

MODELADO DEL CRECIMIENTO DE UNA GRIETA EN MODO I A LO LARGO DE UNA INTERFAZ DÉBIL MEDIANTE EL MEC. APLICACIÓN AL ENSAYO DE FRACTURA INTERLAMINAR DE MATERIALES COMPUESTOS

L. Távora, V. Mantič, E. Graciani, J. Cañas, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros,
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n - 41092 Sevilla, España
E-mail: ltavara@esi.us.es, mantic@esi.us.es, graciani@esi.us.es, canas@esi.us.es, paris@esi.us.es

RESUMEN

Se presenta un estudio numérico de propagación de daño en laminados de materiales compuestos. En particular se estudia el ensayo de tenacidad a fractura interlaminar (G_{Ic}) de dos láminas unidireccionales de fibra de carbono unidas por una capa de adhesivo. El ensayo se desarrolla con control en desplazamientos para asegurar una propagación estable de la grieta. En el código del Método de los Elementos de Contorno (MEC) 2D el adhesivo se modela como una interfaz débil mediante una distribución continua de muelles con una ley de comportamiento lineal-frágil que representa razonablemente el comportamiento del adhesivo real. Uno de los aspectos importantes a destacar en el mencionado código es que el crecimiento de la grieta es independiente del tamaño de la malla (separación entre muelles). Los resultados obtenidos muestran que las propiedades de la solución numérica local están de acuerdo con las predicciones de la teoría de la interfaz débil. Los diagramas carga-desplazamiento obtenidos mediante el código del MEC se comparan con los obtenidos en los ensayos en el laboratorio.

ABSTRACT

A numerical study of damage propagation in composites laminates is presented. Interlaminar fracture toughness (G_{Ic}) test of two unidirectional carbon fiber laminates joined by an adhesive layer is studied. Displacement control was used in the test to assure stable crack propagation. The adhesive is modeled in a 2D Boundary Element Method (BEM) code as a weak interface using a continuous distribution of springs following an elastic-brittle law which provides a good representation of the actual adhesive behavior. It is important to mention that in the BEM code the crack growth is independent of the mesh size (distance between springs). It is shown that local properties of the numerical solution agree with predictions of the weak interface theory. Load – displacement diagrams obtained from the BEM analysis are compared with the diagrams obtained in the laboratory tests.

PALABRAS CLAVE: Materiales compuestos, Fractura interlaminar, Interfaz débil, MEC.

1. INTRODUCCIÓN

La exitosa aplicación de materiales compuestos reforzados con fibras largas, así como de la unión adhesiva composite – composite, hace necesario el estudio de uniones adhesivas de laminados ante cargas que provocan su separación.

En muchas situaciones prácticas, el comportamiento de uniones adhesivas puede ser descrito modelando la zona de unión como una distribución continua de muelles [1], de rigidez adecuada que siguen una ley de comportamiento elástica lineal - frágil, que simula la presencia del adhesivo, este modelo es llamado “interfaz débil” o “interfaz elástica” [2].

Usualmente los métodos de simulación de propagación de grietas están basados en la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) asumiendo necesariamente la presencia de al menos una grieta e imposibilitando así el estudio de daño previo o de iniciación de grietas que

necesariamente ocurre en la etapa inicial del proceso de fractura. Por el contrario modelos como el Modelo Cohesivo de Fractura (MCF) o el modelo de interfaz débil suponen hipótesis contrarias a las supuestas dentro de la MFEL, esto es, la inexistencia de la singularidad en el campo de tensiones (tensiones no acotadas) en el vértice de la grieta. Estos modelos no sólo permiten estudiar la propagación de grietas sino que a diferencia de la MFEL puede estudiarse también el daño inicial introducido por la formación de grietas así como estimar la carga máxima que puede soportar la estructura y la energía de fractura.

En el presente trabajo el comportamiento de interfaz débil ha sido implementado en el código del MEC desarrollado en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) de la Universidad de Sevilla, que es una herramienta numérica capaz de modelar el problema elástico plano de múltiples sólidos con un comportamiento anisótropo contemplando la posibilidad de contacto entre los mismos, donde ahora además

permite que la zona de contacto tenga un comportamiento que sigue la teoría de interfaz débil. Otra característica del mencionado código es que tanto en la zona de contacto elástico como en la zona de interfaz débil, utiliza una formulación en la cual las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad se establecen de forma débil, que permitiría el uso de discretizaciones no conformes [3, 4, 5].

En la actualidad la evaluación de la calidad de la unión adhesiva (encolado) se realiza mediante el ensayo de fractura interlaminar, donde se calcula la energía de fractura interlaminar crítica (G_{Ic}). Un amplio estudio de este ensayo así como de los diferentes adhesivos utilizados fue realizado en el laboratorio de GERM [6].

El conocimiento del comportamiento de las uniones adhesivas es de vital importancia para la evaluación de la calidad de la unión y la obtención de parámetros que caractericen su comportamiento mecánico ante la fractura, tanto para el diseño como también para el control de calidad del proceso productivo.

Otra aplicación del modelo de interfaz débil y que será objeto de futuros estudios será el modelar una serie de ensayos que se emplean en la caracterización de las propiedades de resistencia de la interfaz entre la fibra y la matriz en materiales compuestos.

2. INTERFAZ DÉBIL

Siguiendo el razonamiento de Lenci [2] la interfaz débil es considerada como la conexión entre las dos superficies que se encuentran unidas por el adhesivo, y la zona dañada consiste en la separación debido a la ruptura de la capa de adhesivo. Los muelles que simulan la capa de adhesivo siguen una ley de comportamiento elástica lineal – frágil de la forma (figura 1):

$$\sigma = k\delta \quad \text{si } \delta < \delta_c, \quad \text{y} \quad \sigma = 0 \quad \text{si } \delta > \delta_c \quad (1)$$

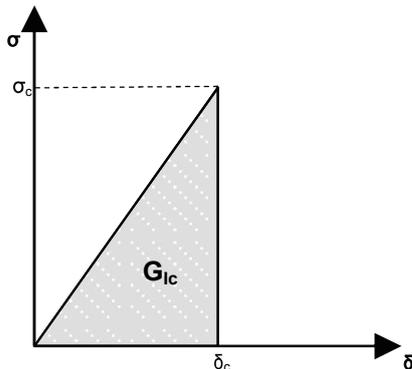


Figura 1. Ley de comportamiento de los muelles.

Donde σ es la tensión normal que actúa en el muelle y δ es el desplazamiento normal relativo de los extremos del muelle, es decir la separación entre las superficies. σ_c y δ_c son la tensión normal y desplazamiento normal relativo críticos que alcanza el muelle al romper.

Según la teoría de interfaz débil las tensiones locales en el área cerca al vértice de la grieta son “suaves” respecto a las tensiones producidas por una interfaz “perfecta”, ya que en una interfaz débil no se encuentran tensiones de tipo singular. Esto conlleva que en la propagación de la grieta a lo largo de la interfaz débil las tensiones se mantengan acotadas [2,7]. Cabe señalar que el comportamiento de las tensiones en la mencionada zona es de la forma:

$$\sigma \cong \sigma_0 + \sigma_1 \xi [ln(\xi) - 1] \quad (2)$$

donde σ_0 y σ_1 son constantes y $x = a\xi$, siendo x la distancia desde el vértice de la grieta hacia el extremo que aún se mantiene unido y a una longitud característica, típicamente la semilongitud o longitud de la grieta.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ DÉBIL EN EL MEC 2D EN MODO I

3.1. Formulación incremental del problema

Para la obtención de la solución del problema se considera que las cargas o desplazamientos prescritos se aplican de forma gradual, afectados por un factor de carga λ , tal que $0 \leq \lambda \leq 1$.

De esta manera, en el comienzo del proceso de solución se define un tamaño inicial de la zona que está unida por el adhesivo, lo cual permite, plantear un sistema de ecuaciones lineales con el cual es posible obtener la solución elástica correspondiente a la definición hecha en la región de unión. Esta solución cumplirá todas las restricciones de la interfaz débil en un rango de valores del factor de carga $0 \leq \lambda \leq \lambda_1$, con $\lambda_1 \geq 0$.

Así, la solución del problema se obtiene como una sucesión de tramos lineales “pasos de carga”. Por tanto la solución del problema se dividirá en un número, indeterminado a priori, M de pasos de carga en los cuales los valores de las variables del problema se comportan linealmente de la forma:

$$\phi(x, \lambda) = \lambda \Delta_m \phi(x) \quad (3)$$

con $\lambda_{m-1} \leq \lambda \leq \lambda_m$ y $m = 1, \dots, M$, donde $\phi(x, \lambda)$ representa el valor que tiene cualquier variable del problema en un punto x una vez aplicada una fracción λ de la carga y $\Delta_m \phi(x)$ representa el valor obtenido para dicha variable de la solución del sistema de ecuaciones lineales correspondiente al m -ésimo paso de carga.

3.2. Ley de comportamiento del muelle en forma incremental.

Como se ha mencionado anteriormente la interfaz débil puede ser caracterizada por la ley de comportamiento $\sigma - \delta$. Dada la capacidad de resolución del código MEC y haciendo un análisis sobre la mencionada ley, se

implementó una ley de comportamiento análoga $\Delta\sigma - \Delta\delta$.

Considerando al adhesivo como un sólido con características lineales elásticas e intentando reproducir su comportamiento mediante una distribución continua de muelles, se asume que la rigidez total de un bloque prismático de adhesivo (K_{adh}) de sección $L.e$ y altura h , como muestra la figura 2(a), sería igual a:

$$K_{adh} = \frac{E_{adh}Le}{h} \quad (4)$$

Donde E_{adh} es el Módulo de Young del adhesivo, L la distancia entre los muelles y e el ancho del bloque, como lo muestra la figura 2.

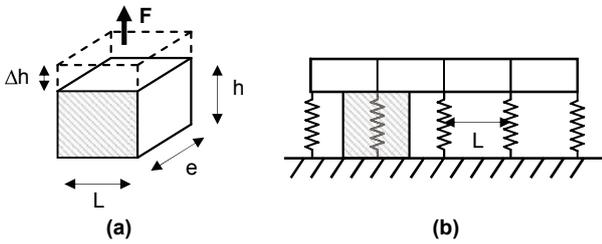


Figura 2. (a) Sección de adhesivo visto como sólido, (b) distribución de muelles en el MEF.

Si se aplica una fuerza F en dirección paralela a la dimensión h el adhesivo se deformará una distancia Δh , según se observa en la figura 2(a). Recordando además que el adhesivo cumple la ley de comportamiento:

$$F = K_{adh} \cdot \Delta h, \quad (5)$$

y

$$F = \sigma Le, \quad (6)$$

entonces,

$$\sigma = \left[\frac{K_{adh}}{Le} \right] \Delta h, \quad (7)$$

$$k = \frac{K_{adh}}{Le} = \frac{E_{adh}}{h}, \quad (8)$$

es decir, k representa una aproximación del Módulo de Young del adhesivo dividido entre h que sería el espesor de la capa de adhesivo. Finalmente escribiendo la ecuación (7) de manera incremental:

$$\Delta\sigma = k\Delta\delta \quad (9)$$

obtenemos la ley de comportamiento de los muelles implementada. Es importante mencionar que para esta relación el área bajo la curva, figura 1, es el valor de G_{Ic} .

Para el caso del Método de los Elementos Finitos (MEF) la ley de comportamiento que presentan los muelles sería la ecuación (5), destacando que si se varía el número de muelles, los parámetros que regulan la ley de comportamiento se verían afectados, no siendo así para el caso del MEC, es decir la ley y sus parámetros se mantiene constantes variando el número de muelles que se incluyen en la zona de la interfaz.

3.3. Condiciones de contorno lineales.

Las condiciones de contorno se definen sobre los nodos de uno de los contornos (llamado contorno A) que se encuentran en la zona de interfaz débil donde será necesario imponer las siguientes condiciones de contorno en todos los nodos presentes en el contorno A correspondiente al m-ésimo paso de carga:

$$\Delta_m t_n^A(x) = k\Delta_m \delta_n, \quad \Delta_m t_s^A(x) = 0 \quad (10)$$

donde, $t_n^A(x)$ son las tensiones normales, δ_n es el desplazamiento relativo en dirección normal al contorno (separación respecto al otro contorno) y $t_s^A(x)$ son las tensiones tangenciales. De esta manera, se cumple que las tensiones normales cumplen la ley de comportamiento descrita en la ecuación (9) y que las tensiones tangenciales son nulas (Modo I).

3.4. Condiciones de contorno no lineales.

Al resolver en cada paso de carga se calcula en cada nodo el λ_m que provoca que se incumpla la relación:

$$\sigma < \sigma_c \quad (11)$$

Por tanto, la solución será válida hasta el menor de los λ calculados anteriormente. En el siguiente paso de carga se resuelve sustituyendo la condición de contorno (10), en el nodo que ha fallado, por la siguiente condición

$$\Delta_{m+1} t_n^A(x) = 0, \quad \Delta_{m+1} t_s^A(x) = 0 \quad (12)$$

este procedimiento se repite cuantas veces sea necesario para alcanzar el equilibrio al haber aplicado toda la carga. No obstante, liberar los nodos uno a uno conlleva que la propagación de la grieta sea suave, en contra de la evidencia experimental que muestra un crecimiento a saltos.

Por tanto se ha determinado el final de cada paso de carga con el instante en que se incumpla la relación (11) en 20 nodos consecutivos.

4. ENSAYO EXPERIMENTAL

4.1. Descripción del ensayo

El ensayo que se utiliza en la industria aeronáutica para evaluar la tenacidad a la fractura interlaminar en

uniones composite-composite se realiza según la normativa AITM 1.0005 [8] y/o I+D-E 290 [9]. El tipo de probeta utilizada es el de doble viga en voladizo, como se muestra en la figura 3.

La probeta DCB se compone de dos laminados unidos por una capa de adhesivo. Los laminados deben ser procesados en concordancia con EN 2565 y las probetas se cortan una vez curado el panel.

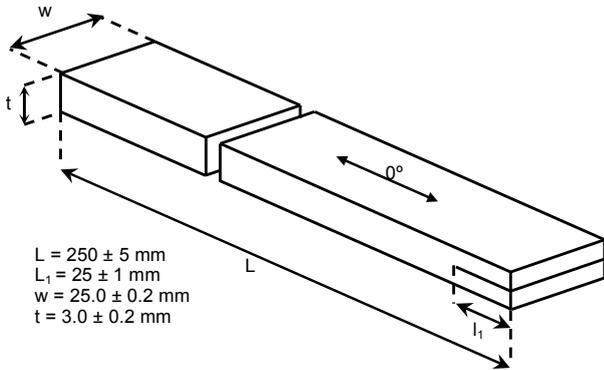


Figura 3. Esquema del dispositivo de la probeta de ensayo.

Para facilitar la sujeción de la probeta a las mordazas de la máquina, se pegan a la probeta unos tacos de dimensiones reducidas y geometría similar a la que se muestra en la figura 4.

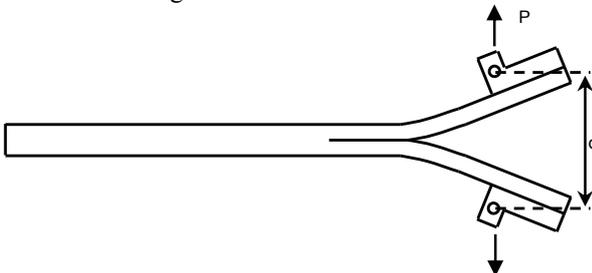


Figura 4. Esquema del dispositivo de ensayo.

Durante la propagación de la grieta, la carga (P) y el desplazamiento (d) de las mordazas de la máquina se registran de forma continua.

Las curvas carga – desplazamiento obtenidas experimentalmente se muestran en la figura 5.

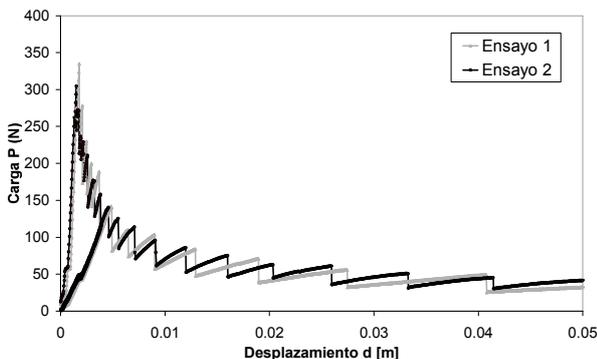


Figura 5. Curvas carga desplazamiento experimentales.

4.2. Tipo de adhesivo

Basándonos en el amplio estudio de resultados experimentales de ensayos de G_{Ic} para distintos adhesivos [6], se observó que los adhesivos FM 300K0.5 y EA 9695 K.05 presentan escalones en la gráfica experimental carga – desplazamiento, este comportamiento podría explicarse por el soporte tipo “knife” de poliéster que presentan dichos adhesivos, como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Adhesivo con soporte de tejido de poliéster.

4.3. Cálculo de k

Dado que no se conocen los parámetros del modelo usado para el adhesivo, estos se ajustan aproximando la curva carga-desplazamiento experimental mediante la numérica. De los resultados experimentales obtenemos valores de G_{Ic} , la energía unitaria liberada, longitud de la grieta, así como las gráficas carga vs desplazamiento.

Con estos datos podemos obtener una primera aproximación del desplazamiento crítico (δ_c) y haciendo uso de la relación (13) podemos encontrar la pendiente k a utilizar. Luego con una comparación entre los resultados numéricos y experimentales estos valores se pueden ajustar todavía mejor.

$$G_{Ic} = \frac{k\delta_c^2}{2} \quad (13)$$

Otros métodos de prueba y error que hacen uso de la energía total liberada y así obtienen el valor de K_{adh} , se presentan en Jiménez [6,10].

Cabe mencionar la concordancia entre los valores de K_{adh} y k según la relación descrita en la ecuación (8), obtenidos en [6] y en el presente trabajo.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para el estudio numérico se realizó un modelo 2D que fue resuelto con el código del MEC citado anteriormente, donde se asumieron las hipótesis de deformación plana y comportamiento elástico lineal de los materiales.

Los laminados eran de compuestos fibra de carbono – epoxy con denominación 8552/AS4 (cinta a 0°) las propiedades ortótropas del compuesto son:

$$\begin{aligned}
 E_x &= 135 \text{ GPa} & E_y &= 10 \text{ GPa} & E_z &= 10 \text{ GPa} \\
 \nu_{xy} &= 0.3 & \nu_{yz} &= 0.4 & \nu_{xz} &= 0.3 \\
 G_{xy} &= 5 \text{ GPa} & G_{xz} &= 5 \text{ GPa} & &
 \end{aligned}$$

El adhesivo empleado es un adhesivo epoxy con soporte y denominación EA 9695 K.05, para la que se dedujeron las siguientes propiedades para los muelles, que describen su comportamiento:

$$\begin{aligned}
 k &= 1.514 \text{ GPa/m} \\
 \sigma_c &= 1.514 \text{ MPa.}
 \end{aligned}$$

Se aplicó progresivamente un desplazamiento total, en las láminas, de valor 25 mm en dirección normal al contorno, a una distancia de 15 mm del extremo donde se encuentra la grieta inicial.

Los resultados de las tensiones normales en la zona donde se encuentran los muelles, producidas en el último paso de carga, se muestran en la figura 7, para el caso en que la capa de adhesivo con una longitud total inicial de 225 mm, se simula con 468 y 936 muelles. En dicha zona se colocan los muelles de manera que un extremo se encuentra en cada nodo del contorno A y en un punto opuesto del contorno B.

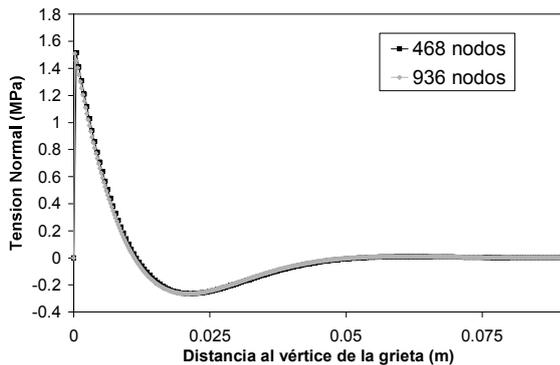


Figura 7. Tensiones normales en torno al vértice de la grieta

Cabe destacar que la solución local de tensiones cerca del vértice de la grieta está de acuerdo con las predicciones de la teoría de interfaz débil [2]. Así lo muestran la figura 8 y la expresión (14), obtenida de la mencionada gráfica aplicando el método de los mínimos cuadrados, donde se representa el valor de σ/σ_c frente a ξ cuando la zona inicial de adhesión tiene 468 muelles.

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = 1.00658 + 3.89711\xi (\ln(\xi) - 1) \quad (14)$$

En la figura 9 se muestra el detalle de la deformada obtenida numéricamente, donde además se puede observar el tamaño de la zona donde actúan los muelles y la zona donde los muelles ya han sido rotos.

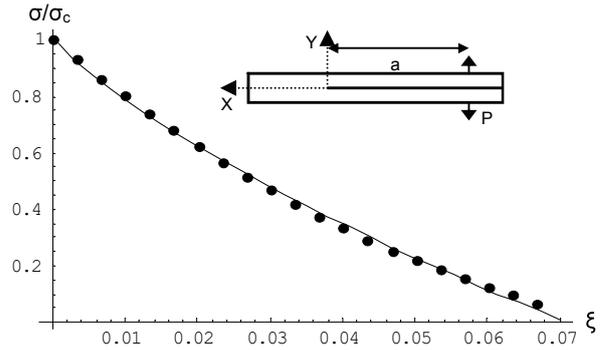


Figura 8. Solución local normalizada de las tensiones y su función de aproximación (ecuación 12)

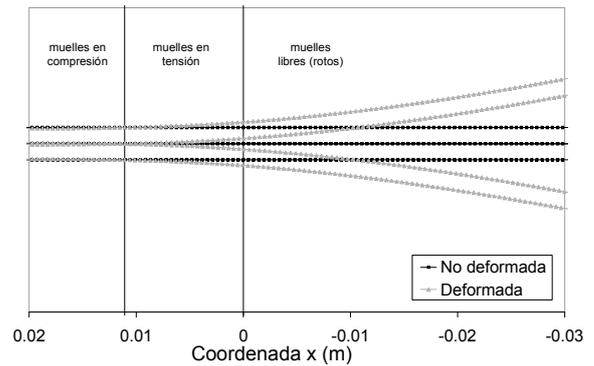


Figura 9. Deformada numérica obtenida

Es interesante además observar la variación de la longitud de la grieta vs. carga aplicada mostrada en la figura 10.

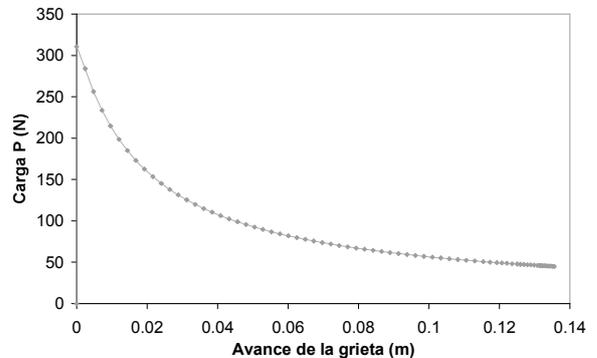


Figura 10. Carga aplicada vs. avance de la grieta

6. COMPARACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE LA CURVA CARGA - DESPLAZAMIENTO

Como se puede observar en la figura 11 los resultados numéricos representan adecuadamente el ensayo experimental por lo que el uso de la teoría de interfaz débil en uniones encoladas de materiales compuestos parece ser una buena solución para representar este problema.

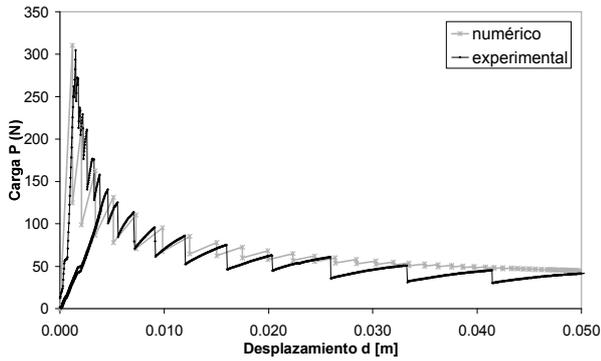


Figura 11. Comparación de las curvas carga – desplazamiento obtenida numéricamente y medida en el laboratorio

7. CONCLUSIONES

Según muestran los resultados numéricos, la teoría de interfaz débil, simulada mediante una distribución continua de muelles, describe adecuadamente el comportamiento de adhesivos usados en uniones encoladas en la industria aeronáutica.

Las soluciones locales de la teoría de interfaz débil han sido comprobadas en el presente trabajo dando énfasis en la no presencia de singularidades en el vértice de la grieta si se trata de una interfaz débil.

La ley de comportamiento de los muelles presentada e incluida en el algoritmo iterativo tiene como ventaja adicional la independencia de las propiedades de los muelles respecto al número de muelles a ser colocados en la interfaz, donde además el área bajo la curva de dicha ley representa directamente el valor de G_{Ic} .

Gracias a los ensayos experimentales y al análisis fractográfico podemos decir que las caídas bruscas en la curva carga-desplazamiento parecen ser causadas por el tejido que soporta la resina.

Se ha demostrado que el comportamiento real de una capa de adhesivo con soporte de tejido de poliéster que une dos láminas unidireccionales se puede reproducir fielmente mediante una distribución de muelles con la ley de comportamiento elástica lineal-frágil junto con el MEC, ajustando adecuadamente los parámetros del modelo discreto (por ejemplo, k , σ_c , y el número de muelles que se pueden partir en un incremento de carga). Este hecho permitirá predecir el comportamiento real de una estructura que incorpora las uniones adhesivas de laminados aplicando el modelo que aquí se ha desarrollado.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden tomarse como punto de partida para hacer un estudio de diferentes tipos de adhesivo y estudiar más a fondo el papel que juega el tipo de soporte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento de este trabajo por los proyectos TRA2005 - 06764 y TRA2006 - 08077 del Ministerio de Educación y Ciencia y los proyectos de excelencia TEP - 1207 y TEP - 02045 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

- [1] Erdogan F., *Fracture Mechanics of interfaces*, In: Damage and Failure of Interfaces, Rossmanith ed., Balkema, Rotterdam, 1997.
- [2] Lenci S., *Analysis of a crack at a weak interface*, International Journal of Fracture, **108**: 275-290, 2001.
- [3] Graciani E., *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*, Tesis Doctoral, 267 pag. ETSI – Universidad de Sevilla, España, 2006.
- [4] Graciani, E., Mantic, V., París, F. y Blázquez, A., *Weak formulation of axi-symmetric frictionless contact problems with boundary elements. Application to interface cracks*, Comput Struct, **83**: 836-855, 2005.
- [5] Blázquez A., París F., Mantič V., *BEM solution of two-dimensional contact problems by weak application of contact conditions with nonconforming discretizations*, International Journal of Solids and Structures, **35**: 3259-3278, 1998.
- [6] Jiménez M. E., *Modelización del ensayo de tenacidad a la fractura interlaminar en materiales compuestos*, Proyecto de Fin de Carrera, 137 pag. ETSI – Universidad de Sevilla, España, 2006.
- [7] Geymonat G., Krasucki F., Lenci S., *Mathematical analysis of a bonded joint with a soft thin adhesive*, Mathematics and Mechanics of Solids, **4**: 201-225, 1999.
- [8] AITM 1-0005, *Determination of interlaminar fracture toughness energy. Mode I. Issue 2*, AIRBUS, 1994.
- [9] I+D-E-290, *Ensayo de tenacidad a la fractura interlaminar sobre estratificados de fibra de carbono*, CASA, 1988.
- [10] Jiménez M. E., Cañas J., Mantič V., Ortiz J. E., *Estudio numérico y experimental del ensayo de tenacidad a fractura interlaminar de uniones adhesivas composite-composite*, MATCOMP '07, Valladolid, 2007.