



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS POR FIBRAS CORTAS: ESTUDIO UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS.

SHORT FIBER REINFORCED COMPOSITES: ANALYSIS USING LATTICE MODEL.

Bruno Uberti (P) (1), Nestor Rossi Cabral (2), María Agustina Invaldi (2), Ricardo Barrios D`ambra (1), Ignacio Iturrioz (3)

(1) Profesor, Mec. Aplicada, UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina. (2) Estudiante Ing Civil, UNNE. (3) Profesor Asociado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil
Dirección para correspondencia: Bruno Uberti" < ing_uberti@hotmail.com >; (P) Presentador

Resumen: El uso de materiales multifásicos permite obtener un nuevo material con propiedades más adecuadas al uso que se le quiera dar al compuesto. En la interacción de las fases influyen tanto las propiedades mecánicas intrínsecas de éstas como la topología y escala en las cuales ellas forman la micro estructura del material compuesto. Por otro lado, las herramientas que provee la mecánica computacional han permitido en las últimas décadas realizar avances significativos combinando modelos analíticos muy poderosos, que resuelven problemas con geometría y condiciones de contorno simples, con modelos numéricos. Para simular problemas donde se esperan discontinuidades, puede ser más conveniente utilizar alguna versión del método de los elementos discretos, donde la hipótesis del medio continuo puede ser violada naturalmente. Se considera importante en el desarrollo de un material compuesto estudiar los diferentes mecanismos de trabajo que se dan en diferentes escalas, en este contexto al estudiar materiales compuestos por una matriz a la cual se incorpora fibras como una segunda fase, conocer la interacción entre la matriz y una fibra aislada es de importancia crucial. En el presente trabajo se estudia el proceso de daño de la estructura formada por una fibra que une dos partes de una matriz cuasi frágil fisurada. Se estudia la relación entre los diversos parámetros que definen la configuración mencionada con los mecanismos de daño que se manifiestan en la estructura en su camino hacia el colapso. Los resultados obtenidos son comparados con evidencias experimentales y modelos teóricos publicados por otros autores para verificar la consistencia de los mismos y verificar la potencialidad de la herramienta utilizada.

Palabras-clave: Método de Elementos Discretos, Mecánica de Fractura, Compuestos con fibras cortas.

Abstract

The use of multiphase materials makes possible to obtain a new material with properties that might be more appropriate for the skill necessities that we want to give to the composite. The phases interaction is influenced by the intrinsic mechanical properties and by the topology and scale in which the constituents participate in the microstructure of the composite. On the other hand, in the last decades the computational mechanics had made significant advances by combining powerful analytical models that solve problems with simple geometry and boundary conditions with numerical models. Among the numerical models that could be used stand out methods based on the continuum media, such as the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method (BEM). To simulate problems where discontinuities are expected, it could be more convenient to use some version of the discrete element method, where the continuum hypothesis can be cracked naturally. In composites developing it is important to study the work mechanisms in different scales. In this way, when fibers works as a second phase reinforcing mortar matrix, it is crucial to evaluate the interaction between both matrix and fibers. This work presents the study of the damage process of a structure formed by a fiber that connects two parts of the fissured matrix. It is also studied the relation between the several parameters that define the configuration mentioned with the damage mechanisms that appeared in the structure on its way to the collapse. The results are compared with experimental evidences and theoretical models published by other authors to verify the consistency of them, and also verify the potentiality of the method used in this study.

Keywords: Discrete Element Method, short fiber composite, fracture mechanics.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

INTRODUCCIÓN

La combinación de materiales con propiedades y topologías adecuadas permite crear una gama de nuevos materiales que pueden cumplir en forma más efectiva la función para la que fue proyectado. De esta forma materiales con nuevas propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas pueden ser creados y utilizados en aplicaciones específicas. En las últimas décadas soluciones analíticas combinadas con la mecánica computacional permitieron desarrollar metodologías de análisis que facilitan el diseño de estos nuevos materiales. Referencias sobre estos métodos pueden ser encontradas en los textos clásicos Nemat (2000) y Torquato (2002). En el caso específico de las propiedades mecánicas de una matriz formada por un material que tenga baja tenacidad intrínseca se puede incrementar esta propiedad si es adicionada una segunda fase formada por fibras, pero este incremento de la tenacidad del compuesto podrá deberse no solo a la ductilidad de las fibras sino también a la topología de las mismas, nos referimos a la caracterización estadística de su longitud, orientación en que estarán dispuestas, y propiedades de la interface fibra matriz. La interacción de estos elementos crea la microestructura con la cual el compuesto se organiza internamente.

Los materiales compuestos son utilizados en todos los campos de la ingeniería moderna; específicamente en la construcción civil, el hormigón simple y armado es un ejemplo de material compuesto utilizado actualmente en forma masiva en la infraestructura (represas, puentes, canales), y en la construcción de edificios de los más variados tipos.

Otros compuestos tienen su aplicación específica como las cerámicas reforzadas con fibras metálicas, o compuestos cuasi frágiles reforzadas con fibras de kevlar. La gran cantidad de referencias que estudian el comportamiento mecánico de estos compuestos es prueba de su gran interés tecnológico. En el caso de materiales compuestos formados por la mezcla de una matriz homogénea y fibras hay una gran cantidad de referencias entre las cuales se puede mencionar el libro clásico de Friedrich (1989), y el trabajo Zhang (2012). El mecanismo de aumento de tenacidad en estos compuestos consiste en que la matriz transfiere parte de la tensión aplicada a las fibras, que resisten una porción de la carga. Para lograr que el compuesto fibra-matriz tenga un rendimiento estructural mayor que la matriz, será necesario que el módulo de elasticidad de la fibra sea mayor que el de la matriz, por lo tanto tendrá una resistencia a la tracción elevada. Esto último hace necesario que la adherencia entre ambos materiales sea alta para evitar el arrancamiento de las fibras.

El aumento de la tenacidad de los compuestos formados por la adición de fibras está directamente relacionado con los micromecanismos de daño que se crean entre las fases intervinientes. Estudiando la forma en que una fibra mantiene unida dos partes fisuradas de la matriz, es posible entender y prever cual será el comportamiento del conjunto. Diversos mecanismos de degradación característicos (spalling, debonding, snubbing) van a aparecer durante el proceso de daño, la conexión de ellos con el comportamiento global del compuesto es de gran importancia práctica. Los trabajos de Ward and Li (1990) y Li et al (1991) son pioneros en este tipo de estudios. Posteriores estudios siguiendo esta misma línea son los realizados por Wang and Friedrich (2013).

La mayoría de los estudios numéricos realizados en este tipo de materiales fue desarrollado utilizando el método de los elementos finitos como los presentados en Barragan (2006), Brighenti et al (2013a) y Brighenti et al (2013b). La dificultad de modelar grandes discontinuidades utilizando esta metodología puede ser resuelta con técnicas como el método de las interfaces cohesivas presentada originalmente por Needelman (1990) y otras técnicas como la presentada por Oliver et al (2009). Estas técnicas implican en evitar violar la hipótesis del

continuo sobre la cual el método de los elementos finitos edifica su marco teórico. Una alternativa para el estudio de problemas donde el campo de desplazamientos sufre discontinuidades es emplear el método de los elementos discretos. Varios autores han presentado alternativas en ese sentido, entre ellos Schlangen and Van Mier (1995) y Spagnoli et al (2009). En estos métodos el medio a estudiar es representado por nodos que interactúan entre sí a través de fuerzas que pueden ser representadas por barras.

En el presente trabajo se realiza el estudio de dos partes fisuradas de una matriz que están unidas por una fibra; el modelo es analizado como plano (estado plano de deformaciones) sobre el cual se aplica una sollicitación monotónicamente creciente, identificando en la simulación los mecanismos de daño típicos que ocurren en la interacción fibra matriz. Se presenta la ley utilizada para captar el comportamiento del material de interface entre fibra y matriz. Utilizando el Método de los Elementos Discretos formado por barras (MED), son presentadas tres configuraciones, son los casos de fibras que atraviesan el plano de fisuras a 90°, 60° y 30°, considerando el baricentro de la fibra en coincidencia con el plano de la fisura ($z=0.0\text{mm}$). Los resultados obtenidos son utilizados para interpretar como es el proceso de ruptura en el nivel de la microestructura del compuesto. Finalmente, en las conclusiones del trabajo son presentadas las ventajas de la metodología utilizada en este tipo de problemas

1. EL METODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS APLICADO A MATERIALES CUASI-FRAGILES

La versión del método dos elementos discretos, utilizado en este artículo, fue propuesto originalmente por Riera (1984) y representa el continuo por medio de un arreglo regular, formado por barras, con la masa del continuo concentrada en los nodos. La discretización utilizada emplea un módulo cúbico básico formado por 20 elementos y 9 nodos, presentados en las Fig.1 (a),(b). Cada nodo tiene tres grados de libertad, que corresponden a las componentes del vector de desplazamientos.

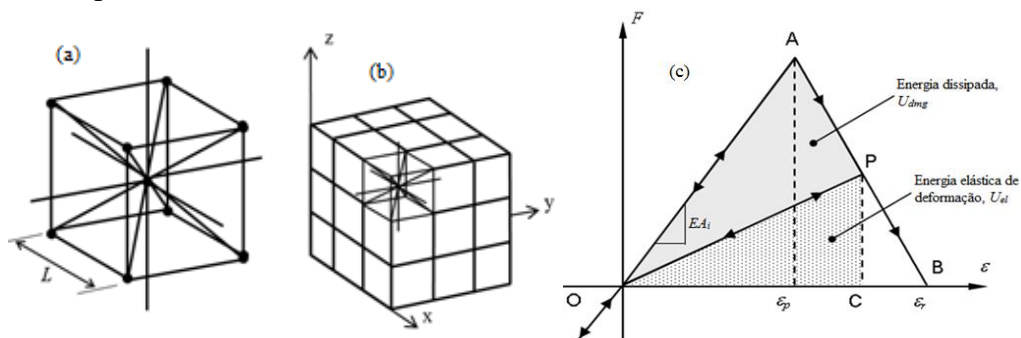


Figura 1 - Estrategia de discretización en el MED: (a) Módulo cúbico básico, (b) Generación de un cuerpo prismático con MED y (c) Ley bi-lineal utilizada en los elementos discretos.

Las ecuaciones que relacionan las propiedades de los elementos con las constantes elásticas de un medio elástico isotrópico son:

$$\delta = \frac{9\nu}{4-8\nu}, \quad EA_n = EL^2 \frac{(9+8\delta)}{2(9+12\delta)}, \quad EA_d = \frac{2\sqrt{3}}{3} A_n \quad (1)$$

En las cuales E y ν representan el módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente, y A_n, A_d las áreas transversales de los elementos normales y diagonales. Las ecuaciones de movimiento resultantes de esta discretización pueden ser escritas en la forma tradicional:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}} + \mathbf{C}\dot{\vec{x}} + \vec{F}_r(t) - \vec{P}(t) = 0 \quad (2)$$

Donde \vec{x} representa el vector de desplazamientos generalizados, \mathbf{M} la matriz de masa diagonal, \mathbf{C} la matriz de amortiguamiento, también diagonal, $\vec{F}_r(t)$ es el vector de las fuerzas internas que actúan en las masas nodales y $\vec{P}(t)$ es el vector de las fuerzas externas. Obviamente si \mathbf{M} y \mathbf{C} son diagonales, la Eq. (2) es desacoplada en un esquema explícito que puede ser utilizado para integrarlas en el dominio del tiempo.

Como las coordenadas son actualizadas en cada incremento de tiempo, grandes desplazamientos son considerados en forma natural.

1.1. Ley constitutiva no lineal para modelar el daño en materiales cuasi frágiles.

Rocha et al. (1991) extendieron el método de los elementos discretos para modelar el comportamiento de materiales cuasi-fragiles. Para esto se utilizó una ley bi-lineal presentada en la Fig. 1 c. Esta ley constitutiva permite capturar los efectos irreversibles de la nucleación de fisuras y de su posterior propagación, teniendo en cuenta la reducción de la capacidad de la carga. El área debajo de la curva fuerza vs deformación (triángulo OAB en la Fig 1.c), representa la densidad de la energía necesaria para fracturar el área de influencia del elemento. Así, para un punto P dado en la curva fuerza vs deformación, el área del triángulo OPC representa, la densidad de energía elástica guardada en el elemento, que puede ser devuelta al sistema, y el área del triángulo OAP es proporcional a la energía específica de fractura G_f . Cuando la densidad de energía disipada es igual a la energía de fractura necesaria para romper un elemento, este pierde su capacidad de carga a tracción. Por otro lado, a compresión, el comportamiento del elemento permanece lineal elástico. Así la falla a compresión es inducida por tracción indirecta.

Una explicación más detallada para esta versión del modelo se puede encontrar en Koteski et al (2016).

Las características aleatorias del material son introducidas en el modelo tradicionalmente considerando la energía específica de fractura como un campo aleatorio con tipo de distribución, media, coeficiente de variación y longitud de correlación especificados. Otra fuente de variabilidad que puede ser especificada es considerar la perturbación de la malla, siendo que esto se ha considerado fundamental en el desempeño del método para capturar la resistencia a compresión de materiales cuasi-frágiles. Aplicación del MED en la simulación de eventos de emisión acústica también se pueden encontrar en Iturrioz et al (2013a) e Iturrioz et al (2013b)

2. PROCESOS DE RUPTURA DE MATERIALES COMPUESTOS

El estudio del proceso de ruptura de materiales compuestos formados por fibras incorporadas a una matriz puede ser estudiado en varias escalas del problema. El efecto de aumento de la tenacidad (también llamado tenacificación o toughening en inglés) que fibras cortas producen en la matriz es conocido y aplicado en el desarrollo de este tipo de materiales.

Entre los estudios clásicos de problemas vinculados a la interacción fibra matriz se pueden mencionar Brandt (1985), Brebbia (1984), Budiansky et al. (1986) y Cao et al. (1990). Mecanismos típicos ya identificados se suceden durante el proceso de ruptura del conjunto fibra-matriz, conocidos como debonding, spalling y snubbing los cuales hacen que la descripción del aumento de la tenacidad sea complejo. Para describir estos fenómenos, como se ilustra en la Figura 2, consideramos una fibra que atraviesa una fisura en un sólido y se aplican tensiones en el sentido de abrir la fisura (Modo I). En este contexto describimos brevemente los fenómenos antes citados:

Debonding: Si la fibra es activada por tensiones que tienden a abrirla, la fibra antes de desprenderse de la matriz produce tensiones en su interface que tienen una distribución característica y un valor máximo bien marcado. En esta situación la fibra puede romper o puede romperse la interface entre la fibra y la matriz aconteciendo en este último caso el debonding o despegue de la fibra.

Spalling: En el caso en que la fibra está inclinada respecto al plano definido por la fisura, es posible que las tensiones debajo de la fibra inclinada cerca del punto donde la fibra sale de la matriz (ver región A en la Figura 2b) sean mayores que la resistencia de la matriz, entonces se produce la ruptura de la matriz cercana al punto de salida de la fibra. Este efecto se conoce como spalling y es ilustrado en la Figura 2b. Si la extensión del spalling sobrepasa la longitud embebida de la fibra, la misma pierde su contribución en el aumento de tenacidad; si la extensión es menor, las tensiones liberadas eliminan la posibilidad de la ruptura de la fibra, en otras palabras, la fibra permanece intacta y puede contribuir al aumento de tenacidad.

Snubbing: Después de que se produce el despegue (debonding), la fibra comienza a ser extraída fuera de la matriz, avance indicado como S_f en la Figura 2c. La superficie despegada de la fibra puede deslizarse con respecto a la matriz, comenzando un proceso de fricción entre fibra y matriz. En el punto de salida, donde la fibra comienza a sobresalir de la cara de la fisura, la matriz actúa como una polea con fricción. La tensión en esta zona de la fibra se incrementa exponencialmente, este efecto es denominado de snubbing.

La combinación de los efectos de spalling y snubbing hacen que el aumento de tenacidad debido a la interacción fibra-matriz sea complejo. Estos dos efectos se presentan únicamente cuando la dirección de la fibra y la fuerza aplicada no están alineadas. Entre los trabajos que estudian el efecto del spalling en la tenacificación del compuesto de una matriz formada por fibras se puede citar el trabajo de Wang and Friedrich (2013).

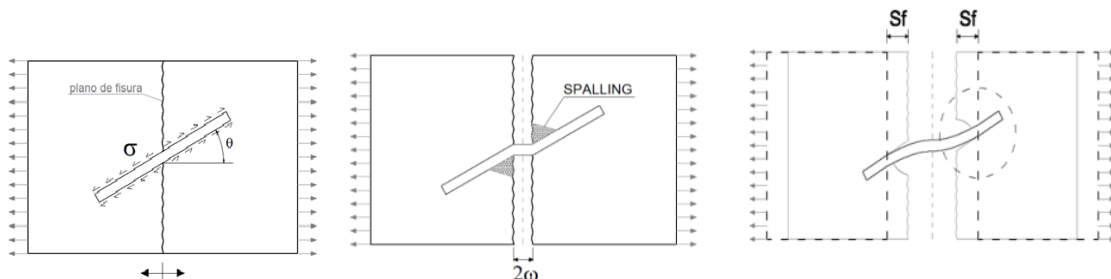


Figura 2: Descripción de los mecanismos de falla en la interacción entre una fibra que atraviesa una matriz fisurada. (a) Despegue (Debonding), (b) (Spalling), (c) (Snubbing) .

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA A SER ESTUDIADO

En esta sección se presenta las características de los modelos numéricos construidos para estimar la fuerza de puente “F” que toman fibras individuales dentro de una matriz homogénea

que están inclinadas 30° , 60° y 90° respecto al plano de la fisura que atraviesa la matriz mencionada.

El estudio se centra en un material compuesto de matriz frágil reforzado por fibras cortas, el cual se encuentra fisurado y es solicitado por tensiones externas normales a la dirección de la fisura. La fisura atraviesa la matriz y la secciona en dos partes, las cuales están unidas por fibras con diferentes inclinaciones. En Figura 3 se representa la configuración geométrica del problema estudiado.

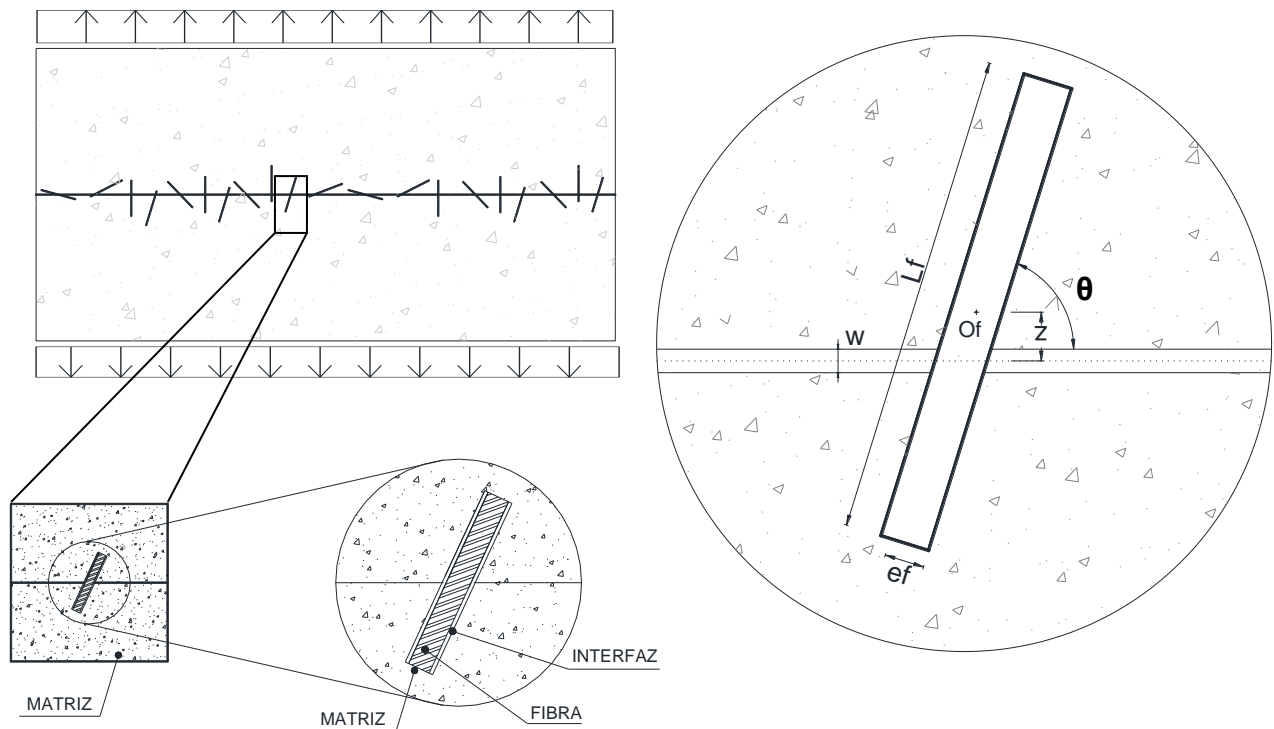


Figura 3: (a) Material compuesto con una macro fisura reforzado con fibras cortas y configuración geométrica del conjunto fibra matriz estudiada.

4. IMPLEMENTACION DEL MODELO EN MED.

El mecanismo antes descrito fue implementado con el método de los elementos discretos considerando un modelo de estado plano de deformación, en este caso se considera sólo un módulo en la dirección del espesor, y las condiciones de contorno impuestas garantizan que no haya desplazamientos en la dirección perpendicular al plano en el que se desarrolla el modelo estructura. En la Figura 4 se ilustran las características del modelo tridimensional estudiado y como el mismo fue representado utilizando el método de los elementos discretos.

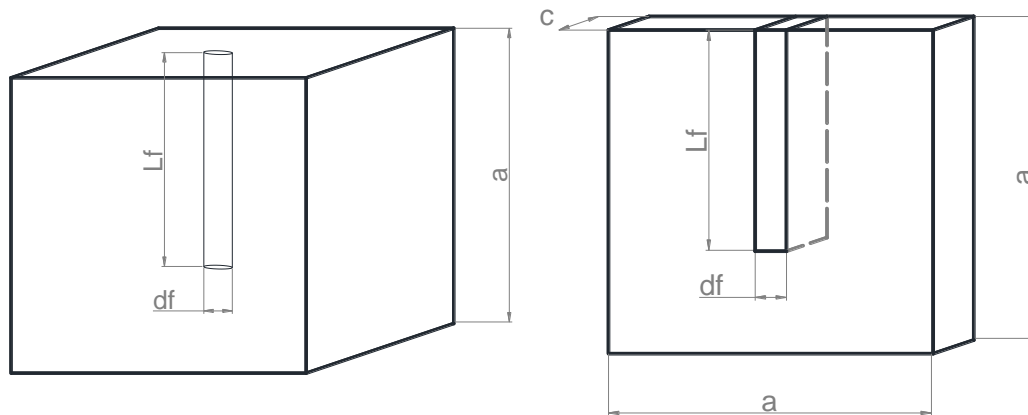


Figura 4: (a) Modelo tridimensional, (b) modelo simplificado implementado en MED.

Como la fibra fue considerada más resistente que la matriz, la ruptura en la simulación ocurrirá debido a ruptura en la matriz o en la interface fibra-matriz. Por eso para mantener la equivalencia entre el modelo tridimensional y el modelo de estado plano implementado, en el método de los elementos discretos se debe respetar que la fuerza de adherencia entre los dos modelos debe ser la misma. Fijando la relación longitud diámetro de la fibra L_f/d_f tenemos que:

$$\pi \times L_f \times d_f = L_f \times C \times 2 \quad (3)$$

De esta forma condicionamos a que el espesor del modelo sea igual a:

$$C = \pi \times d_f / 2 \quad (4)$$

El modelo numérico tiene como espesor el tamaño de un módulo cúbico (L_{co}), de esta manera los resultados obtenidos en el análisis serán multiplicados por el factor (C/L_{co}).

En el caso estudiado se considera un compuesto formado por una matriz de mortero de cemento a la cual se le han adicionado fibras de Acero que tienen dimensiones medias de $L_f = 10mm$ y un $d_f = 0,5mm$. En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas y geométricas adoptadas para construir el modelo en elementos discretos. El modelo fue confeccionado con módulos cúbicos de $L_{co} = 2.5 \times 10^{-4}m$, con 100 módulos de lado y considerando un módulo en el espesor, restringiendo los desplazamientos de todos los nodos del modelo en la dirección perpendicular al plano de la figura.

Como se ha indicado en la expresión 4, en este caso el valor de espesor del modelo plano equivalente, presentado en la Figura 4b, debe ser de $C = 0.785mm$, lo que implica que los resultados obtenidos con un modelo de elementos discretos con un espesor igual a un módulo deben ser multiplicados por $C/L_{co} = 3.14$.

Utilizando esta conversión, en la Tabla 1 se presentan las propiedades adoptadas para el cálculo de la fuerza normal de cada fibra indicando también allí los valores de d_f y C que serán efectivamente utilizados en la construcción del modelo.

Tabla 1: Datos del problema y Parámetros del modelo de Elementos Discretos

Longitud de Fibra L_f	10 mm
Diámetro de Fibra d_f	0.5 mm
Coefficiente de Poisson $[\nu]$	0.25
Masa específica de Matriz $[\rho_m]$	2000 kg/m ³
Módulo de Young de Matriz $[E_m]$	30 GPa
Deformación Crítica de Matriz, ε_{pm}	1.22×10^{-3}
Energía específica de fractura de Matriz $[G_{fm}]$	24 N/m
Masa específica de Fibra $[\rho_f]$	7800 kg/m ³
Módulo de Young de Fibra $[E_f]$	200 GPa
Deformación Crítica de Fibra, ε_{pf}	2.10×10^{-3}
Energía específica de fractura de Fibra $[G_{ff}]$	21780 N/m
Masa específica de Interface $[\rho_i]$	5200 kg/m ³
Módulo de Young de Interface $[E_i]$	167 GPa
Deformación Crítica de Interface, ε_{pi}	6.00×10^{-6}
Energía específica de fractura de Interface $[G_{fi}]$	0.13 N/m

Recordando que en Figura 3 se mostró la configuración geométrica del problema estudiado, ahora en la Figura 6 se representa uno de los modelos generados empleando el MED, donde es posible identificar la región considerada como fibra, como interface y como matriz.

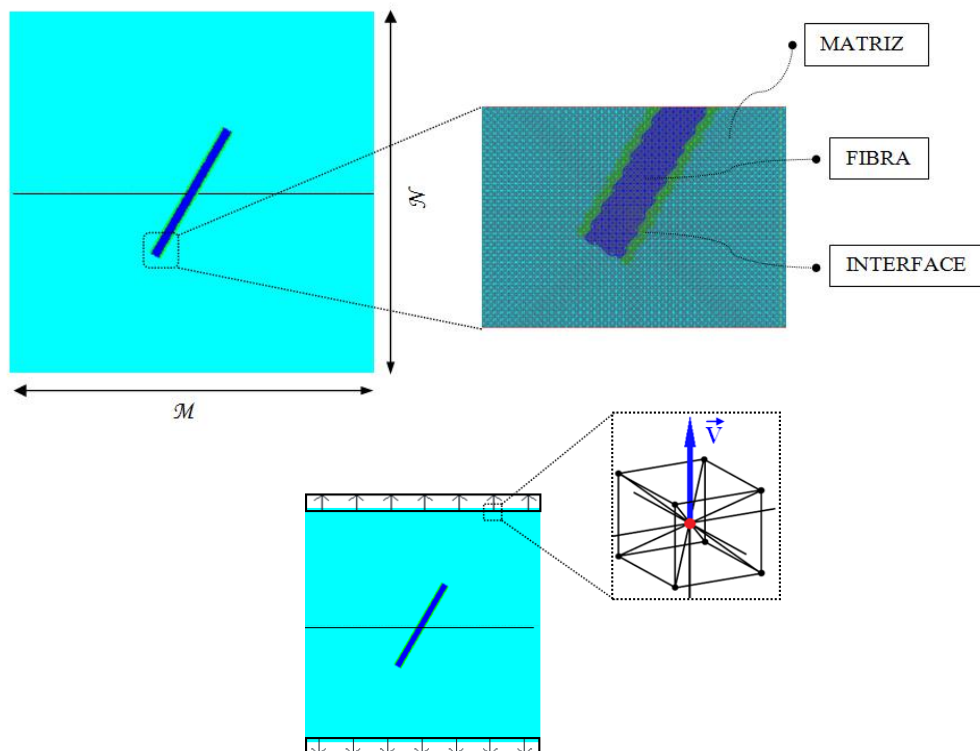


Figura 6: (a) Disposición de la fibra dentro de la matriz fisurada, indicando la discretización adoptada para uno de los casos estudiados en el modelo de MED. (b) Esquema de aplicación de desplazamientos prescritos en el modelo de MED.

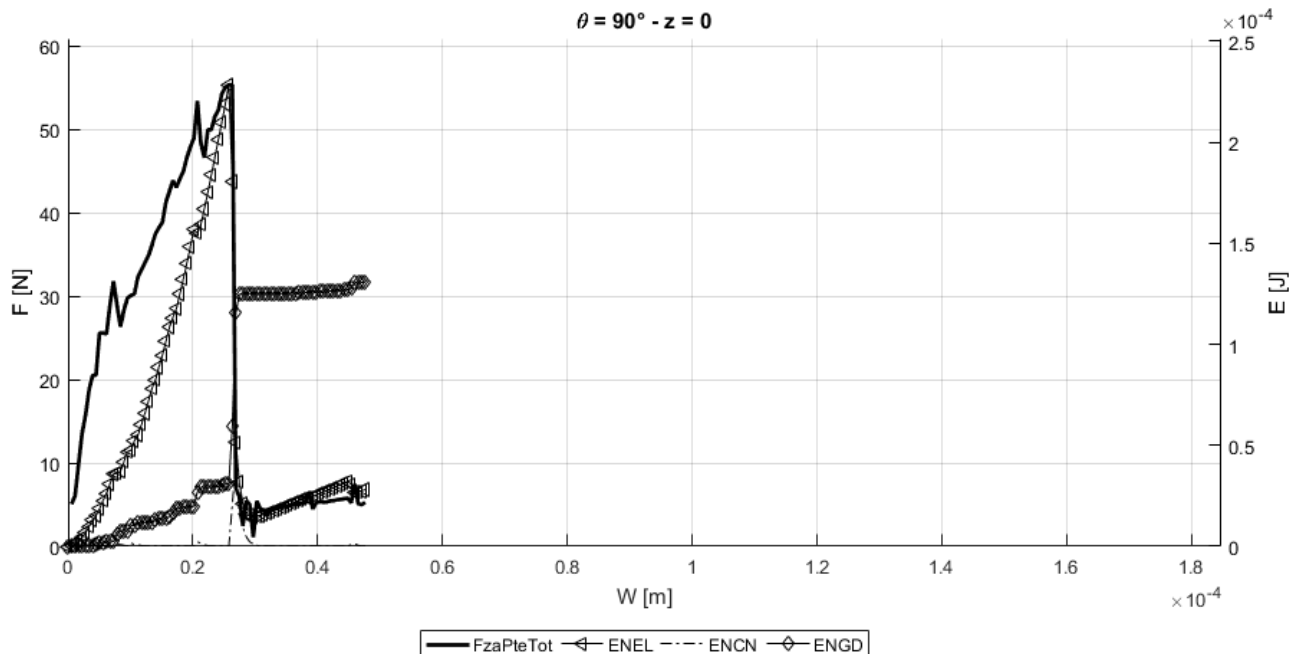
Para modelar la fisura en el MED los nudos centrales de los módulos cúbicos a uno y otro lado del plano de la fisura son duplicados y se debilitan las barras que unen dichos nudos. En Kostaski et al. (2008) se detalla más información del procedimiento descrito anteriormente.

Para aplicar los desplazamientos prescritos (v), fueron seleccionados los nudos centrales de los módulos elementales situados en las caras superiores e inferiores de la fisura. Esto se puede observar en Figura 6b.

5. RESULTADOS

Aplicando desplazamientos prescritos en ambos extremos del modelo, y dejando que los bordes se desplacen libremente en dirección horizontal, la fisura comienza a abrirse y se computa la fuerza que es resistida por la fibra, llamada fuerza de puente, la que es computada, en el modelo de elementos discretos, como la suma de las reacciones en uno de los extremos de los dos bloques que simulan la matriz. Se observa que a medida que la fisura se abre, la fibra resiste dicha apertura aumentando así la fuerza de puente en ella, hasta que llegamos al instante en el cual el modelo rompe, instante en el cual la energía elástica del modelo comienza a caer y la curva de energía cinética se experimenta en forma abrupta; se observa también un que la energía de daño da un salto y posteriormente se mantiene constante señal que la fibra perdió su capacidad portante. La apertura de fisura “ w ” registrada en el punto de ruptura es la apertura de fisura crítica (w^*) para el modelo analizado.

En la Figura 7 se puede observar la simulación en términos del balance energético y de la evolución de la fuerza de puente para el caso de la fibra inclinada $\theta=90^\circ$, 60° y 30° respecto del plano de la fisura que atraviesa la matriz, y el baricentro de la fibra coincidente con el plano de la fisura ($z=0\text{mm}$).



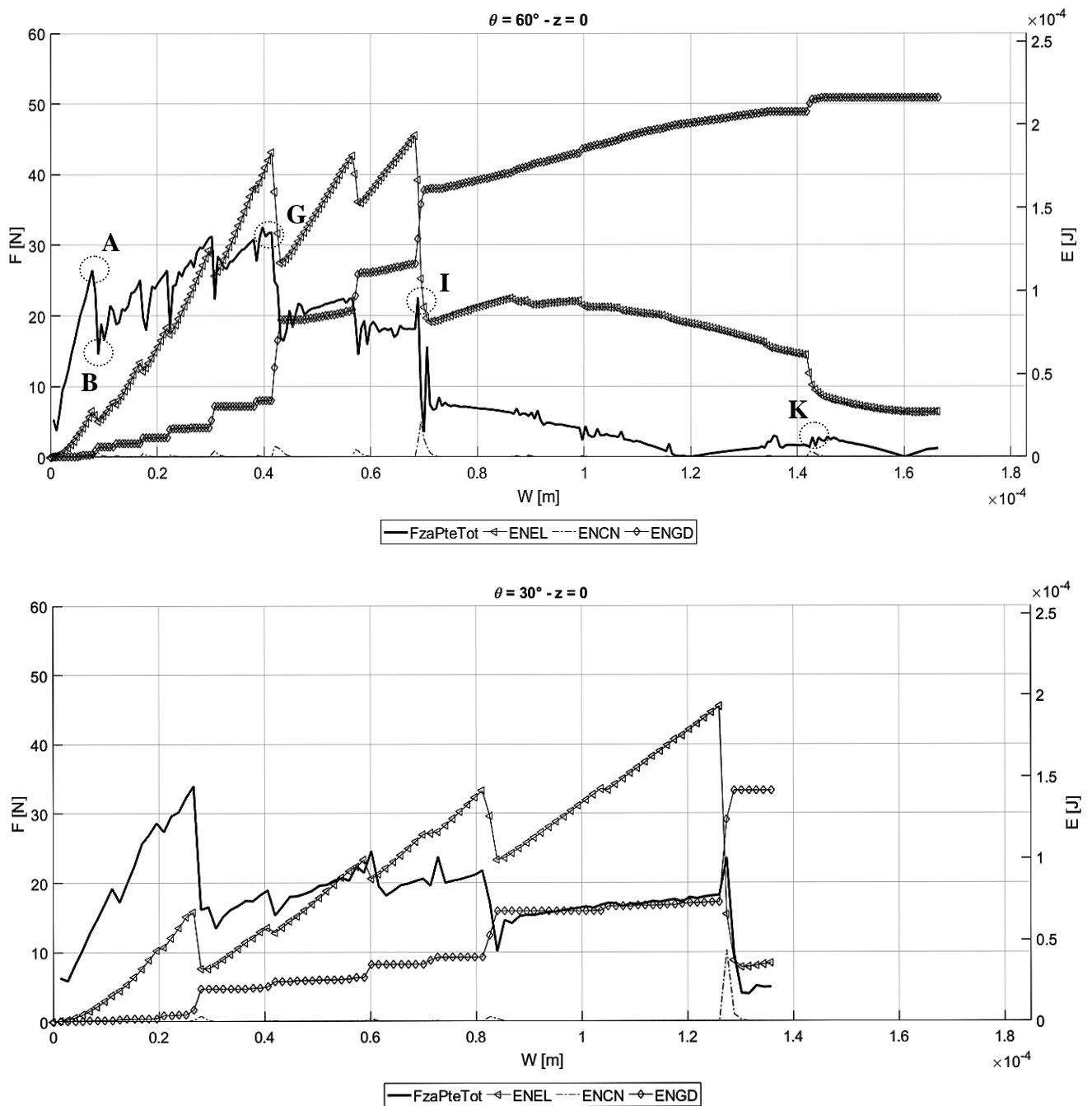


Figura 7: Simulación realizada en MED donde se presentan los resultados para $\theta = 90^\circ, 60^\circ$ y 30° . Balance energético vs desplazamiento entre los bloques (w), y la fuerza de puente (F) vs w.

En esta figura 7 se observa como la configuración con ángulo $\theta=90^\circ$ es la configuración que produce mayor fuerza de puente. Para $\theta=60^\circ$ tenemos mayor energía disipada por daño en la matriz y la interface, lo cual se traduciría en una mayor colaboración en el efecto de tenacificación del compuesto. También llama la atención en la misma figura el comportamiento espasmódico tanto de las curvas fuerza de puente vs desplazamiento como en el caso de la

energía, mostrando que las rupturas localizadas ocasionadas durante el proceso de daño son espasmódicas.

Analizando en detalle la Figura 7 para el caso de $\theta = 60^\circ$, se observa que desde el instante inicial en el que la fisura comienza a abrirse, la fibra toma la responsabilidad de mantener los dos bloques unidos, acompañada de un proceso de despegue, proceso que se manifiesta en las caras traccionadas de la placa. En la Figura 8 se presentan las configuraciones parciales obtenidas en instantes claves del proceso de daño. En el instante A se observa una caída hasta el punto B, tanto en la curva P-w como en las curvas de las respectivas energías elásticas y de daño; la caída mencionada en las curvas en este instante, justifica la aparición de Spalling en la matriz. A continuación, el proceso de despegue de la interfaz continúa llegando al instante G donde se presenta una nueva caída abrupta en las curvas de fuerza de puente y de energía elástica. En este instante se abre una fisura horizontal en la parte sana de la matriz. Instante que corresponde a la propagación de la fisura abriéndose camino a través de la matriz. Si el criterio de ruptura adoptado fuera el de considerar el instante en que la fuerza de puente alcanza su valor máximo la ruptura acontece en el instante G. Pero si el criterio adoptado fuera el instante donde se alcanza la energía elástica máxima la ruptura acontecería en el instante I como se observa en la Figura 7 (b). Finalmente, la separación total entre los dos bloques de la matriz acontece en el instante K de la simulación realizada.

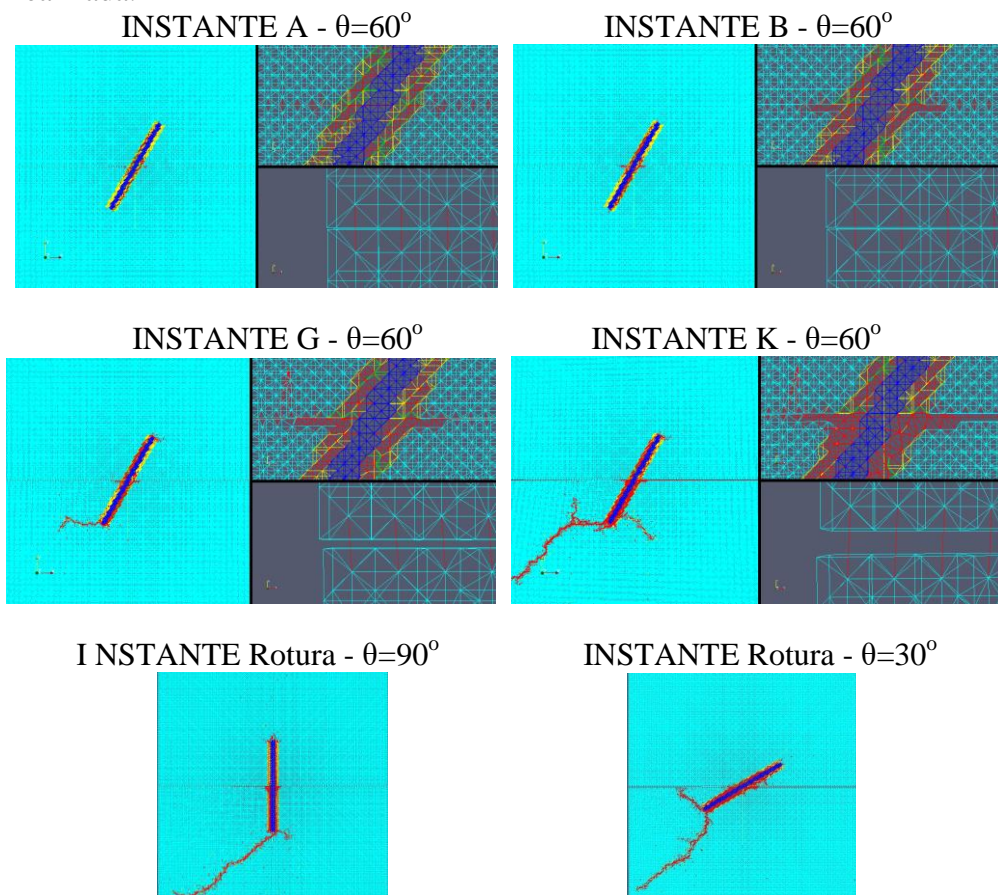


Figura 8: (a) Configuraciones obtenidas en la simulación utilizando MED en los instantes identificados en la Figura 7(b) (ángulo $\theta=60^\circ$). (b) Configuraciones en los instantes de rotura para los modelos $\theta=90^\circ$ y $\theta=30^\circ$



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

Para complementar la información ya presentada, en la Figura 9 se grafica la evolución del daño durante la simulación. En esta figura es graficada la magnitud de la deformación crítica ε_p del modelo vs el tiempo de la simulación. Como la simulación fue realizada aplicando un desplazamiento prescrito uniforme de 0.042m/s, hay una equivalencia entre presentar valores de desplazamiento entre bloques w y tiempo. En la Figura 9 se ve nuevamente con claridad las propagaciones espasmódicas llamadas también rupturas en avalancha. Estos tipos de rupturas en modelos reales son capturados con claridad en ensayos de emisión acústica. En la figura los diseños de líneas verticales dejarían en evidencia el acontecimiento de estas avalanchas o rupturas espasmódicas.

Finalmente, en la Figura 10 se presenta la localización espacial y temporal de cuando cada barra del modelo rompe. En la primera, segunda y tercera fila de la figura se presentan los resultados para los ángulos $\theta= 90^\circ$, 60° y 30° respectivamente. En la primera columna se presentan las posiciones donde las barras comienzan a romper, donde el eje vertical corresponde al eje y [m] y el horizontal al eje x [m]). En la segunda columna se presentan los resultados considerando en el eje vertical el tiempo de la simulación [seg] y en el eje horizontal la coordenada espacial x [m]. Y finalmente, en la tercera columna se representa en el eje vertical el tiempo de simulación [seg] y en el eje horizontal la coordenada espacial y [m]. En las tres filas también se presenta una barra de colores que indica el tiempo de la simulación. Este gráfico permite tener una idea de cómo se distribuye el daño tanto espacialmente como temporalmente. En la Figura 10 se puede visualizar información ya observada en las figuras 8 y 9, lo que es particularmente interesante aquí, es ver como el Spalling aparece en forma muy clara en la región marcada con un círculo. También se observa que en el caso de $\theta= 90^\circ$ solo tenemos un crecimiento de daño en forma espasmódica en la inminencia de la ruptura. Podemos ver esto claramente en la Figura 7, donde no vemos en las curvas de fuerza de puente ni en los gráficos de energía el formato de zigzag que caracteriza a la ruptura en avalancha. También en la Figura 9 solo vemos hileras verticales de puntos al final del proceso de daño para esta configuración de $\theta= 90^\circ$. En la Figura 10 también este patrón aparece claramente en la primera fila y segunda y tercera columnas donde no tenemos rupturas alineadas claramente, lo cual indicaría la ausencia de este patrón de ruptura. Por otro lado, en el caso de ser el ángulo $\theta= 60^\circ$ o 30° , el comportamiento es bien diferente al caso de $\theta= 90^\circ$, y en las tres formas de presentar los resultados se desprende que una forma de ruptura espasmódica gobierna el proceso de daño para $\theta= 60^\circ$ o 30° .

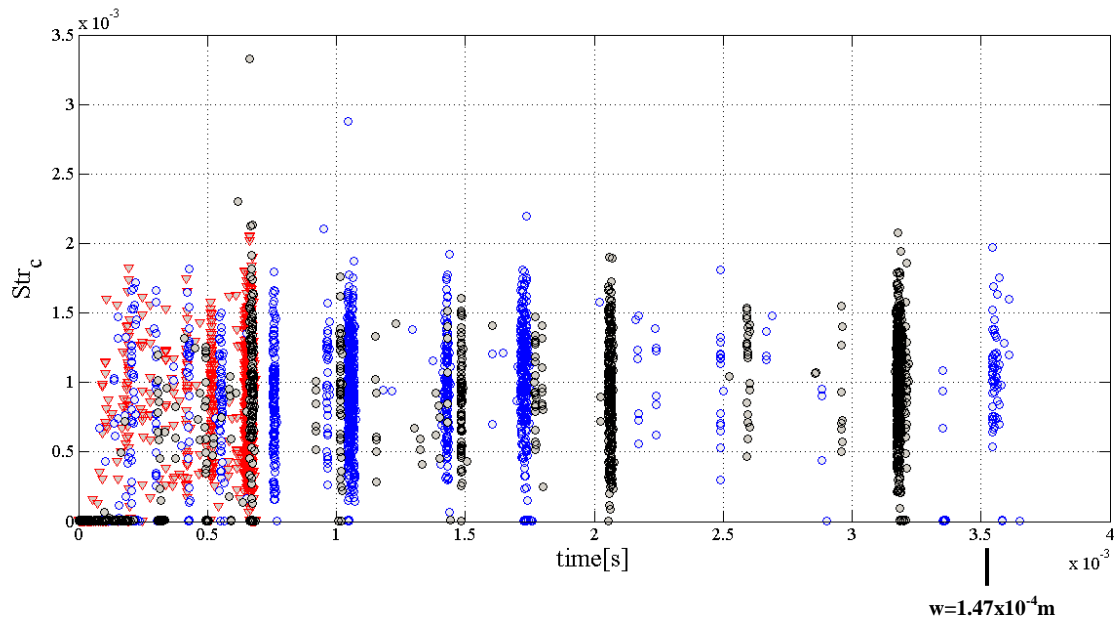
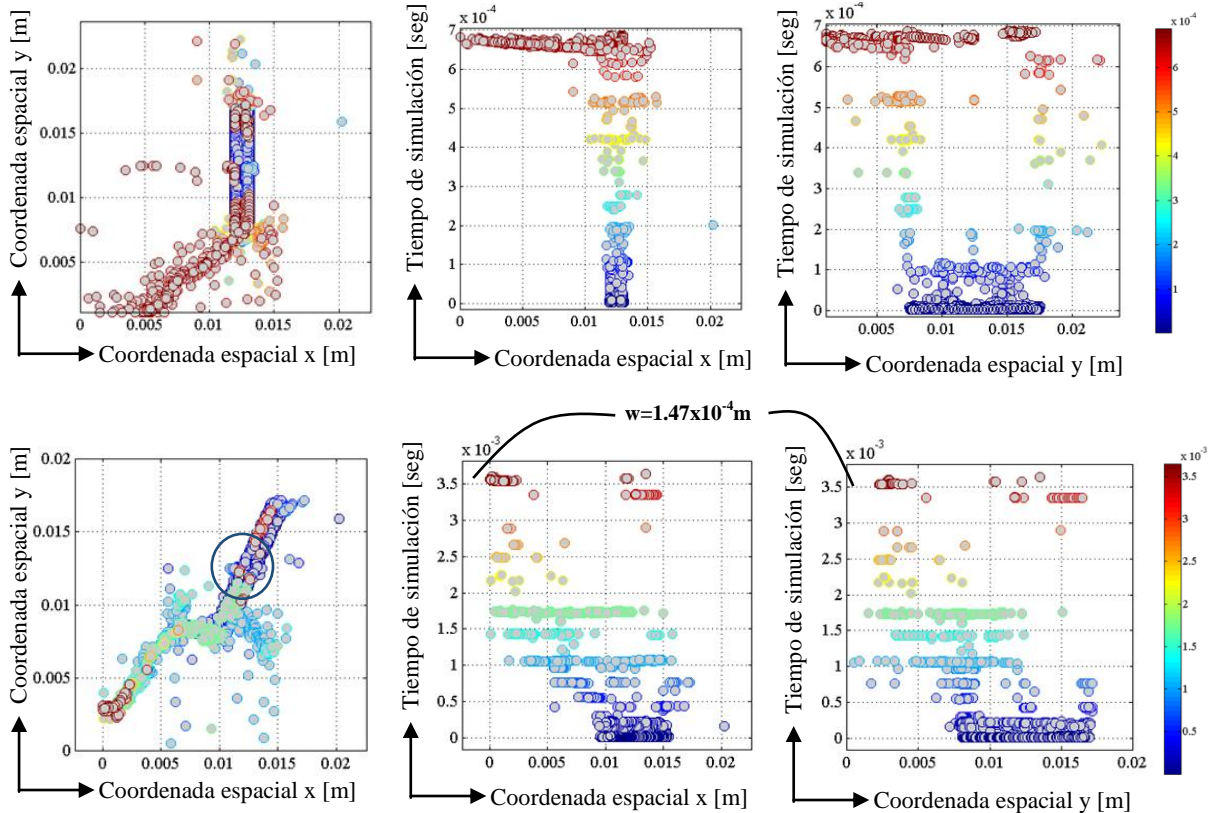


Figura 9: Valores de la deformación “ ε_p ” en la cual comienza el daño en cada barra del modelo vs tiempo de simulación. Resultados para la fibra con ángulos $\theta= 90^\circ$ (triángulos rojos), $\theta= 60^\circ$ (círculos azules) y $\theta= 30^\circ$ (círculos negros).



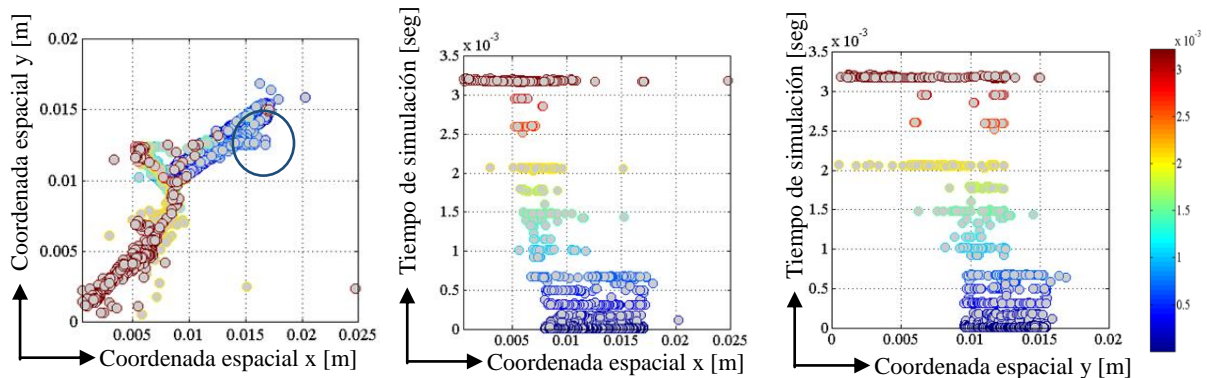


Figura 10: Resultados en términos del tiempo en el que comienza a romper un elemento vs su localización. Primera fila resultados para $\theta = 90^\circ$; segunda fila $\theta = 60^\circ$; tercera fila $\theta = 30^\circ$. El mapa de colores hace referencia al tiempo de la simulación.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la simulación numérica de uno de los mecanismos de la microestructura de una matriz a la cual se ha agregado fibras cortas. Para realizar la simulación se utilizó el Método de los Elementos Discretos y se presentaron los resultados de diferentes formas analizando los mismos. En el transcurso del trabajo fue posible obtener las siguientes conclusiones:

Fue posible verificar la sensibilidad del ángulo de inclinación de la fibra respecto al efecto de tenacificación del compuesto.

Fue también posible explorar las posibilidades del MED en modelar este tipo de problemas y diferentes formas de presentar los resultados.

En la continuación de este trabajo se pretende realizar el análisis variando otros parámetros buscando crear leyes que faciliten la homogenización del compuesto estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece por este medio a la Universidad Nacional del Nordeste en Argentina y al CNPq y a la CAPES, órganos de fomento brasileros por el apoyo en la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Barragan et al. (2006). Shear Failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests. *ACI Materials Journal*, v. 103, n. 4, p. 251-257.
- Brandt, A. M. (1985). On the optimal direction of short metal fibres in brittle matrix composites. *Journal of Materials Science*, v. 20, n. 11, p. 3831-3841.
- Brebbia, C.A. (1984). *Boundary Element Techniques*. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg.
- Brighenti, R. et al. (2013a). Cracking behaviour of fibre-reinforced cementitious composites: A comparison between a continuous and discrete computational approach. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 103, p.103–114.
- Brighenti, R. et al. (2013b). Continuous and lattice models to describe crack paths in brittle-matrix composites with random and unidirectional fibres. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 108, p.170–182.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

- Budiansky, B. and Hutchinson, J. W. (1986). Matrix fracture in fiber-reinforced ceramics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 34, n. 2, p. 167-189.
- Cao et al. (1990). Effect of Interfaces on the Properties of Fiber-Reinforced Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 6, p. 1691-1699.
- Friedrich, K. (1989). Sliding wear performance of different polyimide formulations. *Tribology International*, v. 22, n. 1, p. 25-31.
- Iturrioz, I. and Lacidogna, G. and Carpinteri, A. (2013a). Experimental analysis and truss-like discrete element model simulation of concrete specimens under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 110, p. 81-98.
- Iturrioz, I. and Lacidogna, G. and Carpinteri, A. (2013b). Acoustic emission detection in concrete specimens: Experimental analysis and lattice model simulations. *International Journal of Damage Mechanics*, v. 23, n. 3, p. 327-358.
- Kosteski, L. et al. (2016). A lattice discrete element method to model the falling-weight impact test of PMMA specimens. *International Journal of Impact Engineering*, v. 87, p.120-131.
- Kosteski, L. et al. (2008). Determinación de parámetros fractomecánicos estáticos y dinámicos utilizando el método de los elementos discretos compuesto por barras. *Revista Internacional Métodos Numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, Cimne, v. 24, p.323-343.
- Li, V. C. and Wang, Y. and Backer, S. (1991). A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 39, n. 5, p. 607-625.
- Needelman (1990). An analysis of decohesion along an imperfect interface. *International Journal of Fracture*, v. 42, n. 1, p. 21-40
- Nemat-Nasser, S. and Hori M. (1999). *Micromechanics – Overall Properties of Heterogeneous Materials*. Elsevier, North Holland, Netherlands.
- Oliver et al (2009). A finite thickness band method for ductile fracture analysis. *International Journal of Plasticity*, v. 25, n. 12, p. 2349-2365
- Riera, J.D. (1984). Local effects in impact problems on concrete structures. *Proceedings of the Conference on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants*, v. 3, p. 57-79.
- Rocha, M. M. and Riera, J. D. and Krutzyk, N. J. (1991). Extension of a model that aptly describes fracture of plain concrete to the impact analysis of reinforced concrete. *International Conference on Structural Mechanics Reactor Technology, SMiRT 11*, v. J.
- Schlangen and Van Mier (1995). Crack propagation in sandstone: Combined experimental and numerical approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 28, n. 2, p. 93-110
- Spagnoli (2009). A micromechanical lattice model to describe the fracture behaviour of engineered cementitious composites. *Computational Materials Science*, v. 46, n. 1, p. 7-14
- Torquato, S. (2002). *Random Heterogeneous Materials – microstructure and Macroscopic Properties*. Springer, New York, USA.
- Wang, C. and Friedrich, L. F. (2013). Computational model of spalling and effective fibers on toughening in fiber reinforced composites at an early stage of crack formation. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 10, n. 4, p. 797-811.
- Ward, R. and Li, V.C. (1990). Dependence of Flexural Behavior of Fiber Reinforced Mortar on Material Fracture Resistance and Beam Size. *American Concrete Institute*, v. 87, n. 6, p. 627-637.
- Zhang, G. Q. (2012). Micromechanics of crack bridging stress-displacement and fracture energy in steel hooked-end fiber-reinforced cementitious composites. *International Journal of Damage*, v. 22, n. 6, p. 829-859.