

Simulación numérica del despegado fibra-matriz utilizando una ley cohesiva acoplada.

RESUMEN

El proceso de propagación de fisuras puede ser descrito por medio de modelos cohesivos. Una de las aplicaciones más importantes de las leyes cohesivas es del modelado del despegado de la interface fibra/matriz de un material compuesto (por ejemplo, hormigón armado reforzado con fibras). Es importante conocer las características y propiedades de la interface en un material compuesto. La resistencia al despegado se puede medir utilizando un ensayo de extracción de fibra por tracción o por compresión. Estas pruebas consisten básicamente en extraer una fibra de la matriz circundante.

Se presenta una simulación numérica en tres dimensiones de un ensayo de extracción de fibra, usando el método de los elementos discretos (MED) y un modelo de interface cohesiva para la zona de contacto fibra/matriz. El propósito principal de este trabajo es mostrar la capacidad de este método para capturar el deslizamiento friccional en la simulación del proceso de despegado de la fibra /matriz. El modelo numérico es aplicado a un compuesto polyester / epoxi, y el despegado de la fibra/matriz es simulado con una interface cohesiva acoplada.

El efecto de la variación del coeficiente de fricción y de la Resistencia interfacial en el mecanismo de falla del modelo es significativo. El modelo evaluado captura apropiadamente el deslizamiento friccional y produce resultados próximos a los valores experimentales.

Palabras clave: Ensayo de extracción de fibra, modelo de zona cohesiva, Método de los Elementos Discretos.

Mg. Ing. Morel Claudia A.¹

Mg. Ing. Cóceres Hector D.

Mg. Ing. Barrios D'Ambra, Ricardo J.

¹Mag. Ingeniera. Investigadora
Departamento de Mecánica Aplicada
E-mail: cmorel@ing.unne.edu.ar

²Mag. Ingeniero. Investigador
Departamento de Mecánica Aplicada

³Mag. Ingeniero. Investigador
Departamento de Mecánica Aplicada

Universidad Nacional del Nordeste

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son materiales que constan de varias fases. En general poseen dos, una llamada matriz y la otra fase, en muchas ocasiones, se encuentra dispersa dentro de la matriz, en forma de fibras que actúan como refuerzo. Esta dualidad presenta propiedades con grandes capacidades y por esta razón es muy utilizada en las diversas industrias.

Los mecanismos de falla en los materiales compuestos pueden ser clasificados en tres grupos: (1) falla por nucleación, crecimiento y fusión de vacíos en la matriz, (2) falla frágil del refuerzo, and (3) Despegado y fractura a lo largo de la interface entre la matriz y la fibra [1]. El presente trabajo se concentra en el mecanismo de despegado. Es importante conocer las características y propiedades de la adhesión entre las dos fases de un material compuesto. Se desea en general que la interface sea fuerte, porque una interface débil

podría crear un camino para la fácil propagación de fisuras en el material compuesto [2]. El control de la falla interfacial es una de las maneras más potentes de alterar las propiedades de un compuesto [1].

Barenblatt [3], describe los procesos cohesivos que se producen antes de la fractura en 1962. Las leyes cohesivas interfaciales caracterizan el comportamiento mecánico de la interface fibra-matriz en la micro escala en términos de algunas leyes mecánicas definidas.

Los modelos cohesivos fueron desarrollados en principio, para procesos de fractura en modo I y se extendieron después a procesos de fractura en modo II, en las cuales se consideran la tensión tangencial y la separación [4]. El comportamiento de una capa adhesiva depende del modo de fractura [5].

La zona del proceso de falla en el extremo de la fisura interfacial puede ser caracterizada en términos de leyes cohesivas y el deslizamiento friccional puede ser caracterizado en términos de leyes friccionales [6, 7].

La cuestión del diseño de la interface es compleja. Existen muchos parámetros que afectan la estructura de la interface a medida que se desarrolla durante el proceso de fabricación del compuesto o durante el uso del material [2].

La resistencia al despegado puede ser medida utilizando el ensayo de extracción de fibra: este test consiste en extraer una fibra de la matriz, ya sea por tracción o por compresión [8, 9, 10, 11]. Este enfoque es puramente fenomenológico, no se requiere conocimiento detallado del proceso físico. Sin embargo, se mide el valor clave que es la resistencia al despegado y que puede ser usado como mecanismo de diseño.

Se utilizaron dos referencias para comparar resultados: una simulación con Método de los Elementos Finitos (MEF) realizada por Lin et al. [11] y un conjunto de observaciones experimentales muy detalladas efectuadas por Bechel y Sottos [8].

El presente trabajo presenta una simulación numérica de un ensayo de extracción de fibra

por compresión (push-out) en tres dimensiones, utilizando el MED y un modelo de interface cohesiva fibra/matriz par la zona de contacto. Se hace uso de una ley cohesiva normalizada acoplada [11, 5]. El objetivo es poder caracterizar el deslizamiento friccional del ensayo de extracción de fibra utilizando la ley friccional de Coulomb. La precisión de la simulación será evaluada comparando resultados con los datos experimentales. También se evaluarán la influencia de la variación del coeficiente de fricción y de la resistencia interfacial.

El artículo está organizado en 4 secciones. La Sección 1 contiene la introducción; la Sección 2 describe el ensayo y la ley cohesiva normalizada acoplada utilizada en el análisis. Los resultados obtenidos y la comparación con los datos experimentales y otras simulaciones numéricas se discuten en la Sección 3. La sección 3 también contiene la influencia de la variación de dos parámetros no geométricos. Finalmente las conclusiones se presentan en la sección 4.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Formulación básica del Método de los elementos discretos

El Método de los Elementos Discretos (MED) utilizado en este trabajo, representa el continuo por medio de un arreglo espacial periódico de barras con masas concentradas en sus extremos. A cada nodo interno le corresponde una masa concentrada de $(\rho L^3/2)$, donde ρ es la densidad y L la longitud de un módulo cúbico. Los nodos tienen una masa de $(\rho L^3/16)$ si se localizan en las esquinas, $(\rho L^3/8)$ en los bordes y $(\rho L^3/4)$ sobre una superficie libre. La discretización utiliza un módulo cúbico básico construido usando 20 elementos de barras y 9 nodos; ver Fig. 1 (a) y (b). Cada nodo posee tres grados de libertad, los cuales son los tres componentes del vector desplazamiento en el sistema de referencia global [12]

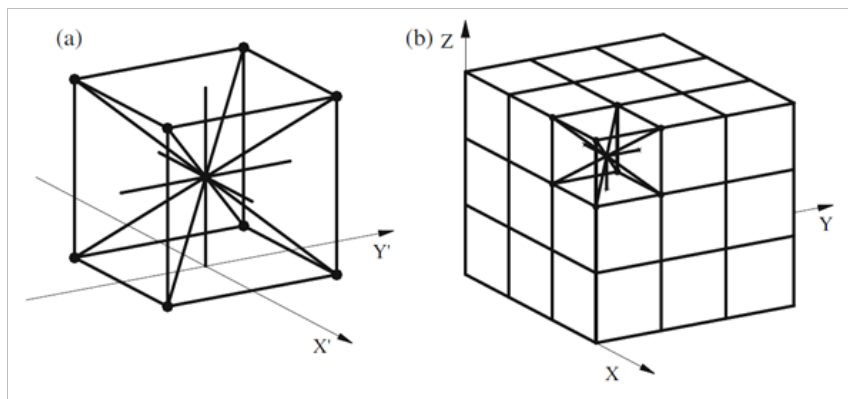


Figura 1: a) Detalle del arreglo cúbico, b) Prisma compuesto de varios módulos cúbicos.

Las aplicaciones en el área de la construcción civil y de ingeniería de suelos, puede encontrarse en los trabajos de Riera e Iturrioz [13,14], Schnaid et al., [15], Dalguer et al., [16], Rios y Riera [17], Miguel et al. [18].

Las ecuaciones de movimiento fueron obtenidas de las condiciones de equilibrio de todas las fuerzas actuantes sobre las masas nodales, resultando en un sistema de ecuaciones de la forma:

$$M \cdot \ddot{u} + K \cdot u = q(t) \quad (1)$$

Donde M y K son las matrices de masa y amortiguamiento, u y \ddot{u} denotan los vectores del desplazamiento nodal y la aceleración generalizada respectivamente. El vector $q(t)$ contiene las fuerzas externas aplicadas. La ecuación (1) puede ser integrada numéricamente en el dominio del tiempo haciendo uso de un esquema clásico de integración explícita (Método de las Diferencias Finitas Centrales).

EL MED posee una habilidad natural para modelar fisuras. Pueden ser introducidas en los modelos como característica pre-existente y como efecto irreversible de la nucleación y propagación de una fisura. Las fisuras pre-existentes son modeladas usando una estrategia simple, que consiste en duplicar los nodos localizados en la superficie de la fisura junto con la eliminación de los elementos que conectan el material en ambas caras de la fisura. De esta manera, la discretización del

MED está habilitada para “abrir” la fisura a lo largo de su posición, las fisuras pre-existentes son integradas sin problemas dentro de la formulación del MED. La nucleación y propagación hacen uso de los modelos constitutivos para daño de materiales que permite a los elementos romperse cuando han alcanzado una condición crítica. Los detalles sobre la formulación e implementación de estos modelos constitutivos no lineales son dados en trabajos previos [12].

Los estudios sobre la convergencia de la malla que fueron realizados con el MED se muestran en Kosteski et al. [12]; Miguel et al. [19].

2.2 Ley Cohesiva

Se utiliza una ley cohesiva acoplada a fin de describir el proceso de separación en los ensayos de push-out.

El modelo de zona cohesiva consiste en una relación constitutiva entre las tracciones T que actúan sobre la interface y la correspondiente separación D [11]. La magnitud de T se incrementa, alcanza un máximo y luego cae hasta cero progresivamente a medida que ocurre la separación. Los investigadores Lin et al. [11] modificaron el modelo de falla cohesiva bilineal que utilizaron Geubelle y Baylor [20] para tener en cuenta el contacto friccional entre las nuevas superficies de fractura creadas. Se adoptó la ley friccional de Coulomb para el deslizamiento friccional, dando las siguientes ecuaciones:

$$T_N = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_{max}} \delta_N & \text{for } \delta \leq \delta_{max} \\ \frac{\sigma_{max}}{\delta} \frac{1-\delta}{1-\delta_{max}} \delta_N & \text{for } \delta > \delta_{max} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_N = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_{max}} \delta_N & \text{for } \delta \leq \delta_{max} \\ \frac{\sigma_{max}}{\delta} \frac{1-\delta}{1-\delta_{max}} \delta_N & \text{for } \delta > \delta_{max} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_T = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\delta_{max}} \frac{\Delta_N^C}{\Delta_T^C} \delta_T & \text{for } \delta \leq \delta_{max} \\ \frac{\sigma_{max}}{\delta} \frac{1-\delta}{1-\delta_{max}} \frac{\Delta_N^C}{\Delta_T^C} \delta_T & \text{for } \delta > \delta_{max} \\ sign(\Delta_T) \mu T_N & \text{for } |T_T| < \mu |T_N| \end{cases} \quad (4)$$

Se usa un algoritmo de contacto para forzar la condición $\delta_N = 0$.

δ_N , δ_T y δ denotan los saltos de desplazamiento adimensionales normal, tangencial y total, definidos por:

$$\delta_T = \sqrt{\delta_{T,1}^2 + \delta_{T,2}^2} \leq \delta_{T,0} \quad (6)$$

Se observó en las simulaciones que la magnitud de $\delta_{T,2}$ (salto de desplazamiento en el eje "z") era despreciable.

Siguiendo a Lin [11], el máximo valor de T_N es Δ_{max} y ocurre cuando $\Delta_N = \delta_{max} \Delta_N^C$. El máximo valor de $|T_T|$ es τ_{max} dado por:

$$\tau_{max} = \sigma_{max} \Delta_N^C / \Delta_T^C \quad (7)$$

2.3 MODELO FIBRA-MATRIZ

El modelo utilizado en las simulaciones poseen propiedades similares al evaluado por Bechel et al. [8] y Lin et al. [11]. Consiste en una matriz prismática de material epoxy que contiene una sola fibra de polyester. Un diagrama del modelo se muestra en la Fig. 2.

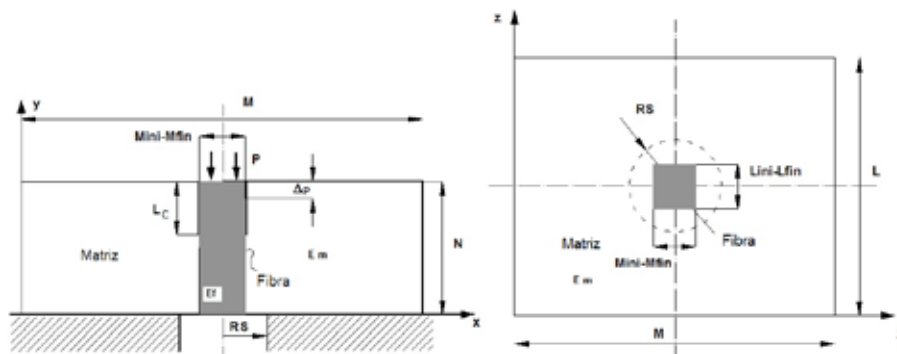


Figura 2: Diagrama del ensayo de push-out.

Que se logra cuando $|\Delta T| = d_{max} DCT$. El ensayo de push-out desarrolla casi exclusivamente esfuerzos de corte y la contribución desde el modo normal de apertura es casi despreciable [11].

Högberg [5], utilizó una ley cohesiva para caracterizar el comportamiento de una viga doble en voladizo asimétrica (en inglés Unsymmetrical Double Cantilever Beam, UDCB) y una viga doble en voladizo (double Cantilever Beam, MCB). Adoptó en su trabajo separaciones normalizadas tangenciales y normales, dN y dT (Ec. 5) así como también tracciones normalizadas: $dN = T_N / d_{max}$; $dT = T_T / t_{max}$.

El parámetro q , está dado por la tasa de desplazamiento adimensional normal y tangencial:

$$\tan \theta = \frac{\delta_N}{\delta_T} \quad (8)$$

El modo normal puro I es equivalente a $\theta = \pi/2$, y el modo puro II corresponde a $\theta = 0$.

Para cada combinación de modos, θ , en el rango de $[0, \pi/2]$, existe una tracción, S , en relación a la medida de la deformación, λ , definida por:

$$S(\delta, \theta) = \begin{cases} \frac{\delta}{\delta_p(\theta)} & \text{for } 0 < \delta \leq \delta_p \\ \frac{1-\delta}{1-\delta_p(\theta)} & \text{for } \delta_p < \delta \leq 1 \\ 0 & \text{for } \delta > 1 \end{cases} \quad (9)$$



En cuanto a la curva desplazamiento-longitud despegada, que se ve en la Fig. 5, los resultados del MED muestran una forma y pendientes similares a los valores experimentales y resultados con el MEF. La curva correspondiente al MED difiere respecto de las curvas del MEF y de los datos experimentales en el valor de desplazamiento para el cual el proceso de despegado se inicia. El valor del desplazamiento es menor para los resultados con el MED. Aun así, el valor de la longitud despegada para el inicio del proceso de despegado y el correspondiente a la inestabilidad, son muy próximos: 1 mm para el inicio del proceso y 4 mm para la parte final del despegado inestable.

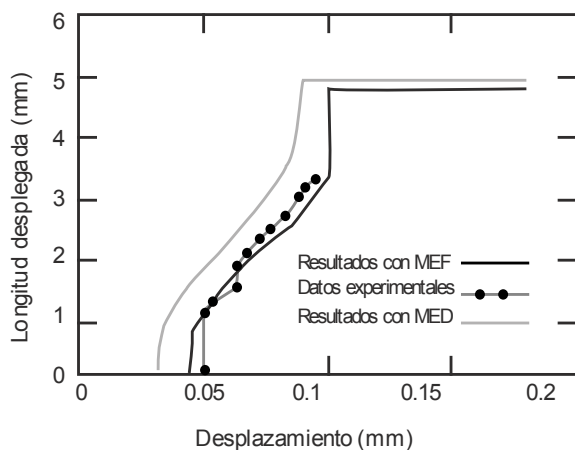


Figura 5: Comparación entre resultados experimentales, MEF y MED para un ensayo de push-out efectuado en un modelo de compuesto polyester/epoxy, curva longitud despegada vs. desplazamiento de la fibra.

3.2 Variación de parámetros

Existen varios parámetros que afectan el comportamiento global de la fractura y la carga-deformación de un compuesto. El análisis dimensional identifica varios grupos adimensionales [11]. Entre ellos, se han elegido dos parámetros no geométricos para su evaluación: este trabajo presenta el efecto del coeficiente de fricción (μ) y la resistencia interfacial (σ_c).

3.2.1 Coeficiente de fricción

La Fig. 6 muestra las curvas carga-desplazamiento para tres valores diferentes del coeficiente de fricción $\mu = 0,32$; $0,52$ y $0,72$. Estos valores se encuentran dentro del rango de μ medidos para varios polímeros más comunes utilizados de deslizamiento en superficies epoxy [9]. El incremento del coeficiente de fricción afecta el comportamiento en la falla de la interface fibra-matriz. A medida que el valor de este coeficiente aumenta, lo hace también el valor de la carga máxima sobre la fibra para su extracción, retrasando la falla.

En cuanto a la longitud despegada, la Fig. 7 muestra que el incremento en el coeficiente de fricción produce un retraso en el despegado interfacial. El proceso de despegado comienza con una separación inestable de aproximadamente 1 mm para todos los valores de μ . Luego incrementa linealmente su valor respecto del desplazamiento de la fibra.

Como observa Lin [11], aunque valores mayores del coeficiente de fricción retrasan el proceso de falla incrementando la capacidad de carga, este no afecta el valor de la longitud de la fisura en la parte inestable del despegado. Para todos los valores de μ observados, esta longitud de fisura es de aproximadamente 4 mm.

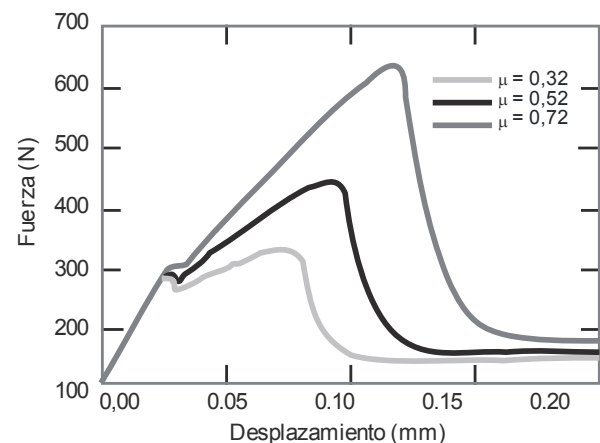


Figura 6: Efecto del coeficiente de fricción μ en la curva carga-deformación.

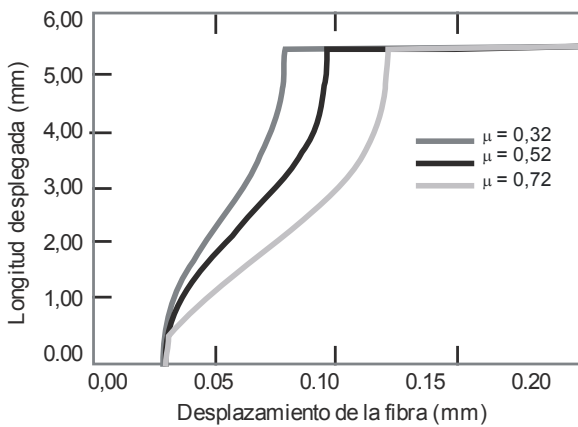


Figura 7: Efecto del coeficiente de fricción μ en la predicción de la evolución de la longitud despegada.

3.2.2 Resistencia interfacial

Los valores para el desplazamiento crítico son:

$\Delta t_c = \Delta n_c = 0,01$ mm. La figura 8 muestra el efecto del incremento de la resistencia interfacial. A medida que la resistencia crece, también lo hace la carga máxima antes de la falla inestable. El deslizamiento friccional no es afectado por este incremento y la pendiente de la curva carga-desplazamiento es la misma para los tres valores diferentes de la resistencia interfacial.

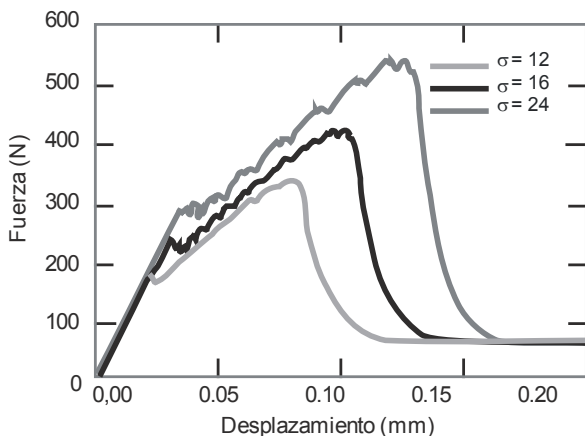


Figura 8: Efecto de la resistencia interfacial σ_{max} (dado en MPa), carga versus desplazamiento de la fibra.

En la Figura 9, se observa un retardo en el inicio del desplazamiento de la fibra, con el incremento de la resistencia interfacial, pero manteniendo al mismo tiempo la misma pen-

diente para la falla inestable inicial y final. La medida de la falla final es para las tres curvas, cercana a 4 mm.

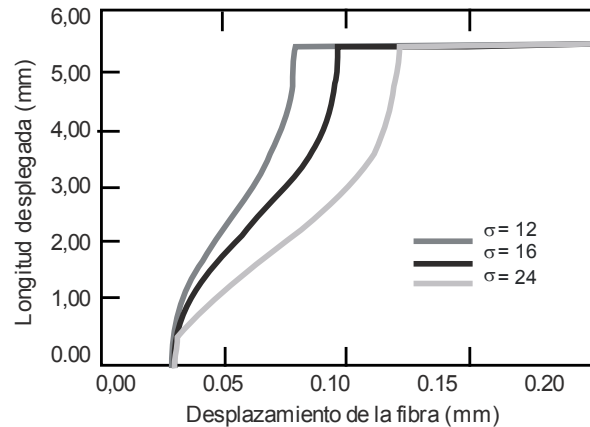


Figura 9: Efecto de la resistencia interfacial σ_{max} (dado en MPa), longitud despegada versus desplazamiento de la fibra.

4 CONCLUSIONES

Se ha utilizado para simular el comportamiento de la falla interfacial de un compuesto fibra- matriz una ley cohesiva acoplada de modo combinado con una ley de fricción de Coulomb, obteniendo una propagación de fisura bajo tensiones de corte dominante en un modelo tridimensional de un ensayo de extracción de fibra de un compuesto polyester epoxy mediante el uso del MED.

Se ha efectuado la comparación con los valores obtenidos con otras simulaciones [11] y con mediciones experimentales, ver Fig. 4, la cual indica que el modelo propuesto posee una buena concordancia con los resultados esperados para el proceso de falla observado.

Los parámetros observados, afectan el comportamiento de la falla de esta clase de materiales. El incremento en el coeficiente de fricción y de la resistencia interfacial, produce un retraso en la inestabilidad asociada con el despegado completo de la interface fibra- matriz, resultando en una mejorada capacidad de carga.

El método de simulación con la técnica del MED, puede ser considerada una buena herramienta de simulación para el proceso de

separación en un material compuesto. El modelo presentado en este artículo captura el proceso de deslizamiento friccional adecuadamente y produce resultados muy próximos a los resultados experimentales.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es parte de un proyecto en el Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Los autores desean agradecer a la Secretaría General de Ciencia y Técnica y a la UNNE por su apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NEEDLEMAN, A.; NUTT, S. R.; SURESH, S.; TVERGAARD, V. (1993). *Matrix, reinforcement, and Interfacial Failure*. In: *Fundamentals of Metal-Matrix Composites*. Butterworth-Heinemann. p. 233-250.
- [2] MORTENSEN, A.; EUSTATHOPOULOS, N. (1993). *Capillary Phenomena, Interfacial Bonding, and Reactivity*. In: *Fundamentals of Metal Matrix Composites*. Butterworth-Heinemann. p. 42-60.
- [3] BARENBLATT, G. I. (1962). *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. *Advances in Applied Mechanics*, v. 7, p. 55-129.
- [4] SØRENSEN, B.; JACOBSEN, T. (2003). *Determination of cohesive laws by the J integral approach*. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 70, p. 1841-1858.
- [5] HÖGBERG, J. L. (2006). *Mixed Mode Cohesive Law*. *International Journal of Fracture*, v. 141, p. 549-559.
- [6] NEEDLEMAN, A. (1987). *A continuum model for void nucleation by inclusion debonding*. *Journal of Applied Mechanics*, v. 54, p. 525-531.
- [7] TVERGAARD, V.; HUTCHINSON, J. (1992). *The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 40, p. 1377-1397.
- [8] BECHEL, V.; SOTTOS, N. (1998a). *A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber pushout test*. *Composites Science and Technology*, v. 58, p. 1727-1739.
- [9] BECHEL, V.; SOTTOS, N. (1998b). *Application of debond length measurements to examine the mechanics of fiber push out*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 46, p. 1675-1697.
- [10] BECHEL, V.; SOTTOS, N. (1998c). *The effect of residual stresses and sample preparation on progressive debonding during the fiber pushout test*. *Composites Science and Technology*, v. 58, p. 1741-1751.
- [11] LIN, G.; GEUBELLE, P. H.; SOTTOS, N. R. (2001). *Simulation of fiber debonding with friction in a model composite pushout test*. *International Journal of Solids and Structures*, v. 38, p. 8547-8562.
- [12] KOSTESKI, L.; ITURRIOZ, I.; BATISTA, R. G.; CISILINO, A. P. (2011). *The truss-like discrete element method in fracture and damage mechanics*. *Engineering Computations*, Vol. 28, pp.765 – 787.
- [13] RIERA, J.D.; ITURRIOZ, I. (1995). *Discrete element dynamic response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading*. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, v. 11, p. 417-426.
- [14] RIERA, J.D.; ITURRIOZ, I. (1998). *Discrete element model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading*. *Nuclear Engineering and Design*, v. 179, p. 135-144.
- [15] SCHNAID, F.; SPINELLI, L.; ITURRIOZ, I.; ROCHA, M. (2004). *Fracture mechanics in ground improvement design*. *Ground Improvement*, v. 8, p. 7-15.
- [17] RIOS R.D.; RIERA, J.D. (2004). *Size effects in the analysis of reinforced concrete structures*. *Engineering Structures*, v. 26, p. 1115-1125.
- [18] MIGUEL L.F.F.; RIERA, J.D.; ITURRIOZ, I. (2008). *Influence of size on the constitutive equations of concrete or rock dowels*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 32, p. 1857-1881.
- [19] MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I.; RIERA J. D. (2010). *Size effects and mesh independence in dynamic fracture analysis of brittle materials*. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, v. 56, n. 1, p. 1-16.
- [20] GEUBELLE, P.; BAYLOR, J. (1998). *Impact-induced delamination of laminated composites: a 2D simulation*. *Composites B*, v. 29, p. 589-602.
- [21] MOREL C.; CÓCERES H.; BARRIOS R. (2011). *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.