

ESTUDIO DE LAS TENSIONES ACTUANTES DURANTE EL PROCESO DE SEPARACIÓN FIBRA-MATRIZ EN ENSAYOS DE EXTRACCIÓN DE FIBRA.

Claudia Morel^a, Héctor Cóceres^b, Ricardo Barrios D'Ambra^b

^a*Instituto de Estabilidad, Universidad Nacional del Nordeste, Av. Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina, cmorel@ing.unne.edu.ar*

^b*Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad Nacional del Nordeste, Av. Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina, rbarrios@ing.unne.edu.ar, <http://www.ing.unne.edu.ar/>*

Palabras clave: Mecánica de fractura, Método de los elementos discretos, Ley cohesiva.

Resumen. Los ensayos de extracción de fibra se utilizan para evaluar la resistencia de la adherencia entre la fibra y la matriz de un material compuesto. Estos ensayos, denominados en inglés push-out y pull-out, consisten básicamente en extraer una sola fibra de la matriz, ya sea por compresión, o por tracción. Los datos experimentales muestran que en estos ensayos es preponderante el esfuerzo de corte. La resistencia interfacial es uno de los parámetros más importantes para alterar las propiedades mecánicas de un material.

En este trabajo se presenta el comportamiento de las tensiones actuantes en el material compuesto, durante un ensayo de extracción de fibra, y la influencia de la variación de las tensiones residuales. El origen de las tensiones residuales está asociado a procesos térmicos y/o químicos, y resultan en una mayor contracción relativa de la matriz e inducen tensiones normales de compresión a lo largo de la interface. Estas tensiones preexistentes también afectan el deslizamiento friccional de la fibra.

Se muestran los resultados de simulación numérica de un ensayo de extracción de fibra, mediante el método de los elementos discretos (MED), utilizando un modelo de ley cohesiva interfacial para la zona de contacto fibra/matriz. El modelo numérico es aplicado a un compuesto poliéster/epoxi, estudiándose la variación de las tensiones y la influencia de las tensiones residuales durante el proceso de despegado de la interface fibra/matriz.

1 INTRODUCCION

El ensayo de extracción de fibra por compresión (push-out test) se ha transformado en una herramienta frecuentemente utilizada para la determinación de los parámetros que caracterizan la propensión a extenderse de una fisura, especialmente la resistencia interfacial, y la ley friccional para la interface de materiales compuestos reforzados con fibras. La curva fuerza-desplazamiento obtenida durante el ensayo, se relaciona luego con la tasa crítica de liberación de energía en el modo II y con el coeficiente de fricción entre la fibra y la matriz, por medio de un ajuste de los datos a través de una solución numérica, utilizando por ejemplo el Método de los elementos finitos.

Una curva típica fuerza-desplazamiento obtenida de un ensayo de push-out muestra una respuesta inicial lineal, en correspondencia con la perfecta adhesión fibra/matriz. Luego, al incrementarse la carga, se inicia una fisura en la muestra, que comienza a propagarse a lo largo de la interface, originando una relación fuerza/desplazamiento no lineal. El proceso de despegado es inicialmente estable, pero cuando la longitud de la fisura llega a un valor crítico, el proceso de falla se vuelve inestable y conduce a un repentino despegado de la fibra. Esta inestabilidad es seguida luego por un deslizamiento friccional de la fibra (Bechel y Sottos, 1998a; Lin, Geubelle y Sottos, 2001).

Sin embargo, existen varios parámetros que afectan la relación fuerza-desplazamiento y el comportamiento de fractura del material compuesto; entre ellos se encuentran la relación entre módulos de elasticidad, la variación del coeficiente de fricción, la variación de la resistencia interfacial, y el efecto de las tensiones residuales.

Las tensiones residuales existentes en un material compuesto generalmente están originadas en las diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica de los materiales componentes, o en la contracción química de la matriz. Estas tensiones, independientemente de su origen, se traducen en una mayor contracción relativa de la matriz e inducen tensiones normales de compresión y de corte a lo largo de la interface (Bechel and Sottos, 1998b ; Bechel y Sottos, 1998c).

El Método de los elementos discretos (MED), ha sido utilizado durante el proceso de propagación de una fisura, (Morel, Cóceres, Barrios, 2010), a través de simulaciones numéricas de los ensayos de extracción de fibra, y los resultados logrados han mostrado muy buena correspondencia con la curva fuerza-desplazamiento obtenida experimentalmente, y con la evolución observada de la longitud de despegado. Además, se ha aplicado para el análisis de la variación de algunos de los parámetros mencionados anteriormente, (Morel, Cóceres, Barrios, 2011), observándose una adecuada correlación con otras técnicas de análisis numérico, como el Método de los elementos finitos (MEF).

En el presente trabajo se realiza una simulación numérica del ensayo de extracción de fibra por compresión (push-out test), empleando el Método de los elementos discretos. Para caracterizar el comportamiento no lineal de la interface fibra/matriz, se utiliza una ley cohesiva acoplada multilínea, con un modelo de fricción de Coulomb. El propósito del modelo es proporcionar resultados suficientemente precisos de la distribución de las tensiones normales y de corte sobre la interface fibra-matriz de un material compuesto poliéster/epoxi, como así también analizar la influencia de la variación de las tensiones residuales en la distribución de las tensiones interfaciales, y en el desarrollo de la longitud de despegado a lo largo de la fibra.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Método de los Elementos Discretos (MED)

El Método de los Elementos Discretos es utilizado en la mecánica computacional del continuo, para simular diversos procesos de fractura. El método utilizado en este trabajo está basado en el modelo dado por [Nayfeh and Hefzy \(1978\)](#). Este modelo discretiza espacialmente el continuo en módulos de reticulado espacial regulares, donde las rigideces de las barras son equivalentes a la del continuo que se quiere representar. La masa del modelo se concentra en los nodos del sistema discreto.

Más detalles del método pueden encontrarse en la siguiente bibliografía: [Riera \(1984\)](#), [Riera & Iturrioz \(1995\)](#), [Kosteski, Barrios, Iturrioz \(2012\)](#).

2.2 Ley Interfacial

Existen múltiples referencias de estudio de las leyes cohesivas a nivel nacional e internacional. El factor común a todas ellas es la búsqueda de una ley cohesiva que describa con la mejor aproximación, los resultados experimentales.

En trabajos anteriores se ha dado una descripción detallada de los modelos de leyes cohesivas utilizadas ([Morel, Cóceres, Barrios, 2010](#); [Morel, Cóceres, Barrios, 2011](#)).

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos utilizando una ley acoplada, basada en los modelos utilizados por [Högberg \(2006\)](#) y [Lin, Geubelle y Sottos \(2001\)](#).

Básicamente consiste en utilizar los desplazamientos normales y tangenciales entre elementos simples, para obtener las tensiones o también llamadas tracciones normales y tangenciales entre dichos elementos. Estas se dividen en tensión normal T_N y tensión tangencial T_T . Las relaciones entre las deformaciones se dan a través de las siguientes ecuaciones ([Tvergaard y Hutchinson, 1992](#)):

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{\Delta_T^C}, \quad \delta_N = \frac{\Delta_N}{\Delta_N^C}, \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_N^2} \quad (2)$$

Los valores, δ_N , δ_T y δ denotan los incrementos adimensionales totales en el desplazamiento normal, tangencial y total respectivamente, definidos en las Ecuaciones (1) y (2).

Δ_N^C y Δ_T^C son las separaciones críticas normal y tangencial para las cuales se supone la separación completa.

La tensión máxima para el esfuerzo normal T_N es σ_{max} y ocurre cuando $\Delta_N = \delta_{max}$. Δ_N^C . El máximo valor de $|T_T|$ es τ_{max} dado por la Ecuación (3)

$$\tau_{max} = \sigma_{max} \cdot \frac{\Delta_N^C}{\Delta_T^C} \quad (3)$$

Para prevenir la interpenetración de elementos pertenecientes a la matriz y los correspondientes a la fibra, se utilizó una ley de contacto fibra-matriz.

Se usaron los lineamientos dados por [Högberg \(2006\)](#) como modelo para el cálculo de las tensiones en la interface.

La deformación normal se normaliza con la separación crítica normal δ_N y la deformación tangencial con la separación crítica tangencial δ_T , al igual que en la Ecuación (2).

Las tracciones se normalizan con la resistencia en sus respectivos modos, Ecuación (4):

$$\sigma = \frac{T_N}{\sigma_{max}}, \quad \sigma = \frac{T_T}{\tau_{max}} \quad (4)$$

Todas las deformaciones y tensiones adimensionales varían en el rango de 0 a 1. Se define un parámetro llamado q combinación de modos (mode mixity) que es la razón de las deformaciones adimensionales normal y tangencial, expresado en la Ecuación (5):

$$\tan \theta = \frac{\delta_N}{\delta_T} \quad (5)$$

El modo I puro es equivalente a $\theta = \pi/2$, y el modo II puro corresponde a $\theta = 0$. Las deformaciones en modo I y modo II se acoplan mediante una medida de deformación adimensional δ , igual al ya definido en la Ecuación (2). El comportamiento de ablandamiento (softening) de la capa adhesiva comienza cuando $\delta = \delta_p$, el cual está dado por la Ecuación (6):

$$\delta_p = \sqrt{\frac{\delta_{TP}^2 \delta_{NP}^2}{\delta_{TP}^2 \text{seno}^2 \theta + \delta_{NP}^2 \text{cos}^2 \theta}} \quad (6)$$

Donde $\delta_{NP} = \Delta_{NP}/\Delta_N^C$ y $\delta_{TP} = \Delta_{TP}/\Delta_T^C$ son las separaciones normalizadas de ablandamiento en modo I y II, respectivamente.

Para cada combinación de modos, θ , en el rango de 0 a $\pi/2$, existe una tracción, S , en relación a la medida de deformación, δ , definida por la Ecuación (7):

$$S(\delta, \theta) \begin{cases} \frac{\delta}{\delta_p(\theta)} & \text{para } 0 < \delta \leq \delta_p \\ \frac{1-\delta}{1-\delta_p(\theta)} & \text{para } \delta_p < \delta \leq 1 \\ 0 & \text{para } \delta > 1 \end{cases} \quad (7)$$

3 MODELO UTILIZADO

Las simulaciones numéricas se han efectuado sobre un prisma, utilizando el MED. Las características geométricas del modelo ya han sido descritas en trabajos anteriores (Morel, Coceres, Barrios, 2010; Morel, Cóceres, Barrios, 2011). La fibra posee igual longitud que la matriz que lo contiene, y se aplica sobre ella un desplazamiento prescrito Δ_p . Este desplazamiento se aplica sobre el extremo superior de la misma en el sentido negativo del eje "Y", para obtener un ensayo de push-out. La malla está compuesta por 8372 nodos en total, para una malla cuya longitud de modulo cúbico es igual a 0,5 mm. La superficie de contacto Fibra-Matriz posee 192 nodos.

Se adoptaron para la fibra y la matriz las siguientes propiedades: $E_f = 2500 \text{ N/mm}^2$; $E_m = 4000 \text{ N/mm}^2$, con un coeficiente de Poisson de 0,25 para ambos materiales y un coeficiente de fricción de 0,52. La fibra está compuesta por material poliéster y la matriz por un material epoxy (Bechel & Sottos, 1998a).

En cuanto a los parámetros de resistencia para la ley cohesiva, se adoptó una separación crítica y $\Delta_T^C = \Delta_N^C = 0,01 \text{ mm}$, tanto para la dirección normal como la tangencial. La resistencia cohesiva se tomo igual a $\tau_{max} = \sigma_{max} = 11 \text{ MPa}$ para esfuerzo de tracción en la fibra. Al elegir valores idénticos para estas variables, se reduce el número de incógnitas del problema, y como ya se ha mencionado antes, estos valores se adoptan con igual criterio elegido por Lin, Geubelle, & Sottos, (2001) a efectos comparativos.

4 RESULTADOS

4.1 Estudio Paramétrico: influencia de las tensiones residuales

Las tensiones residuales tienen su origen en el proceso de manufacturación de la muestra fibra-matriz para ensayos mecánicos de push-out. El proceso comienza cuando se mezcla la resina epoxi con el agente de curado que se vuelca en un molde donde se introduce una fibra única (de diverso material). Esta es la fibra que mediante tracción o compresión será extraída de la matriz. En el proceso de curado, el material epoxi se contrae. Esta contracción es la induce a su vez, las tensiones previas en la muestra.

La retracción provoca una deformación específica ε_r , que puede ser valorada. Esta deformación previa ha sido medida por [Bechel y Sottos, \(1998b\)](#), mediante fotoelasticidad. Los autores indican que la retracción diferencial junto con la resistencia interfacial, el coeficiente de fricción, la rugosidad de la superficie de la fibra y la retracción química, poseen una gran influencia sobre la curva carga desplazamiento.

Las deformaciones residuales que se producen por el proceso de fabricación de la muestra en un material compuesto provocan una contracción relativa de la matriz e induce tensiones normales de compresión y tangenciales a lo largo de la interface. Estas tensiones pre-existentes, a su vez afectan el deslizamiento friccional ([Lin, Geubelle y Sottos, 2001](#)).

En el presente trabajo se muestran resultados utilizando el MED para tres valores diferentes de deformación específica por contracción ε_r : 0,0011; 0,0022 y 0,0044. Estos valores fueron adoptados a fin de comparar con los resultados obtenidos por [Lin, Geubelle, Sottos \(2001\)](#). La curva carga desplazamiento puede verse en la [Figura 1](#).

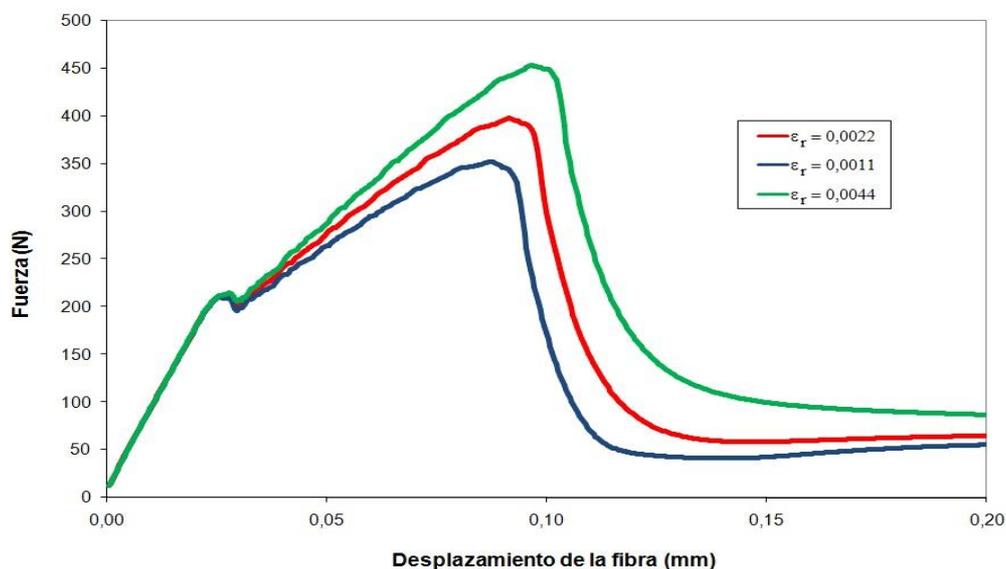


Figura 1: Curva Carga-Desplazamiento para el ensayo de push-out para tres valores diferentes de deformaciones específicas residuales ε_r

Puede observarse que el aumento de la deformación específica por retracción del material ε_r , induce un aumento de la carga final máxima para el ensayo de push-out. Del mismo modo la parte de la curva que corresponde al deslizamiento friccional también acusa aumento. La parte de la curva correspondiente al comportamiento lineal es coincidente para los tres valores de ε_r .

El incremento del valor de deformación específica residual ε_r provoca el aumento de la capacidad de carga, retrasando el proceso de falla; efecto similar al provocado por el aumento del coeficiente de fricción μ (Morel, Cóceres, Barrios, 2010).

En cuanto a la longitud de despegado, podemos ver en la Figura 2, que la influencia de la variación de la deformación específica previa por retracción, se traduce en un retardo del inicio del despegado de la fibra. El proceso de falla comienza con un despegado inestable de aproximadamente 1 mm para todos los casos. Luego aumenta linealmente con el desplazamiento de la fibra.

La longitud de la fisura a la cual aparece la inestabilidad, es para todos los casos próxima a los 4 mm

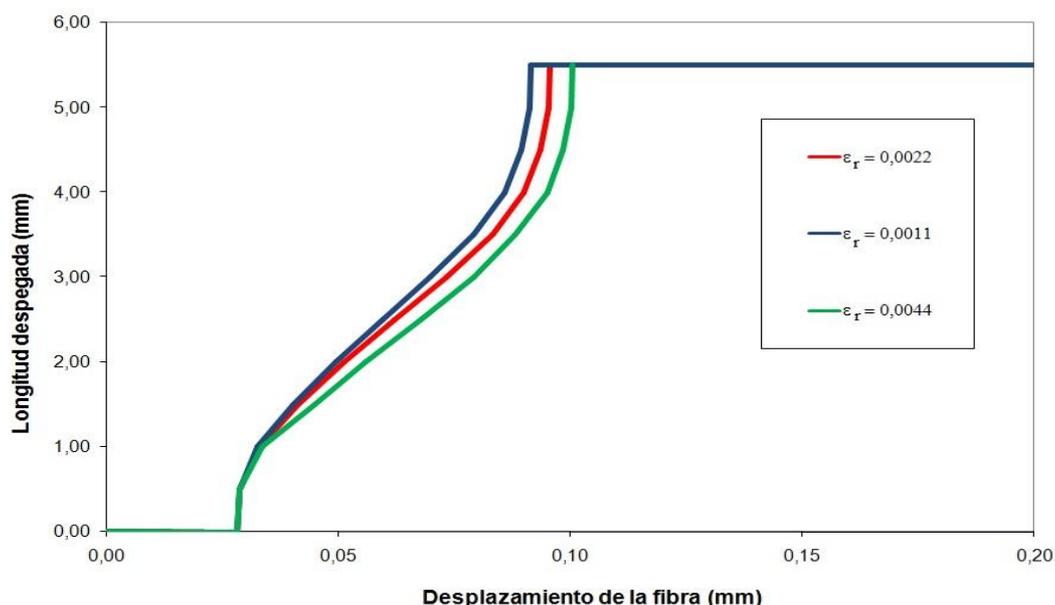


Figura 2: Efecto de la variación de ε en la curva de evolución de la longitud despegada.

También se observa que el despegado se produce desde los puntos de la parte superior de la fibra hacia los puntos de la parte inferior de la fibra, para todos los valores de ε_r .

4.2 Comparación de resultados

Se han utilizado los valores de los resultados obtenidos por Lin, Geubelle y Sottos (2001) mediante el MEF, a fines de comparar resultados. En la Figura 3, puede verse la comparación de tres curvas que corresponden a ensayos experimentales, simulación mediante el MEF y simulación mediante el MED, para un valor de deformación específica por retracción ε_r , de 0,0022.

Se observa la carga máxima es similar en los tres casos. Una de las diferencias se encuentra en la parte de la curva correspondiente al deslizamiento friccional (parte de la curva posterior al descenso de carga), que en el caso de Lin, Geubelle y Sottos (2001), presenta una carga mayor a la obtenida por los datos experimentales y a la obtenida mediante MED. También se observa que si bien se obtiene una caída de tensión abrupta, la curva correspondiente al MED es más suavizada que la correspondiente a los datos experimentales.

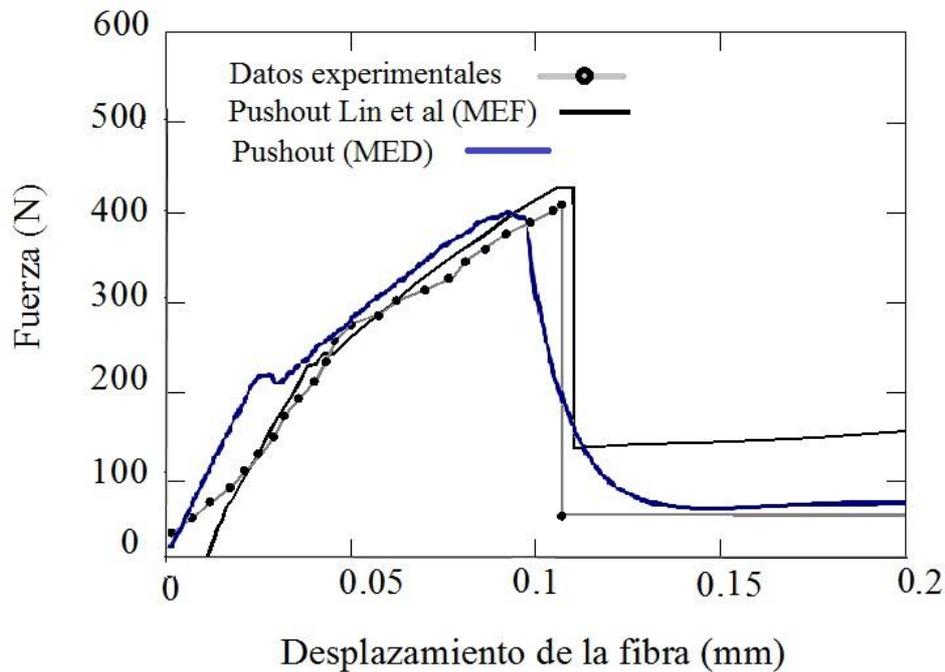


Figura 3: Curva Carga –Desplazamiento. Comparación entre datos experimentales y simulación numérica.

En la [Figura 4](#), se muestra la evolución del despegado. Se observa que las tres curvas son similares entre sí, mostrando una misma pendiente en el proceso de despegado lineal. La longitud de despegado de la fisura que precede a la falla inestable, presenta en los tres casos un quiebre próximo a los 4 mm de longitud de despegado de la fibra. El mayor valor de separación (mm) se presenta en la curva correspondiente a los datos experimentales, siguiendo en orden decreciente, la separación obtenida por la curva correspondiente a las simulaciones de Lin et al mediante MEF y finalmente la correspondiente al MED.

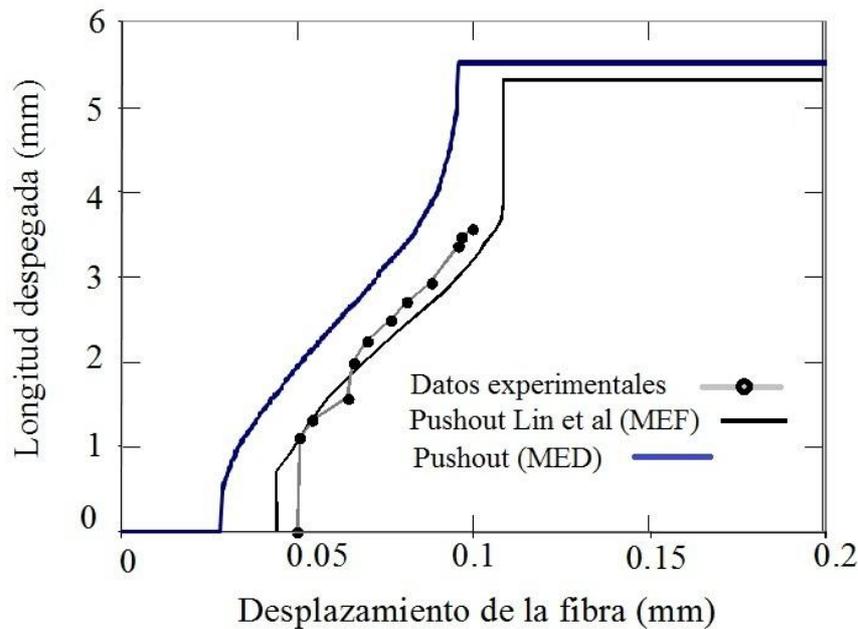


Figura 4: Evolución de la longitud despegada. Comparación entre datos experimentales y simulación numérica.

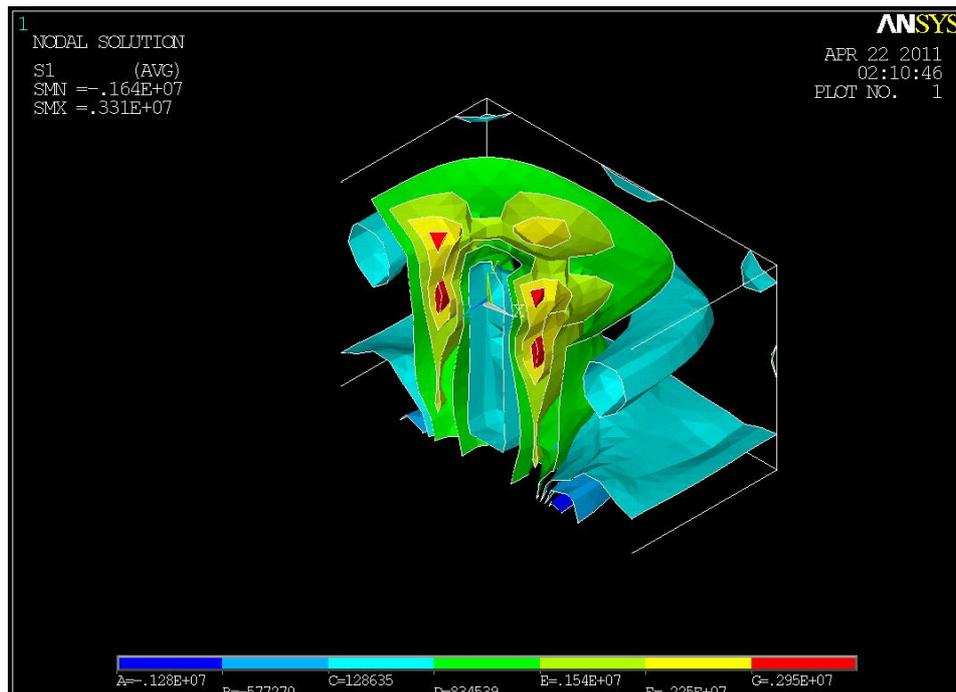


Figura 6: Vista en perspectiva y en corte transversal de las isosuperficies de tensiones principales

En la **Figura 7** se puede apreciar, el estado de tensiones de corte en el plano “XY”. Nuevamente se observa la localización de las tensiones de corte en la zona de contacto fibra-matriz. Puede notarse en esta imagen el comienzo del despegado de la interface, las tensiones de corte en la zona de despegado se muestran en color rojo. El despegado inicia en la parte superior de la fibra.

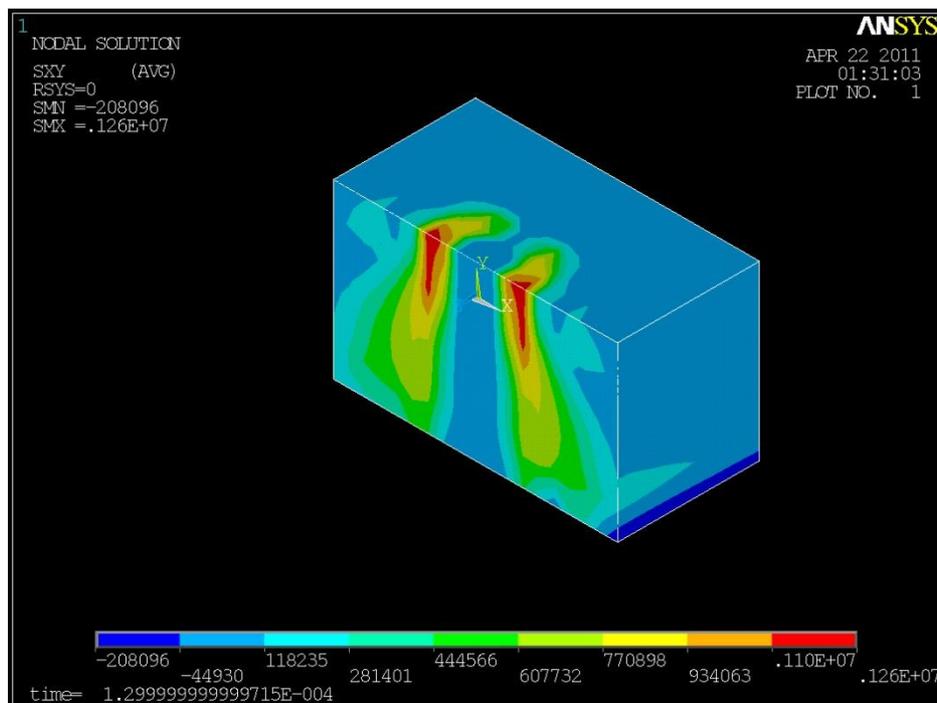


Figura 7: Corte transversal de tensiones de corte en el plano XY

5 CONCLUSIONES

Se ha utilizado para simular el comportamiento de la falla interfacial de un material compuesto fibra-matriz una ley cohesiva acoplada multilínea para carga combinada con un modelo de fricción de Coulomb, produciendo una propagación de fisuras bajo condiciones de corte dominante que se ha incorporado a un modelo tridimensional de un ensayo de extracción de fibra por compresión (pushout) en un compuesto poliéster-epoxi mediante el uso del MED.

Los ensayos de pushout presentan gráficas carga-desplazamiento y de propagación de fisura muy próximas a los resultados dados por datos experimentales y a los obtenidos por Lin, Geubelle y Sottos (2001) mediante el MEF. Dichas gráficas presentan las tres fases características en la curva carga-deformación, bien definidas.

Se evaluó la influencia de uno de los parámetros que afecta la curva carga desplazamiento: el valor de la deformación específica por retracción ϵ_r . El aumento de este parámetro, aumenta la capacidad de carga y retrasa la inestabilidad asociada con el despegado completo de la interface fibra-matriz. Los ensayos realizados con los valores de ϵ_r utilizados en este trabajo, en la simulación del ensayo de pushout mediante el MED, producen un despegado desde la parte superior de la fibra en dirección hacia abajo.

Las diversas imágenes de las tensiones obtenidas en la simulación numérica permiten observar el avance de las mayores tensiones en el sentido del despegado de la interface fibra-matriz.

Los resultados obtenidos muestran que el MED puede ser una alternativa válida y económica, en términos de simplicidad y tiempo, al MEF, para la simulación numérica del ensayo de extracción de fibra y en el estudio del comportamiento del proceso de separación interfacial fibra matriz.

6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es parte de un proyecto del Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, aprobado por la Secretaría General de Ciencia y Técnica bajo la denominación PI D003-2008 (<http://ing.unne.edu.ar/mecap/index.html>).

REFERENCIAS

- Bechel, V. T., and Sottos, N. R., A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber pushout test. *Comp. Sci. Technol.*, 58, 1727-1739. 1998
- Bechel, V. T. and Sottos, N. R., Application of debond length measurements to examine the mechanics of fiber pushout. *J. Mech. Phys. Solids*, 46, 1675-1697, 1998.
- Bechel, V. T., and Sottos, N. R., The effect of residual stresses and sample preparation on progressive debonding during the fiber push-out test. *Composites Science and Technology*, 58, 1741-1751, 1998.
- Högberg, J. L. Mixed Mode Cohesive Law. *Int J Fract*, 141, 549-559. 2006
- Kosteski L., Barrios R., Iturrioz I., Crack propagation in elastic solids using the truss-like discrete element method. *International Journal of Fracture*. vol. 174, N 2, 139-161, 2012.
- Lin, G., Geubelle, P. H., & Sottos, N. R. Simulation of fiber debonding with friction in a model composite pushout test. *Int. J. Solids and Struct.* , 38 , 8547-8562. 2001.
- Nayfeh A.H., Hefzy M.S., Continuum modeling of three dimensional truss-like space structures. *AIAA J* 16/8:779-787, 1978.
- Morel C., Cóceres H., Barrios R., Aplicación del método de los elementos discretos al

proceso de separación fibra-matriz con un modelo de interfaces cohesivas. *MECOM del Bicentenario 2010, MECOM 2010- CILAMCE 2010*, Buenos Aires, Argentina 15-18 Noviembre 2010.

Morel C., Cóceres H., Barrios R., Comparación de modelos de interfaces cohesivas desacoplada y acoplada aplicando el método de los elementos discretos al proceso de separación fibra-matriz. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF 2011, Rosario, Argentina, 1-4 Noviembre 2011.

Riera J.D., Local effects in impact problems on concrete structures. *In: Proceedings, conference on structural analysis and design of nuclear power plants*, vol. 3, Porto Alegre, RS, Brasil, CDU 264.04:621.311.2:621.039, 1984.

Riera J.D., Iturrioz I., Discrete element dynamic response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading. *Commun. Numer. Methods Eng.* 11:417–426, 1995.

Tvergaard, V., & Hutchinson, J. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic–plastic solids. *J Mech Phys Solids*, 40, 1377–1397. 1992