application of transmission conditions in 2D BEM with non-conforming meshes for isotropic and anisotropic potential problems”. Advances in Boundary Element Techniques IV, R. Gallego, M.H. Aliabadi (Eds.), Granada, 15-17 de julio, 2003.
- Núñez JP, Mantič V, París F y Berger J. “Boundary element analysis of heat transfer at an interface crack in an FGM coating”. Composites for the Future, 10th European Conference on Composite Materials (CD), Brujas (Bélgica), 3-7 de junio, 2002.
- Núñez JP, Mantič V, París F y Berger J. “Análisis del flujo de calor en materiales graduados funcionalmente en contacto mediante el método de los elementos de contorno”. Materiales Compuestos 01, A. Fdez. Canteli, F.J. Belzunce, F., 249-256, Gijón, 21-23 de noviembre, 2001.
- Barroso, A., Mantič, V. y París, F. “Failure of adhesively bonded lap joints between composites and metals based on singularity parameters”, Composites Science and Technology, (enviado para su publicación).

- Correa E, Mantič, V. y París, F. “Characterization of the Fibre-Matrix Interface Crack Growth in Composites under Transverse Compression. A BEM Analysis”. *Engineering Fracture Mechanics* (enviado para su publicación).
- Correa E, Mantič, V. y París, F. “A Micromechanical View of Inter-Fibre Failure of Composite Materials under Compression Transverse to the Fibres”. *Composites Science and Technology* (enviado para su publicación).

Asimismo, el código de Elementos de Contorno desarrollado se ha empleado como base de los análisis elásticos en los siguientes proyectos nacionales e internacionales en el campo de los Materiales Compuestos:

- Inverse heat conduction problems in thermal barrier coatings. Organismo: The Royal Society, Is/ESEP/JP. Programa: Joint Project Grant. Investigador Principal: Derek Ingham. Entidades colaboradoras: Department of Applied Mathematics, University of Leeds (Reino Unido), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Duración: 2002-04
- Behaviour of interface cracks under transient thermal and mechanical loading in dissimilar anisotropic materials. Organismo: Comisión de Intercambio Cultural, Educativo y Científico entre España y EE.UU. (Comisión Fulbright), 99271. Programa: Proyecto de Investigación Conjunto. Investigador Principal: Federico París Carballo. Entidades colaboradoras: Colorado School of Mines, Golden (EE.UU.), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Duración: 1999-01.
- El test de fragmentación. Estudio numérico y experimental. Organismo: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), MAT 95-1671-E. Programa: Acciones Especiales del Programa Nacional de Materiales. Investigador Principal: José Cañas Delgado. Duración: 1995-96.

Por último, los doctorandos del Grupo, Alberto Barroso Caro y Elena Correa Montoto han empleado el código de Elementos de Contorno desarrollado para el análisis de determinados aspectos de los problemas objetos de sus Tesis Doctorales:

- Barroso, A. "Caracterización de estados singulares de tensión en esquinas multimateriales. Aplicación a uniones adhesivas con materiales compuestos". Tesis Doctoral (presentada para su defensa el 18/05/2007).
- Correa, E. “Estudio micromecánico del fallo de la matriz en materiales compuestos fibrosos” . Tesis Doctoral (en preparación).