

COMPARACIÓN DE MODELOS DE INTERFACES COHESIVAS DESACOPLADA Y ACOPLADA APLICANDO EL METODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS AL PROCESO DE SEPARACIÓN FIBRA-MATRIZ.

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, <http://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://ing.unne.edu.ar>*

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

Resumen. La separación material hasta la falla de una fisura en formación puede ser modelada por medio de leyes cohesivas. Esta ley describe la relación entre tensiones y separaciones de elementos cohesivos utilizando un enfoque fenomenológico. Se considera que las tensiones y separaciones pueden dividirse en dos direcciones principales, dando origen a separaciones y tracciones normales y tangenciales, que actúan en la superficie de la fisura en formación. Cuando estos dos modos de separación se dan simultáneamente, existe una influencia de la separación normal sobre la tracción tangencial y viceversa. Este caso es denominado modo combinado. Hay dos maneras diferentes de analizar los procesos de fractura de modo combinado: por medio de una ley cohesiva desacoplada o una ley cohesiva acoplada. Si la componente normal de la tracción es independiente de la separación tangencial y la tracción tangencial es independiente de la separación normal, la ley cohesiva se denomina desacoplada. Cuando ambas tracciones son dependientes de los dos modos de separación, la ley cohesiva es acoplada.

Los modelos desacoplados se utilizan generalmente cuando uno de los modos de separación es predominante respecto del otro. Ese es el caso de los ensayos de extracción de fibra por tracción o por compresión (ensayos de pullout y pushout), donde el modo tangencial prevalece. La mayoría de las leyes cohesivas son acopladas. Uno de los objetivos del presente trabajo fue determinar hasta qué punto estos dos modelos muestran diferencias en la curva tracción-separación de un ensayo de extracción de fibra por compresión y por tracción.

Los ensayos de extracción de fibra tienen como propósito determinar la resistencia al despegado. El proceso de falla interfacial de un material compuesto puede ser estudiado por medio de la simulación de estos ensayos. El control de la falla interfacial es una de las formas más potentes de modificar las propiedades de un material compuesto.

Este trabajo presenta los resultados de la aplicación del Método de los Elementos Discretos a la simulación de ensayos de extracción de fibra por tracción y por compresión sobre un modelo de material compuesto con una matriz que contiene una sola fibra (fibra polyester/matriz epoxi) usando dos modelos de ley cohesiva. El primer modelo es desacoplado y el segundo acoplado. Se presenta un sumario de los resultados junto con las principales diferencias y similitudes entre las dos leyes cohesivas adoptadas. Los valores son comparados con resultados experimentales de otras investigaciones.

1 INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de mejores desempeños de los materiales, han surgido en las últimas décadas los materiales compuestos. Estos materiales tienen muchos usos en la industria aeroespacial y automotriz dada sus mejoradas propiedades físicas y mecánicas. La investigación de estos materiales busca evaluar varios aspectos, entre ellos, fabricación, procesamiento, diseño y caracterización de su comportamiento. Para este último aspecto se utilizan modelos y simulaciones computacionales así como también ensayos experimentales. Los ensayos mecánicos proveen a las simulaciones numéricas de las propiedades mecánicas necesarias para efectuar el modelado computacional.

El modelado de la falla en los materiales compuestos, puede efectuarse mediante el uso de los conceptos de la micromecánica o a través de leyes cohesivas. Las leyes cohesivas pertenecen a un grupo de modelos, llamados fenomenológicos, que no dependen de un mecanismo de falla específico. Emplean un modelo material, el cual es representado por una ley de tracción-separación que describe la pérdida de capacidad de carga del material en función de la separación independientemente de los detalles físicos del daño que ocurra realmente en el material (Schwalbe, Scheider, Cornec, 2009).

Una de las ventajas de utilizar las leyes cohesivas como modelos de falla, es su independencia del tamaño de la malla usada en el modelado (Schwalbe, Scheider, Cornec, 2009; Lin et al, 2001). Además solo precisa de dos parámetros para su aplicación: separación crítica o desplazamiento máximo y tracción máxima o resistencia cohesiva. Esta y otras ventajas fueron el motivo de su elección para este trabajo.

Entre las variadas formas de falla de un material compuesto, se decidió analizar el comportamiento del material compuesto al despegado de la interface fibra- matriz. .

2 ANTECEDENTES

Barenblatt estableció el concepto de describir las actividades cohesivas antes de la fractura en 1962.

Los modelos cohesivos más recientes son distintos al propuesto por Barenblatt en que las tracciones son dependientes de la abertura y no de la distancia a la fisura (Brocks, Cornec, & Scheider, 2003). Needleman (1987) fue el primero en utilizar un modelo cohesivo por medio de los Elementos finitos para el análisis de propagación de fisuras en materiales dúctiles. Hillerborg (1976) aplicó el modelo de zona cohesiva a la fractura frágil usando el MEF por primera vez, seguido por Petersson (1981) y Carpinteri (1986) entre otros.

La separación del material y a su vez el daño de la estructura se describe mediante elementos interfaciales, no se dañan elementos continuos en el modelo cohesivo. Usando esta técnica el comportamiento del material se divide en dos partes, el continuo libre de daños con una ley material arbitraria y las interfaces cohesivas entre los elementos continuos, que especifican solo el daño del material.

Los elementos interfaciales se abren cuando ocurre el daño y pierden su rigidez en la falla de tal manera que los elementos continuos se desconectan. Por esta razón la fisura se puede propagar solo a lo largo de los bordes del elemento. Si la dirección de la propagación de la fisura no se conoce de antemano la generación de la malla debe crear diferentes caminos posibles para la fisura (Brocks, Cornec, & Scheider, 2003).

En la separación, se distinguen la separación normal Δ_T y una separación tangencial Δ_N . Estas componentes, dependen a su vez, de las tensiones normal y tangencial respectivamente, actuantes sobre la superficie de la interface. Cuando la componente tangencial o normal de la separación alcanza un valor crítico, Δ_T^C ó Δ_N^C respectivamente, el elemento continuo

inicialmente conectado por este elemento cohesivo se desconecta lo que significa que el material en este punto ha fallado.

Para problemas tridimensionales, existen dos direcciones para la separación tangencial, que se denotan como Δ_{T1} y Δ_{T2} .

Además de la separación crítica Δ_T^C ó Δ_N^C , la tracción máxima (tensión en la superficie del elemento continuo), T_{max} , se usa como un parámetro de fractura, llamado resistencia cohesiva. El valor de T_{max} solo describe el valor máximo de la curva tracción-separación $T(\delta)$ en adelante denotada como ley cohesiva. Al igual que las separaciones, las tensiones T pueden también actuar en una dirección normal y otra tangencial llevando a una fractura normal o de corte respectivamente (Brocks, Cornec, & Scheider, 2003). La forma de la curva $T(\delta)$ se supone que es una ley cohesiva independiente del material y es definida de diversas formas por distintos autores. Común a todas ellas es:

- Contiene los dos parámetros materiales T_{max} y δ_{max}
- Para la falla total la tensión se hace cero $T(\delta > \delta_{max}) \equiv 0$ tanto para la separación normal como para la tangencial

Si los dos modos de separación, normal y tangencial, ocurren simultáneamente existe una influencia de la separación normal sobre las tracciones tangenciales y viceversa. La descripción de este caso, se lo denomina como “modo combinado” (mixed mode).

Para analizar procesos de fractura de modo combinado (i.e.: se tienen en cuenta tanto esfuerzos tangenciales como normales a la superficie) se pueden utilizar dos aproximaciones:

- (a) mediante una ley cohesiva acoplada, o
- (b) una ley cohesiva desacoplada.

La tracción normal de una ley cohesiva desacoplada es independiente de la separación tangencial y la tracción tangencial es independiente de la separación normal.

En una ley acoplada, ambas tracciones dependen tanto del desplazamiento normal como del tangencial.

La mayoría de las leyes cohesivas poseen un acoplamiento (parcial) entre las direcciones normal y tangencial. Existen dos maneras de lograr este acoplamiento:

- (1) haciendo uso de un desplazamiento efectivo y/o
- (2) usando parámetros de acoplamiento, que se define a continuación.

Una ley cohesiva acoplada utilizada muy frecuentemente es la desarrollada por Tvergaard y Hutchinson (1992). Esta ley utiliza un parámetro adimensional de separación para acoplar ambos modos, como se muestra en la Ecuación (1):

$$\delta = \sqrt{(\Delta_T/\Delta_T^C)^2 + (\Delta_N/\Delta_N^C)^2} \quad (1)$$

Dado que el modelo cohesivo es un modelo fenomenológico, no hay evidencia sobre la forma que debe tomar la ley cohesiva $T(\delta)$. De esta manera la ley cohesiva debe suponerse independiente de un material específico como modelo para el proceso de separación. Muchos autores toman su propia formulación para la dependencia de la tracción de la separación.

Como se ha dicho, las zonas cohesivas proyectan todos los mecanismos dentro y alrededor del extremo de una fisura en la interface, llevando a una relación constitutiva, o ley de la zona cohesiva, entre la tracción y el desplazamiento de la abertura. Existen una gran variedad de leyes cohesivas. La mayoría de ellas pueden ser categorizadas en los siguientes grupos (Bosch van den, Schreurs, & Geers, 2006):

- a) Leyes cohesivas polinomiales (Tvergaard, 1990)
- b) Leyes cohesivas lineales fragmentadas o trapezoidal (Tvergaard & Hutchinson, 1992)

- c) Leyes cohesivas exponenciales (Needleman, 1987), (Needleman, 1997)
- d) Leyes cohesivas rígido-lineales, también llamada bilineal o lineal decreciente (Geubelle & Baylor, 1998).

3 LEYES COHESIVAS

3.1 Ley Cohesiva Desacoplada

Las leyes cohesivas desacopladas se utilizan cuando el proceso de despegado ocurre bajo un modo-normal (modo I) o tangencial (modo II) – o cuando uno de ellos es predominante sobre el otro. Ejemplos de aplicación de leyes desacopladas son el modelado de “crazing” en polímeros (Tijssens, Van der Giessen, & Sluys, 2000) y fractura de compuestos de cemento (Tijssens, Sluys, & Van der Giessen, 2001).

Hanson et al. (2004) utilizaron una ley cohesiva lineal desacoplada para analizar el despegado en modo I de una estructura adherida en forma de sándwich. Li et al. (2005), usaron una ley rígido-lineal para predecir la fractura de compuestos de matriz polimérica bajo cargas de modo I. El modelado del daño por fatiga en interconexiones de soldadura fue efectuado con una ley cohesiva desacoplada por Abdul-Baqi et al. (2005).

Högberg (2006) menciona una posible configuración para esta aproximación, la cual fue utilizada por Thouless (2006) para simular la carga mixta sobre una capa de adhesivo. Las relaciones tensión-deformación en modo I (normal) y modo II (corte) se suponen desacopladas bajo estados de carga mixta. Este modelo ha probado tener una buena capacidad para capturar las propiedades esenciales de las juntas adhesivas.

El modelo utilizado en este trabajo posee un diagrama multilínea entre carga vs. desplazamiento, que establece las relaciones entre las tracciones y deformaciones de la interface. La carga máxima para el esfuerzo normal se denomina T_{Tmax} y para el esfuerzo normal T_{Nmax} . Los desplazamientos máximos se denominan Δ_{Tmax} y Δ_{Nmax} . Los esfuerzos y las separaciones no se hallan normalizados respecto de los valores críticos. No se establece relación entre los esfuerzos normal y tangencial. Estos trabajan de manera independiente entre sí y sus diagramas pueden verse en las Figuras 1 y 2.

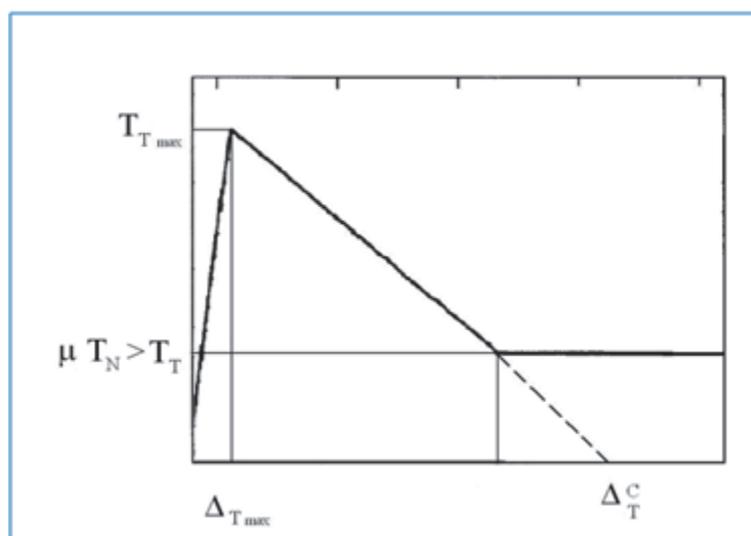


Figura 1: Ley cohesiva desacoplada. Fuerza de corte T_T versus separación por corte Δ_T .

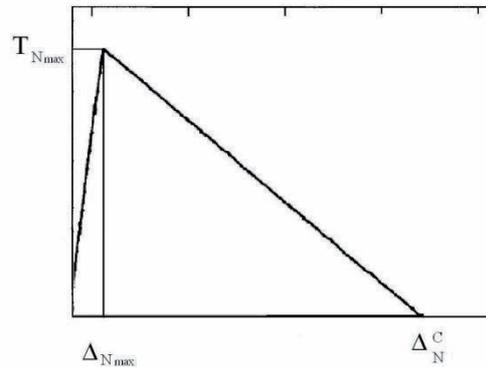


Figura 2: Fuerza Normal T_N versus separación por apertura Δ_N .

El deslizamiento friccional se hace efectivo aplicando un coeficiente de fricción μ multiplicado por el esfuerzo normal que se produce en la superficie de contacto fibra-matriz.

3.2 Ley Cohesiva Acoplada

El modelo de zona cohesiva consiste en una relación constitutiva entre las tracciones \mathbf{T} actuantes en la interface y la correspondiente separación interfacial Δ (salto en el desplazamiento entre las caras de la interface). Lin et al (2001) usaron un modelo de falla cohesivo intrínseco en el cual a medida que la interface se separa, la magnitud de \mathbf{T} se incrementa, alcanza un valor máximo y luego decae progresivamente a cero mientras ocurre la separación completa. Lin (2001) modificó en su estudio el modelo de falla cohesivo bilineal de Geubelle y Baylor (1998) para tener en cuenta el contacto friccional entre las superficies de fractura creadas. Se hace la suposición de que el deslizamiento friccional obedece la ley friccional de Coulomb (con un coeficiente de fricción μ , produciendo una relación entre las tracciones cohesivas o interfaciales normales (T_N) y tangenciales (T_T), también llamada tracción de corte) y los saltos de desplazamientos o separaciones normal (Δ_N) y tangencial (Δ_T). En el último caso, la tracción normal de un lado al otro de la interface es calculada por un algoritmo de contacto para hacer cumplir la condición $\delta_N = 0$.

Los valores, δ_N , δ_T y δ denotan los incrementos adimensionales totales en el desplazamiento normal, tangencial y total respectivamente, definidos en la Ecuación (2):

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{\Delta_T^C}, \quad \delta_N = \frac{\Delta_N}{\Delta_N^C}, \quad \delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_N^2} \quad (2)$$

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

La variación de las componentes de tracción normal y tangencial respecto a Δ_N y Δ_T que corresponden a abertura pura ($\Delta_T = 0$) y separación por corte puro ($\Delta_N = 0$) se muestran en la Figura 3, a y b. El máximo valor de T_N es σ_{max} y ocurre cuando $\Delta_N = \delta_{max} \cdot \Delta_N^C$. El máximo valor de $|T_T|$ es τ_{max} dado por la Ecuación (3):

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

Y se logra a $|\Delta_T| = \delta_{max} \cdot \Delta_T^C$.

El proceso de falla observado en el ensayo de pushout es casi exclusivamente de corte e implica una contribución casi insignificante del modo de apertura (normal).

Como se puede ver de las Ecuaciones (1) a (3) la respuesta en cada punto a lo largo de la

interface es caracterizada por cuatro parámetros: δ_{max} , σ_{max} , Δ_N^C y Δ_T^C . El número de parámetros puede ser reducido a tres ya que los resultados son prácticamente insensibles a δ_{max} mientras la rigidez de los elementos de la interface sea mayor que la de los elementos rodean al volumen.

En resumen, la interface es discretizada en una serie de elementos interfaciales, referidos como elementos cohesivos. Previamente al despegado interfacial, las Ecuaciones (1) a (3) se usan para describir la evolución de las tracciones normal y tangencial actuante a lo largo de los elementos de la interface par a los cuales $\delta_N > 0$ y la evolución de las componentes de tracción tangencial donde los elementos cohesivos superficiales están en contacto ($\delta_N = 0$).

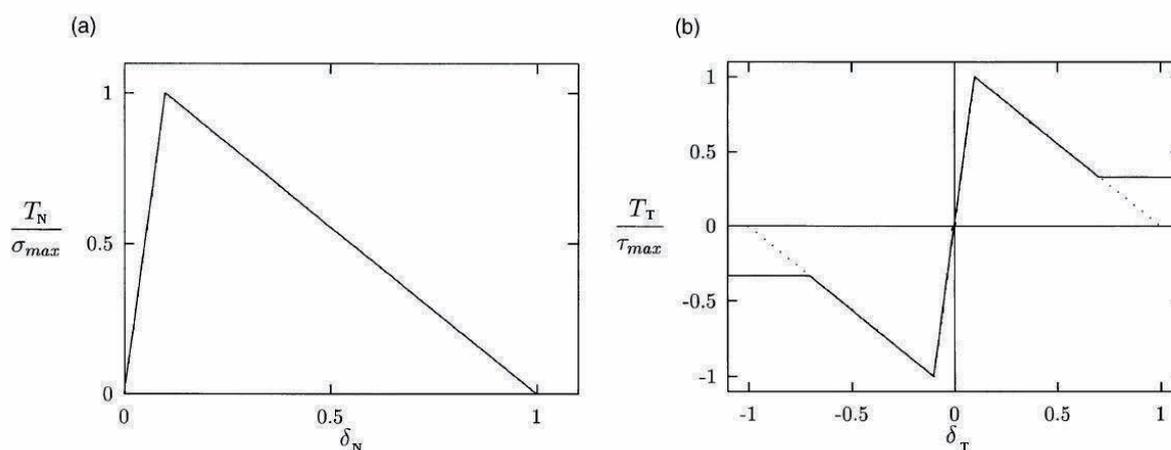


Figura 3: Ley cohesiva. (a) Tracción Normal T_N como función de la separación normal δ_N para $\delta_T=0$; (b) Tracción de corte T_T versus separación por corte δ_T para $\delta_N=0$. Las curvas continuas y de puntos corresponden a falla por corte cohesivo para contacto friccional y no friccional respectivamente

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

A efectos comparativos se usaron los lineamientos dados por Högberg (2006) como modelo para el cálculo de las tensiones en la interface. Este modelo se tomó como base de estudio para posteriores trabajos de investigación, en los cuales el ensayo de la medición de la fuerza cohesiva entre dos materiales tenga una geometría que produzca preponderantemente esfuerzos del tipo normal y en menor medida esfuerzos de corte. Tal es el caso del modelo de ensayo descrito en la Norma ASTM D 3807-98 (94) (2004), en el cual se prescribe el método para ensayar las propiedades de resistencia de adhesivos bajo cargas de tracción.

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), del mismo modo que en el modelo anterior:

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

Todas las deformaciones y tensiones adimensionales varían en el rango de 0 a 1. Se define un parámetro llamado θ 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):

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

4 MODELO UTILIZADO

Las simulaciones numéricas se han efectuado sobre un prisma tridimensional, utilizando el MED. Las características geométricas del modelo se muestran en la Figura 4. La fibra posee igual longitud que la matriz que lo contiene (N), y se aplica sobre ella un desplazamiento prescrito Δ_p . Este desplazamiento se aplica sobre el extremo superior de la misma en el sentido positivo del eje “Y”, para obtener un ensayo de pullout. 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.

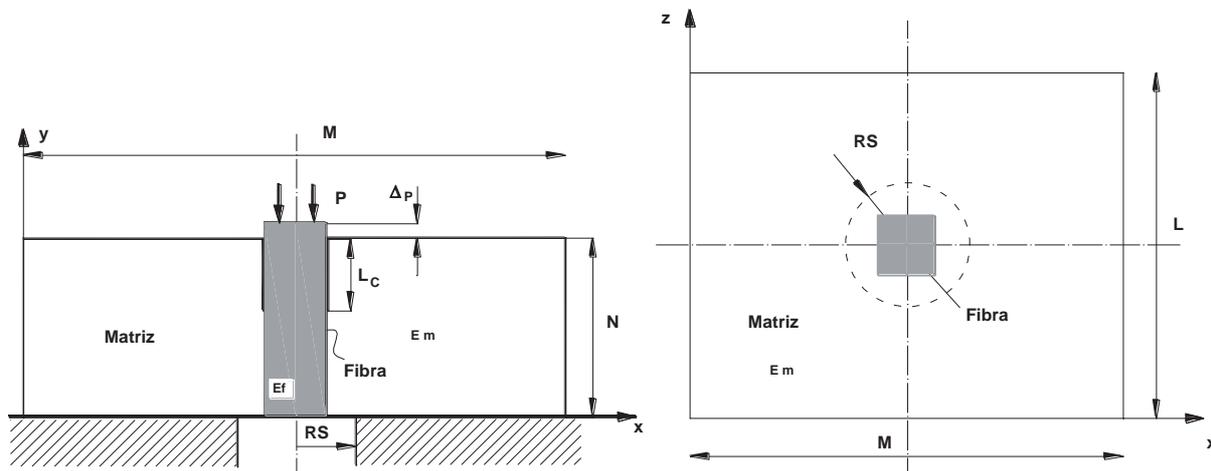


Figura 4: Esquema del modelo para ensayo pullout y pushout

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, para más características de los materiales, ver la bibliografía citada, (Bechel & Sottos, 1998).

En cuanto a los parámetros de resistencia para la ley cohesiva, se adoptó una separación crítica y $\Delta^C_T = \Delta^C_N = 0,01$ mm, tanto para la dirección normal como la tangencial. La resistencia cohesiva se tomó igual a $\tau_{\max} = \sigma_{\max} = 11$ 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.

Las dimensiones en los ejes “X”, “Y” y “Z”, se denominan M, N y L respectivamente. Los nodos iniciales y finales de la fibra se denominan Mini y Mfin en el sentido “X” y Lini y Lfin en el sentido “Z”. $M = L = 9$ mm; $N = 5,5$ mm, $RS = 1,6$ mm; Lado de la Fibra = 2 mm.

En la Figura 5, se muestra una perspectiva de la malla deformada, esta gráfica se ha efectuado utilizando el software ANSYS como post-procesador.

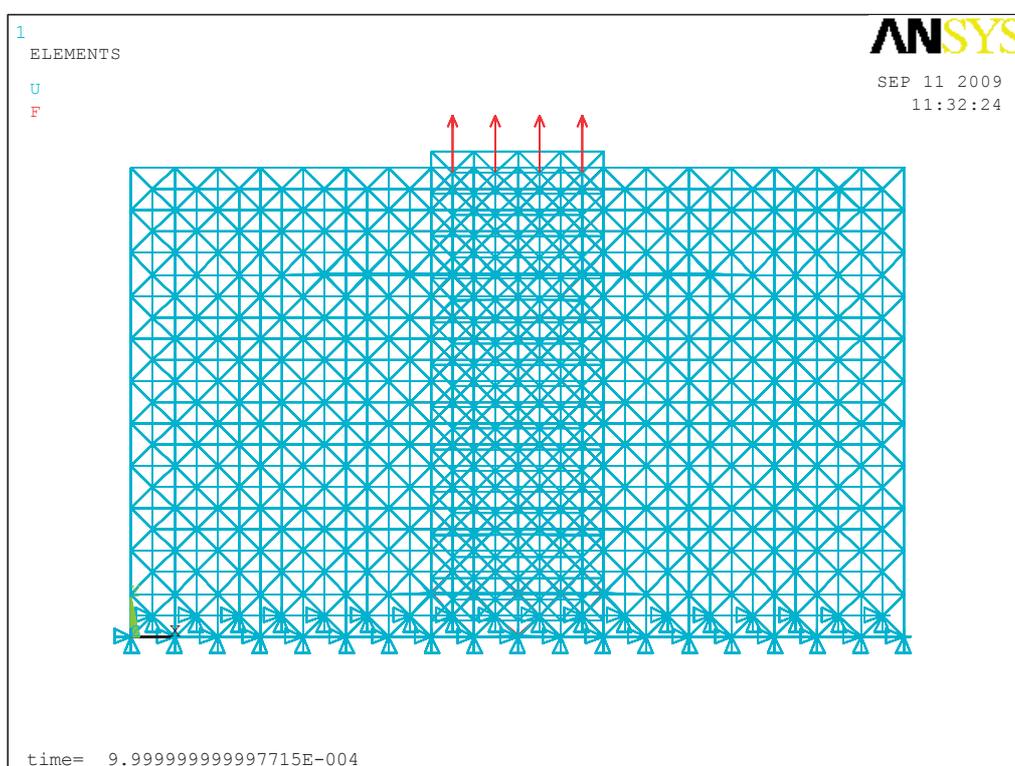


Figura 5: Malla deformada

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

5.1 Ensayos de Pullout

En la Figura 6 puede verse la comparación entre las curvas Carga-Desplazamiento para ambos modelos de ley cohesiva: acoplada y desacoplada.

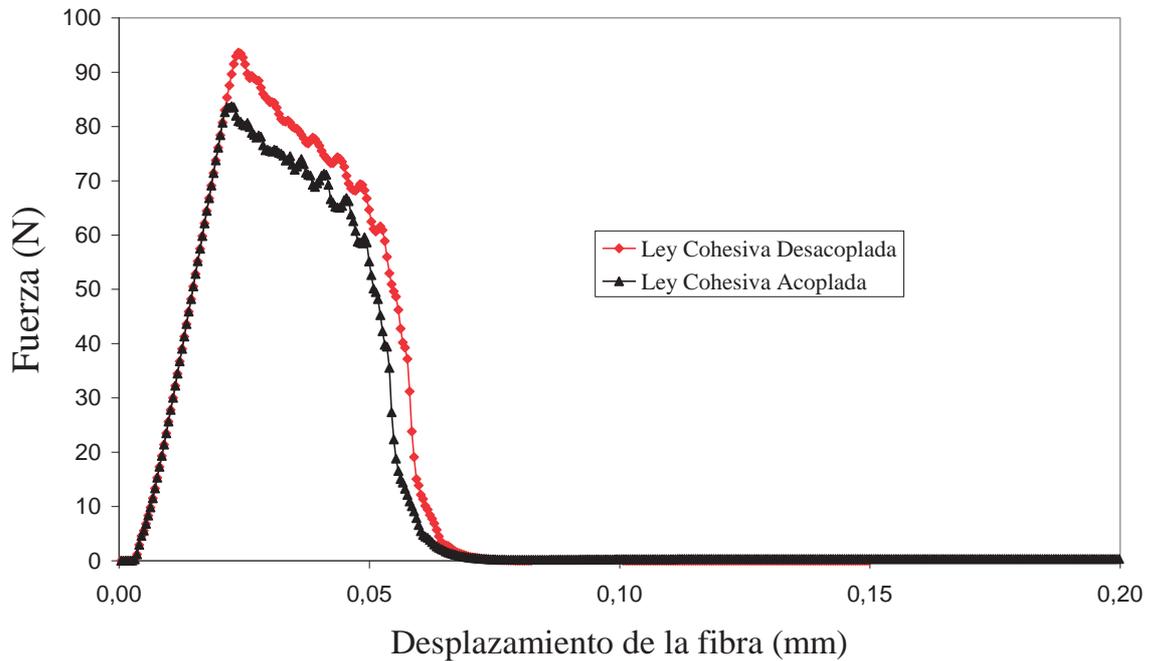


Figura 6: Curva Carga-Desplazamiento para el ensayo de pullout usando leyes cohesivas acoplada y desacoplada.

Se observa que la carga sobre la fibra es superior cuando se utiliza una ley cohesiva desacoplada. También se puede notar que el primer tramo de la curva Carga-Desplazamiento, correspondiente a un comportamiento lineal posee para ambos casos, pendientes muy similares.

El segundo tramo de la curva correspondiente a un comportamiento no lineal, presenta un comportamiento inestable con una carga decreciente en ambos casos.

Finalmente ambas curvas muestran un descenso brusco de la carga que determina la culminación del ensayo.

5.2 Ensayos de Pushout

Las curvas Carga-Desplazamiento para ambos modelos de ley cohesiva para el ensayo de pushout se muestran en la [Figura 7](#).

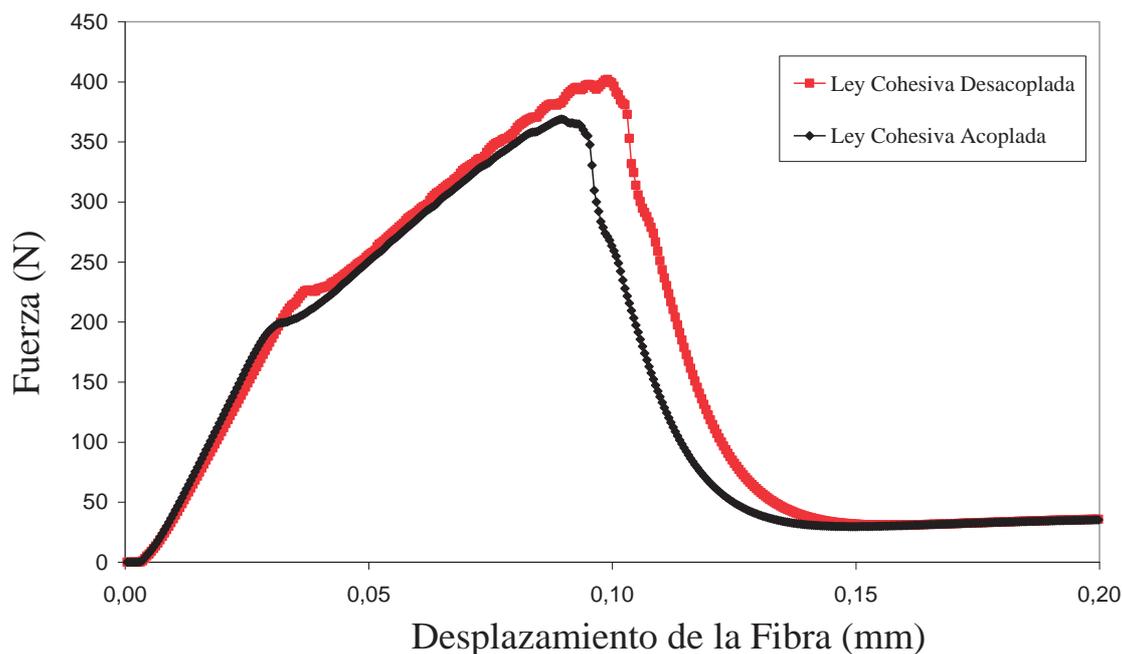


Figura 7: Curva Carga-Desplazamiento para el ensayo de pushout usando leyes cohesivas acoplada y desacoplada.

La carga sobre la fibra, en el ensayo de pushout, utilizando un modelo de ley cohesiva desacoplada es mayor que la obtenida utilizando una ley cohesiva acoplada.

La curva Carga –Desplazamiento en ambos casos presenta tres etapas bien definidas: una primer parte lineal, una segunda parte no lineal con carga creciente, un descenso brusco de la carga y una etapa final de deslizamiento friccional.

La parte lineal presenta en ambos casos pendientes muy próximas, pero la diferencia se encuentra en la carga máxima que alcanzan ambas curvas, siendo superior la correspondiente a una ley cohesiva desacoplada.

La zona no lineal también presenta pendientes similares en ambos casos, y su diferencia también se encuentra en la carga máxima, otra vez superior en el caso de la ley cohesiva desacoplada.

Luego del descenso abrupto de la carga, ambas curvas presentan valores semejantes para el deslizamiento friccional.

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A fines comparativos se utilizaron los resultados experimentales obtenidos por [Lin et al \(2001\)](#).

En la [Figura 8](#) puede verse la comparación de resultados para el ensayo de pullout.

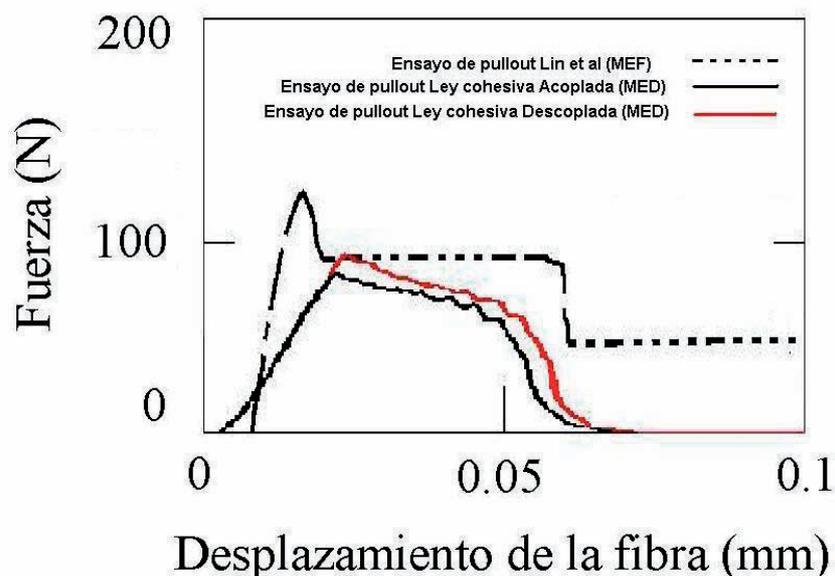


Figura 8: Ensayo de pullout

Puede observarse que las pendientes de la parte lineal de la curva carga-desplazamiento son diferentes, siendo mayor la que corresponde a la obtenida mediante el uso del MEF. También se observa que la carga máxima utilizando el MED, ya sea con una ley cohesiva acoplada o desacoplada, es menor a la que muestra la obtenida utilizando el MEF. La segunda parte de la curva carga-desplazamiento se diferencia en ambos métodos, MED y MEF, en que en el primer caso la carga es descendente y menor en magnitud en cambio en el segundo caso permanece constante formando una meseta. Estas diferencias pueden ser debidas a que en esta serie de ensayos de pullout realizados utilizando el MED, no se han tenido en cuenta las tensiones residuales de contracción. Estas tensiones previas que existen en el modelo y que se manifiestan en forma de tensiones normales uniformes de compresión a lo largo de la fibra, se originan en el proceso de manufacturación de las probetas con material epoxi (Lin et al, 2001; Bechel & Sottos, 1998). Dicho efecto se encuentra aún en estudio y evaluación para el caso de simulación del ensayo de pullout utilizando el MED.

Las tres curvas alcanzan el descenso brusco de la carga, cerca de un desplazamiento de la fibra de 0.06 mm.

La zona de la curva correspondiente al deslizamiento friccional, es casi nula para los resultados obtenidos mediante el uso del MED, mientras que los resultados utilizando el MEF presentan una carga de aproximadamente 50 N.

En la Figura 9 se comparan los resultados de los ensayos de pushout. En esta serie de ensayos si se ha tenido en cuenta las tensiones de contracción previa. En esta figura se observa que en la primer parte de la curva carga-desplazamiento, la parte lineal presenta una pendiente similar tanto para los resultados obtenidos experimentalmente como los obtenidos mediante la simulación con MEF y MED.

Las cuatro curvas muestran una segunda parte no lineal de la curva carga-desplazamiento también con pendientes similares, diferenciándose solo en la carga máxima, la cual es superior utilizando el MEF.

El descenso de la carga se muestra de manera más abrupta en el caso de los ensayos experimentales y utilizando el MEF. En el caso del MED, ya sea utilizando una Ley Cohesiva Acoplada o Desacoplada, el descenso de la carga es mas suave.

La parte de la curva correspondiente al deslizamiento friccional es diferente en los tres métodos utilizados en el ensayo de Pushout. La carga más alta corresponde a la curva obtenida mediante el uso del MEF, siguiendo en orden de magnitud la correspondiente a los resultados experimentales. Finalmente y muy cerca de los resultados experimentales, pero menor en magnitud, se encuentran los resultados obtenidos mediante el MED. La carga a aplicar a la fibra para su extracción aumenta notablemente respecto del ensayo de pullout.

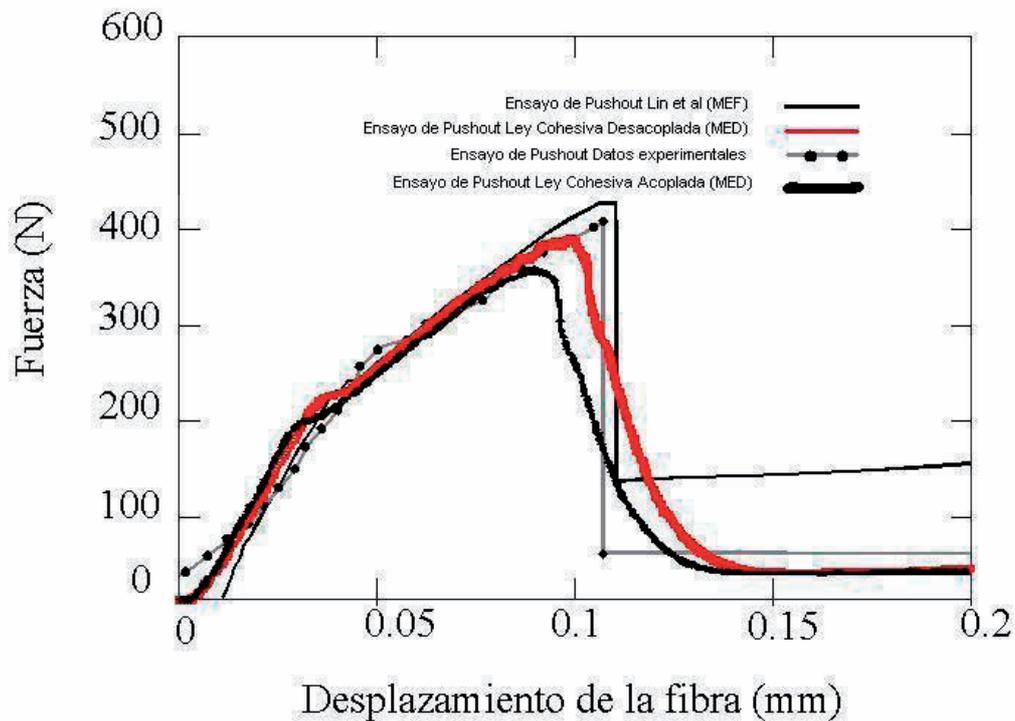


Figura 9: Curva carga-desplazamiento

El rol esencial del contacto friccional en la estabilidad del proceso de falla puede verse en la Figura 10, donde se comparan los ensayos de pushout y pullout, en función de la curva carga-desplazamiento.

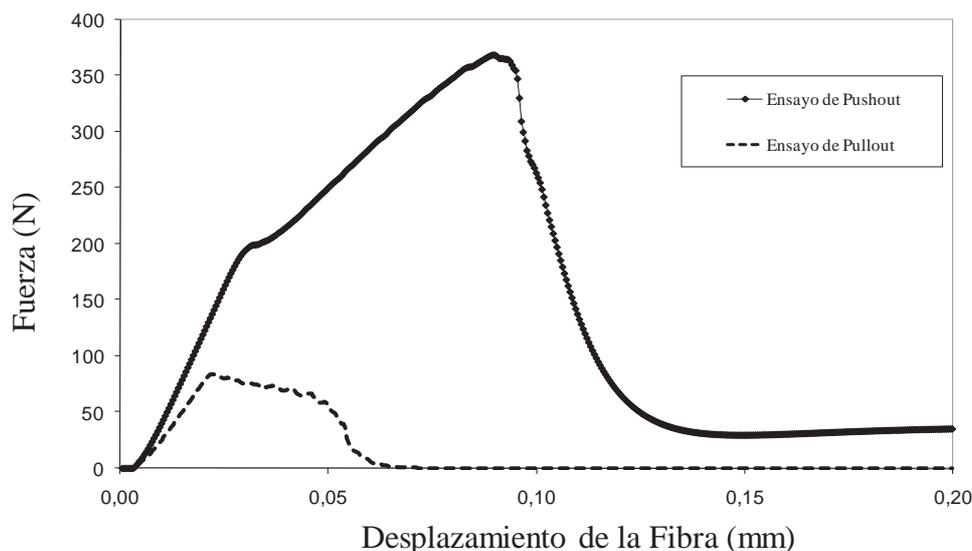


Figura 10: Comparación entre los ensayos de Pullout y Pushout utilizando una ley cohesiva acoplada (MED).

Se puede notar la drástica diferencia en las deformaciones y la falla. En el ensayo de pullout, la fibra, al no tener contacto con nada que impida su avance, presenta una segunda parte de la curva carga-desplazamiento descendente y una carga máxima cercana a un cuarto de la que se obtiene en el ensayo de pushout.

7 CONCLUSIONES

Se han utilizado dos modelos de leyes cohesivas o interfaciales para carga combinada, una desacoplada y otra acoplada, para caracterizar el comportamiento de la superficie de unión entre dos materiales mediante la aplicación del Método de los Elementos Discretos.

Estos modelos se han aplicado a la simulación de ensayos de pushout y pullout sobre un modelo de material compuesto (poliéster/epoxy) prismático con doble simetría de una sola fibra.

Con el fin de establecer un ejemplo de comparación, se tomaron como referencia los resultados obtenidos por [Bechel y Sottos \(1998\)](#) y [Lin et al \(2001\)](#).

El modelo de ley cohesiva con carga combinada desacoplada ha mostrado resultados muy aproximados a los datos experimentales en el caso de ensayos de pushout. Sin embargo se limita su uso al caso en que el ensayo para medir la fuerza interfacial, uno de los esfuerzos sea preponderante respecto del otro (ej. modo II es más importante que el modo I). Tal es el caso de los ensayos de pushout y pullout, donde el esfuerzo de corte es preponderante respecto del esfuerzo normal. No se ha probado su eficacia en otro tipo de ensayos de medición de fuerza cohesiva, por lo que se propone su evaluación para futuras investigaciones.

Los ensayos de pullout, en ambos casos, arrojaron resultados que discrepan bastante de los resultados obtenidos por [Lin et al \(2001\)](#) mediante el MEF. Se puede atribuir esta diferencia a que en esta fase de simulaciones no se han tenido en cuenta las tensiones residuales de contracción previa procedentes de la manufacturación de las probetas. Los resultados teniendo en cuenta este efecto se mostrarán en futuros trabajos. Aun así, las curvas carga-deformación presentan una primera fase lineal, a la que sigue una fase no lineal decreciente que culmina luego de manera brusca.

Los ensayos de pushout presentan gráficas carga-desplazamiento muy próximas a los resultados dados por datos experimentales y a los obtenidos por [Lin et al \(2001\)](#) mediante el

MEF. Dichas gráficas presentan las tres fases características en la curva carga-deformación, bien definidas.

Los resultados obtenidos también muestran que el MED puede ser una alternativa válida y económica, en términos de simplicidad y tiempo, al MEF, para el modelado de la ley cohesiva.

8 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contiene conclusiones presentadas en la Tesis de Maestría “Análisis numérico de la adhesión fibra matriz con un modelo de interfaces cohesivas acoplado” (Morel, 2011) y 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>). Los autores agradecen la colaboración del Dr. Ing. Ignacio Iturrioz del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UFRGS.

REFERENCIAS

- Abdul-Baqi, A., Schreurs, P. J., & Geers, M. G. Fatigue damage modeling in solder interconnects using a cohesive zone approach. *Int J Solids Struct*, 42, 927–42. 2005
- ASTM International. *Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesives in Cleavage Peel by Tension Loading*. (D 3807-98) 2004
- Barenblatt, G. I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Adv Appl Mech*, 7, 55-129. 1962
- Bechel, V., & Sottos, N. A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber pushout test. *Comp. Sci. Technol.*, 58, 1727-1739. 1998
- Bosch van den, M. J., Schreurs, P. J., & Geers, M. G. An improved description of the exponential Xu and Needleman cohesive zone law for mixed-mode decohesion. *Engng. Frac. Mech.*, 73, 1220-1234. 2006
- Brocks, W., Cornec, A., & Scheider, I. Computational Aspects of Nonlinear Fracture Mechanics. (I. In: Milne, R. Ritchie, & B. (. Karihaloo, Eds.) *Comprehensive Structural Integrity - Numerical and Computational Methods*, 3, 127 - 209. 2003
- Carpinteri, A. *Mechanical damage and crack growth in concrete*. Martinus Nijhoff Kluwer. 1986
- Geubelle, P., & Baylor, J. Impact-induced delamination of laminated composites: a 2D simulation. *Composites B*, 29, 589-602. 1998
- Hanson, J. H., & Bittencourt, T. N. Three-dimensional influence coefficient method for cohesive crack simulations. *Engng Fract Mech*, 71, 2109–24. 2004
- Hillerborg, A., Modeer, M., & Petersson, P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement Concrete Res.*, 6, 773-782. 1976
- Högberg, J. L. Mixed Mode Cohesive Law. *Int J Fract*, 141, 549–559. 2006
- Li, S., Thouless, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A., & Zavattieri, P. D. Use of mode-I cohesive-zone models to describe the fracture of an adhesively-bonded polymer–matrix composite. *Compos Sci Technol*, 65, 281–93. 2005
- Li, S., Thouless, M., Waas, A., Schroeder, J., & Zavattieri, P. Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer–matrix composite. *Eng Fract Mech*, 73, 64-78. 2006
- 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

- Morel, C. *Análisis numérico de la adhesión fibra matriz con un modelo de interfaces cohesivas acoplado*. Tesis de Maestría, Carrera de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNNE, 2011.
- Needleman, A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. *J Appl Mech*, 54, 525-531. 1987
- Needleman, A. Numerical modelling of crack growth under dynamic loading conditions. *Comp. Mech.*, 19 (6), 463-469. 1997
- Petersson, P. E. *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*. Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology. 1981
- Schwalbe K. H., Scheider I., Cornec A., *The SIAM method for applying cohesive models to the damage behavior of engineering materials and structures*, SIAM CM 09, GKSS – Forschungszentrum Geesthacht GmbH – Geesthacht – 2009.
- Tijssens, M. G., Van der Giessen, E., & Sluys, L. J. Modeling of crazing using a cohesive surface methodology. *Mech Mater*, 32, 19-35. 2000
- Tijssens, M. G., Sluys, L. J., & Van der Giessen, E. Simulation of fracture of cementitious composites with explicit modeling of microstructural features. *Engng Fract Mech*, 68, 1245–63. 2001
- Tvergaard, V. Effect of fibre debonding in a Whisker-reinforced metal. *Mater Sci Engng A* , 125, 203-13. 1990
- 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