



Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL

**UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE EMISIÓN
ACÚSTICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL
DAÑO EN MORTEROS REFORZADOS CON
FIBRAS METÁLICAS**

Francisco Agustín Sanz

Resistencia, Chaco

2018



Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL

UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE EMISIÓN ACÚSTICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN MORTEROS REFORZADOS CON FIBRAS METÁLICAS

Autor:

Francisco Agustín Sanz

Tutor:

Ing. M. Sc. Ricardo Barrios D'Ambra

Asesor:

Ing. Bruno Uberti.

Resistencia, Chaco

2018

RESUMEN EJECUTIVO

Desde su creación, los materiales compuestos han demostrado sus potencialidades frente a los materiales convencionales, entre las cuales se pueden mencionar una elevada relación resistencia-peso, resistencia a la corrosión, estabilidad térmica y mayor ductilidad, entre otras, comprobando su desempeño en diversos campos de manera satisfactoria. Es por ello que su utilización ha crecido considerablemente.

Debido a las complejas propiedades micro y macro mecánicas que presentan en su composición, se requieren de formulaciones teóricas y herramientas informáticas que modelen adecuadamente el comportamiento de estos materiales. La implementación de modelos numéricos en el estudio de este tipo de materiales ha evolucionado con el objetivo de salvar las dificultades mencionadas.

Las evaluaciones cualitativas como cuantitativas de los daños que se pueden producir en distintos tipos de materiales son de gran importancia. Es por ello, que hoy en día se recurre a ensayos de carácter no destructivos para su detección. Uno de los más recurridos, debido a su gran avance, es el análisis a través de Emisiones Acústicas (EA) para la evaluación de daños.

El uso de la Técnicas de Emisión Acústica (TEA) ha demostrado ser de gran utilidad en las investigaciones de los fenómenos de daños en compuestos; sin embargo, como se mencionan en artículos como el publicado por Dahmene et al. (2015), la falta de disponibilidad de modelos numéricos que permitan la implementación de evaluaciones de EA en materiales compuestos, dificulta la posibilidad de comparar los resultados experimentales, pudiendo ser aprobados o rechazados con mayor facilidad y disminuyendo costos.

En el presente trabajo se lleva a cabo el estudio y diversos análisis de las EA generadas tras el proceso de daño de un modelo formado por una fibra que conecta dos partes de la matriz fisurada; las señales se obtienen numéricamente a través del Método de los Elementos Discretos (MED), donde la inclinación de la fibra respecto de la grieta plana se evalúa en tres direcciones particulares.

El MED consiste esencialmente en la discretización del continuo por medio de un reticulado espacial formado por la repetición de un módulo regular tridimensional; las rigideces de las barras que componen el arreglo son equivalentes a la del continuo que se quiere representar y la masa del modelo se discretiza y concentra en los nodos del reticulado espacial ya mencionado.

El ensayo modelado se lo conoce como pull-out y consiste en la aplicación de desplazamientos prescritos en sentidos opuestos y dirección normal a un área comprometida de la muestra que provoca la fractura y/o extracción del elemento de unión entre los bloques. Se lo simula como una placa de cemento fisurada en su tramo medio con una fibra que

cumple el objetivo de unir ambas partes de la matriz; se aplican desplazamientos prescritos en dirección normal a la fisura mencionada, tanto en el borde superior como en el borde inferior de la placa de cemento.

Los resultados se obtienen en términos de parámetros globales de las simulaciones, exponiendo gráficos de fuerzas de puente vs apertura de fisura, balances de energías, tablas de parámetros, entre otras. Estos gráficos fueron utilizados en los análisis del valor b que, tras la división del tiempo de la simulación en tres intervalos caracterizados en función de la curva de fuerza puente, se ha obtenido como resultado que la caída del valor b en cada uno de los intervalos se debe a la generación de daños de mayor magnitud en el compuesto. Esto demuestra las potencialidades tanto de este tipo de análisis como de la utilización del MED para ser aplicado en la predicción de la falla inminente del modelo numérico.

De las curvas de los valores b vs apertura de la fisura, se comprueba que la aparición de valores mínimos y cambios de pendientes, denotan la continua ocurrencia de eventos que implican la pérdida de la fuerza puente y salto de la energía de daños.

Se exponen resultados de análisis particulares de eventos de EA. Estos permiten la clasificación de las señales obtenidas en función de los micro-mecanismos de fallas que las hayan provocado. Así se pueden diferenciar aquellos eventos que fueron debidos a daños o fisuras en la matriz y aquellos correspondientes a daños y/o fisuras en la interfaz fibra-matriz.

Se aplicaron también dos técnicas de clasificación de los modos de fallas en eventos para el caso de la fibra con inclinación de 60° ; el análisis arrojó como resultado que tres de los eventos estudiados fueron producto de esfuerzos axiales (modo I) y otros tres eventos se debieron a esfuerzos de corte.

Simultáneamente, en cada tipo de análisis realizado se demuestra la concordancia entre los resultados obtenidos en estas simulaciones y los derivados por ensayos experimentales de otros autores, los que brindan un conjunto de conclusiones y recomendaciones, reflejando principalmente las potencialidades de la implementación del MED en análisis de eventos de EA en materiales compuestos de matriz cementicia con fibras cortas acero.

Entre las conclusiones se menciona que es posible la implementación de las técnicas de EA en el MED para modelar compuestos de matriz cementicia con fibras cortas de acero, el análisis de la evolución del valor b en dicho compuesto, la clasificación de las señales en dos mecanismos de falla, entre otras.

Como principal recomendación, se aconseja evitar clasificar eventos de EA obtenidos con el MED cuyas amplitudes sean muy elevadas, ya que la predicción de los mecanismos que los originan no arroja resultados fidedignos.

AGRADECIMIENTOS

Al Magister Ingeniero Ricardo Barrios D'Ambra, por haberme aceptado como becario y ser mi director, contribuyendo, motivando y proporcionando los medios para su desarrollo.

Al Ingeniero Bruno Uberti, quien me ha guiado y asesorado en la realización de este trabajo final, no solo contribuyendo en la toma de decisiones, si no también brindando artículos, programas útiles y estando siempre atento a los inconvenientes que se fueron presentando.

Al Doctor Ingeniero Ignacio Iturrioz quien, a pesar de la distancia, enriqueció el trabajo proponiendo nuevas ideas, análisis y verificando los resultados obtenidos.

A todos los integrantes del departamento de Mecánica Aplicada, tanto los profesores como los becarios, quienes me hicieron sentir uno más de ellos, brindándome un lugar de trabajo muy agradable.

Al Magister Ingeniero Alejandro Ruberto, por interesarse tanto en este trabajo y su finalización, haciendo hincapié en demostrar la calidad del mismo.

A toda mi familia, padres, hermanos, tíos, primos y abuelas, quienes con su apoyo e interés en mi progreso, fueron fundamentales para seguir adelante. Agradeciendo principalmente a mis padres y hermanos que, desde lo más cercano, fueron pacientes e incondicionales, brindándome su apoyo en cada aspecto de mi vida.

A mis amigos de la vida, que compartieron cada momento, supieron entender mis obligaciones, mis ausencias y me han animado siempre.

A mis amigos de la carrera, con quienes he compartido muchos momentos de alegría y preocupaciones, pero gracias a su compañía posibilitaron que llegara a este importante logro, considerándolos como amigos de la vida.

ÍNDICE

SIMBOLOGÍA.....	1
LISTA DE ABREVIATURAS	5
Introducción	6
Objetivos	7
Fundamentos de las técnicas de emisiones acústicas.....	9
Ventajas y desventajas de las emisiones acústicas respecto a otros tipos de ensayos no destructivos	10
Tipos de señales de emisión acústica	11
Análisis de las señales de emisión acústica.....	13
Diferencias entre la TEA basada en parámetros y en la señal	13
Ventajas y desventajas del uso de técnicas de EA basadas en parámetros	14
Ventajas y desventajas del uso de técnicas de EA basadas en señal.....	15
Análisis de los parámetros de la emisión acústica	16
Identificación de una señal de EA.....	17
Parámetros de señal EA	17
Análisis paramétrico.....	20
Revisión bibliográfica	24
Materiales compuestos	24
Mecanismos de aumento de tenacidad.....	25
Aumento de la tenacidad de materiales compuestos reforzados por fibras	26
Procesos de ruptura de materiales compuestos	28
Materiales y métodos	30
Método de los elementos discretos	30

Características de la formulación del método utilizada en este trabajo	31
Integración por diferencias finitas.....	40
Distribución aleatoria de los parámetros del material.....	41
Metodología utilizada para obtener el tensor de tensiones	42
Problemas verificados con el MED.....	44
La técnica de las emisiones acústicas aplicada en resultados del MED	45
Problema en estudio	47
Modelo físico	47
Metodología empleada en el modelo numérico	49
Configuración geométrica y condiciones de borde.....	49
Parámetros aleatorios implementados.....	50
Discretización empleada en el modelo.....	51
Resultados, conclusiones y recomendaciones.....	53
Resultados	53
Presentación de resultados de EA obtenidos de las simulaciones numéricas	53
Análisis del valor b.....	54
Análisis de las señales de EA.....	59
Clasificación de los modos fallas.....	69
Conclusiones y recomendaciones	73
ANEXOS	76
ANEXOS FIGURAS	77

SIMBOLOGÍA

A_{dB}	Pico de amplitud de eventos de EA, en dB.
A_f	Área de la superficie fracturada.
A_{max}	Pico de amplitud de eventos de EA, en V.
a	Constante empírica propuesta por Gutenberg y Richter.
b	Constante empírica propuesta por Gutenberg y Richter que representa gradiente negativo de la gráfica logarítmica de frecuencia-magnitud.
C	Matriz de amortiguamiento (diagonal).
C_{ij}	Matriz de las contantes elásticas en notación indicial, con $i, j = 1, \dots, 6$.
$CV(G_f)$	Desviación estándar de G_f .
c	Factor que varía según transductor.
D_f	Constante vinculada al coeficiente de amortiguamiento crítico ξ_n .
d	Tamaño de la fisura crítica.
d_{eq}	Longitud característica del material.
E	Módulo de elasticidad longitudinal del material.
E_A	Rigidez de las barras del modelo reticulado.
E_f	Módulo de elasticidad de la fibra de acero.
E_i	Módulo de elasticidad utilizado en la interfaz.
E_m	Módulo de elasticidad de la matriz cementicia.
$E \cdot A_d$	Rigidez de las barras de diagonales.
$E \cdot A_n$	Rigidez de las barras de normales.
$F(G_f)$	Función probabilística de Weibull acumulada de G_f .
F	Fuerza puente de la fibra.
$\vec{F}(t)$	Vector de fuerzas internas.

\bar{F}^b	Fuerza interna en cada barra b.
f_n	Frecuencia natural de vibración de modo n, en Hz.
G_f	Tasa de energía superficial.
G_{ff}	Energía específica de fractura de la fibra de acero.
G_{fi}	Energía específica de fractura de la interfaz.
G_{fm}	Energía específica de fractura de la matriz cementicia.
K_c	Factor de intensidad de tensiones.
k	Número de barras que concurren al nudo i.
k_r	Ductilidad, parámetro que permite calcular ϵ_r .
M_L	Magnitud de Richter.
N	Número de eventos instantáneos.
N_{ac}	Número de eventos acumulados.
L_c	Longitud del módulo elemental.
L_{corr}	Longitud de correlación espacial de campo aleatorio.
M	Matriz de masa nodal (diagonal).
m	Masa de un nudo.
N	Número de elementos de magnitud mayores a un umbral establecido.
P_{cr}	Fuerza máxima de tracción transmitida por la barra.
P_f	Fuerza actuante en la parte libre de la fibra.
P_{sf}	Fuerza actuante en la parte de la fibra embebida en la matriz.
$\bar{P}(t)$	Vector de fuerzas externas.
Q_{11}	Propiedad unidireccional efectiva correspondiente a las barras del MED.
Q_{11}^d	Propiedad unidireccional efectiva correspondiente a las barras diagonales.
Q_{11}^n	Propiedad unidireccional efectiva correspondiente a las barras normales.
R	Longitud característica de la estructura.

S_f	Avance de extracción entre fibra y matriz.
s	Número de fragilidad.
t	Tiempo de simulación.
$t_{\text{máx}}$	Tiempo máximo de la simulaciones.
u	Número aleatorio entre [0; 1].
V_f	Porcentaje volumétrico de fibras en el compuesto.
V_p	Velocidad de propagación de onda de compresión.
v	Velocidad de aplicación de los desplazamientos igual 3 mm/s.
w	Apertura de la fisura.
\bar{x}	Vector de desplazamientos nodales.
$\dot{\bar{x}}$	Vector de velocidades nodales.
$\ddot{\bar{x}}$	Vector de aceleraciones nodales.
Y	Parámetro que tiene en cuenta la influencia de las condiciones de contorno y de la orientación de la fisura.
$\alpha_{I_{ij}}^n, \alpha_{J_{kl}}^d$	Cosenos directores de los sistemas cartesianos \bar{x}, x_I^n y \bar{x}, x_J^d respectivamente.
β	Parámetro de escala en funciones exponencial de Weibull.
$\Gamma(x)$	Función Gamma.
γ	Parámetro de forma en funciones exponencial de Weibull.
Δt	Intervalo de tiempo utilizado en resultados igual a 0,229376 ms.
$\Delta t_{\text{crítico}}$	Intervalo de tiempo crítico de integraciones finitas igual a 7×10^9 s.
ε_b y $\dot{\varepsilon}_b$	Deformación y la velocidad de deformación de la barra b.
ε_p	Deformación crítica asociada a P_{cr} ó σ_p .
ε_{pf}	Deformación crítica de la fibra de acero.
ε_{pi}	Deformación crítica utilizada en la interfaz.
ε_{pm}	Deformación crítica de la matriz cementicia.

ϵ_r	Deformación para la cual la barra no transmite más esfuerzos de tracción.
θ	Ángulo entre la fibra de acero y el plano de la fisura.
λ	Función que dependerá del tipo de material a modelar (relación constitutiva).
μ	Módulo de corte.
ν	Módulo de Poisson.
ρ	Densidad.
ρ_f	Densidad de la fibra de acero.
ρ_i	Densidad utilizada en la interfaz.
ρ_m	Densidad de la matriz cementicia.
σ_i	Vector de tensiones en notación indicial, con $i = 1, \dots, 6$.
σ_p	Tensión máxima de tracción transmitida por la barra.
Φ_f	Ángulo entre la dirección inicial de la fibra y la fuerza aplicada al compuesto.
Φ_f'	Ángulo entre la dirección inicial de la fibra y la fuerza aplicada en la fibra.

LISTA DE ABREVIATURAS

- AF Frecuencia Media (Average Frequency).
- AHSS Acero Avanzado de Alta Resistencia.
- COD Valor de Abertura de la Grieta (Crack Opening Displacement).
- EA Emisión Acústica.
- END Ensayos No Destructivos.
- FFT Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).
- MED Método de los Elementos Discretos.
- RA Ángulo de Subida (Rise Angle).
- TEA Técnicas de Emisión Acústicas.

Capítulo 1

Introducción

En las ingenierías civil, aeronáutica, petrolera, de materiales y otras son de gran importancia tanto evaluaciones cualitativas como cuantitativas de los daños que se pueden producir en distintos tipos de materiales.

Los daños se deben a estados críticos de tensiones y deformaciones que son capaces de originar fracturas, en un punto o región del material, pudiendo debilitar o incluso provocar una falla de carácter crítica o catastrófica.

Localizar las fisuras, tanto externas como internas, en piezas o elementos estructurales de gran tamaño, es un trabajo complejo; es por ello que hoy en día se recurre a ensayos de carácter no destructivos para su detección. Uno de los más utilizados, debido a su gran avance, es el análisis a través de Emisiones Acústicas (EA) para la evaluación de daños.

Los primeros estudios básicos sobre fenómenos de EA se atribuyen a investigadores en Estados Unidos (1948) y Alemania (1950).

Kaiser (1950) fue el primero en utilizar instrumentación electrónica para registrar los sonidos audibles producidos por los metales durante su deformación. Sus trabajos despertaron gran interés en otros investigadores; se puede mencionar el caso de Schofield (1958) y Tatro (1959) que mejoraron la instrumentación para llevar adelante las lecturas de EA en estructuras.

A partir de 1964 se han realizado diversas investigaciones sobre toda clase de materiales mediante la Técnica de Emisión Acústica (TEA).

Muchos trabajos tratan del estudio de la mecánica de fractura en materiales con y sin grietas, comprobándose que cuando se somete a esfuerzos una probeta con grietas, la deformación plástica que da lugar a una EA se inicia en los extremos de la grieta y en los puntos donde se concentran tensiones.

También se han aplicado las TEA para investigar el crecimiento de las grietas, tales como el crecimiento por corrosión bajo tensiones o de fatiga a bajos ciclos.

Artículos como los de Drouillard (1979 y 1987), nos dan un panorama general sobre la historia de las TEA, de las cuales importan diversos conceptos de la sismología. Se puede decir que básicamente se llevó el nivel macroscópico del monitoreo de sismos al nivel microscópico de la nucleación de grietas en estructuras bajo efectos de cargas (Justen, 2012).

En la industria automovilística se sigue utilizando las EA en la detección de fallas de materiales. Dentro de esta rama, se puede mencionar el análisis de AHSS (Acero Avanzado de Alta Resistencia - Martínez-González, 2010) mediante las TEA, las que permitieron determinar, experimentalmente, el nivel de tensión que provoca la rotura de los carburos primarios durante los ensayos mecánicos de estos materiales (Fukaura et al., 2001).

Cuando el proyecto requiere materiales con propiedades mecánicas superiores a las que pueden ofrecer los materiales convencionales, los materiales compuestos son una alternativa que, desde su creación hace unos 50 años atrás, se han utilizado satisfactoriamente, por lo que su utilización ha crecido considerablemente.

Debido a las complejas propiedades micro y macro mecánicas que presentan en su composición los materiales compuestos, la modelación numérica evolucionó con el objetivo de comprender el comportamiento de los mismos y los procesos de falla que en ellos se produce. Esto generó una gran cantidad de literatura científica sobre modelos matemáticos para estos materiales.

El diseño industrial de piezas estructurales realizadas con materiales compuestos requiere formulaciones teóricas y herramientas informáticas que modelen adecuadamente el comportamiento de estos materiales.

Los métodos considerados más aptos para simular problemas de mecánica de los sólidos son el Método de los Elementos Finitos y el Método de los Elementos de Contorno. Pero, en la simulación de la propagación inestable de un defecto, estos métodos presentan dificultades debido a estar fundamentados en la hipótesis de los medios continuos.

Hoy en día el Método de los Elementos Discretos (MED) es una herramienta de gran capacidad para la simulación de materiales frágiles o cuasi frágiles, siendo una alternativa eficiente para el estudio de problemas estáticos y dinámicos de la mecánica de fractura, como así también es óptima para poder interpretar las señales producidas por las EA. Algunos trabajos que se pueden mencionar son Kostas et al. (2012) e Iturrioz et al. (2013 y 2014).

Artículos como el publicado por Dahmene et al. (2015), mencionan la falta de disponibilidad de modelos numéricos que permitan la implementación de ensayos de EA en materiales compuestos. Implementar estos modelos otorgaría la posibilidad de comparar los resultados experimentales pudiendo ser aprobados o rechazados con mayor facilidad y disminuyendo costos.

Objetivos

Se pretende determinar numéricamente las emisiones acústicas que generan distintos tipos de fallas en materiales compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras cortas de acero, pudiendo evaluar así cuales son las características de las ondas que generan los distintos tipos de fallas en dicho elemento.

Esto podrá ser útil para: la aplicación en la práctica profesional del ingeniero, la optimización del compuesto mencionado y permitirá aumentar los conocimientos en las técnicas de medición e interpretación de eventos de EA.

Los objetivos particulares del trabajo son:

- Demostrar el posible uso de las EA para determinar los tipos de daño producidos en materiales compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras cortas de acero.
- Determinar las características de las emisiones propias de cada tipo de daño y fracturas producidas en la matriz cementicia y la interfaz fibra-matriz.
- Determinar numéricamente los parámetros de las EA que definen el comportamiento del material utilizado en el compuesto modelado.

Capítulo 2

Fundamentos de las técnicas de emisiones acústicas

Físicamente, la EA es la clase de fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía de deformación a partir de fuentes localizadas (Grosse y Ohtsu, 2008).

Las fuentes clásicas de EA son los procesos de deformación relacionados con defectos tales como la generación y propagación de fisuras, deformación plástica, movimientos de planos de dislocación, deslizamientos, rotaciones de granos, micro-roturas de inclusiones, desprendimientos del agregado de la matriz, contracciones o dilataciones por fraguado o variaciones de temperatura, etc.

El origen de la EA es el campo de tensiones creado dentro del material, de manera que de no existir variaciones en el campo de tensiones no se produce la EA.

Cuando una pieza de un sólido tal como hormigón se somete a un proceso de carga hasta rotura, ocurren en su interior una serie de dislocaciones de micro estructura que puede detectarse acústicamente; las mismas van acompañadas de una liberación de energía potencial que, en parte, se transforma en calor, quedando una pequeña fracción, que al radiarse en forma de energía vibratoria puede ser recogida en la superficie del sólido.

Las microestructuras (a escala molecular) tienen como consecuencia la aparición de grietas, fisuras o discontinuidades en la masa de sólido; de este modo un sólido que inicialmente se muestra como buen conductor de energía sonora va aumentando su impedancia acústica por efecto de la deterioración del material.

Todos los materiales producen EA durante la creación y propagación de fisuras y también en su deformación.

Las ondas elásticas se mueven a través del sólido hacia la superficie, donde son detectadas por sensores que son transductores que convierten las ondas mecánicas en ondas eléctricas (Grosse y Ohtsu, 2008). La amplitud (la energía) del impulso de tensión generado en una fuente de defecto puede variar según la naturaleza del defecto y de dinámica del proceso.

Comparado con otros métodos de Ensayos No Destructivos (END), los ensayos de EA pueden monitorear cambios en el comportamiento de materiales durante un largo tiempo y sin mover sus componentes y/o sensores. Esto hace a la técnica bastante única junto con la capacidad de detectar propagaciones de grietas que ocurren no solo en la superficie sino también dentro del material (Grosse y Ohtsu, 2008).

El proceso de detección de fisuras, se basa en la detección de las ondas elásticas producidas por la aparición o crecimiento de un defecto en un material y su conversión de ondas a señales eléctricas, estas son detectadas por sensores que son conectados a la estructura (Grosse y Ohtsu, 2008).

La salida de cada sensor piezoeléctrico es amplificada por un preamplificador de ruido bajo, filtrado para quitar cualquier ruido extraño. Los instrumentos de EA deben proporcionar alguna medida de la cantidad total de la emisión descubierta para la correlación con el tiempo y/o la carga.

Debido a la complejidad de los materiales o estructuras y viceversa, el grado de precisión o detalles de la información debería variar en diferentes clases de aplicaciones de EA, donde el número de fenómenos de EA en cierto periodo de tiempo excede la cantidad de datos en los que se pueden grabar o analizar ondas de señal completa, la extracción en línea de datos (llamados parámetros) de estas formas de onda seguirá dando información valiosa (Grosse y Ohtsu, 2008).

Una de las características más importantes de las TEA es la capacidad de localizar la fuente de un evento de EA; siguiendo la evolución de las ubicaciones de la fuente, la técnica puede conducir a una mejor comprensión del comportamiento de los materiales bajo carga, dando como resultado la imagen en cuatro dimensiones de los desarrollos de defectos.

Ventajas y desventajas de las emisiones acústicas respecto a otros tipos de ensayos no destructivos

Los análisis con técnicas de EA presentan muchas ventajas comparadas a otras técnicas de testeos no destructivos, la más reconocida de todas es que el proceso de daño en materiales estudiados puede ser observado durante la historia de carga sin ningún disturbio para la muestra, permitiendo así el análisis en servicio de la pieza estructural analizada y así la detección de las anomalías en crecimiento previamente a la llegada del colapso.

Otros tipos de técnicas de análisis, tienden a requerir que se detenga la carga en la estructura para el análisis de los posibles daños que hayan ocurrido dentro del material de prueba (Grosse y Ohtsu, 2008).

También, estudios con EA necesitan solamente unos pocos sensores, cuando las condiciones son favorables, siendo capaz de monitorear globalmente la actividad de EA de una estructura, lo que no es posible en todos los tipos de técnicas que solo permiten el análisis por zonas (Grosse y Ohtsu, 2008).

Los sensores pueden estar fijados a la superficie de la muestra en la duración del ensayo y no ser movida para escanear la estructura completa punto por punto (Grosse y Ohtsu, 2008).

Partiendo de la diferencia del tiempo de llegada de las señales de EA a los transductores se puede localizar el defecto; además, dependiendo del tipo de material, permite localizar las fuentes a varios metros de distancia, detectando discontinuidades inaccesibles para otros métodos.

Una desventaja del método de las TEA es que a pesar de que muestras de la misma forma y misma propiedades de material deberían causar similitud de actividades de EA bajo carga, este no es siempre el caso (Grosse y Ohtsu, 2008).

Materiales con partículas dispersadas de dimensiones no homogéneas, como el concreto, no darán similitud de resultados de EA si la longitud de onda de la señal es de una dimensión similar a la heterogeneidad. Es por ello que se dice que los análisis a través de EA poseen una alta sensibilidad al tipo de material; razón por la cual es conveniente comparar los resultados con otros métodos de prueba, por ejemplo: haciendo uso de la inspección visual de la superficie o métodos ultrasónicos, rayos X o radar (Grosse y Ohtsu, 2008).

Otra gran desventaja es que el analista debe tener conocimientos sobre las EA, ya que debe ser capaz de reconocer el “ruido” que debe ser eliminado y debe poder dar una correcta interpretación de los resultados.

Tipos de señales de emisión acústica

Como ya se comentó anteriormente, las fuentes de emisiones acústicas pueden tener características muy variadas debido a diferencias significativas en las señales de origen, variando mucho en su forma, amplitud y ritmo de aparición dependiendo de la estructura y de las condiciones de ensayo. Estas diferencias se hacen más notables cuando se utilizan transductores no resonantes y después de separar las señales del ruido que pueden surgir de fuentes artificiales o naturales, con orígenes dentro o fuera del objeto de prueba.

Cuando se producen muchas señales al mismo tiempo, estas se suman dando lugar a una emisión continua, fenómeno que se utiliza para evaluar el resultado en determinados casos.

Las emisiones continuas, producidas por ejemplo durante el corte de metal o por fricción en cojinetes giratorios (Miller y McIntire, 1987), muestran características de señal muy diferentes cuando se comparan con las señales transitorias (o de ráfaga) causadas por la liberación espontánea de energía durante el daño (fig. 1).

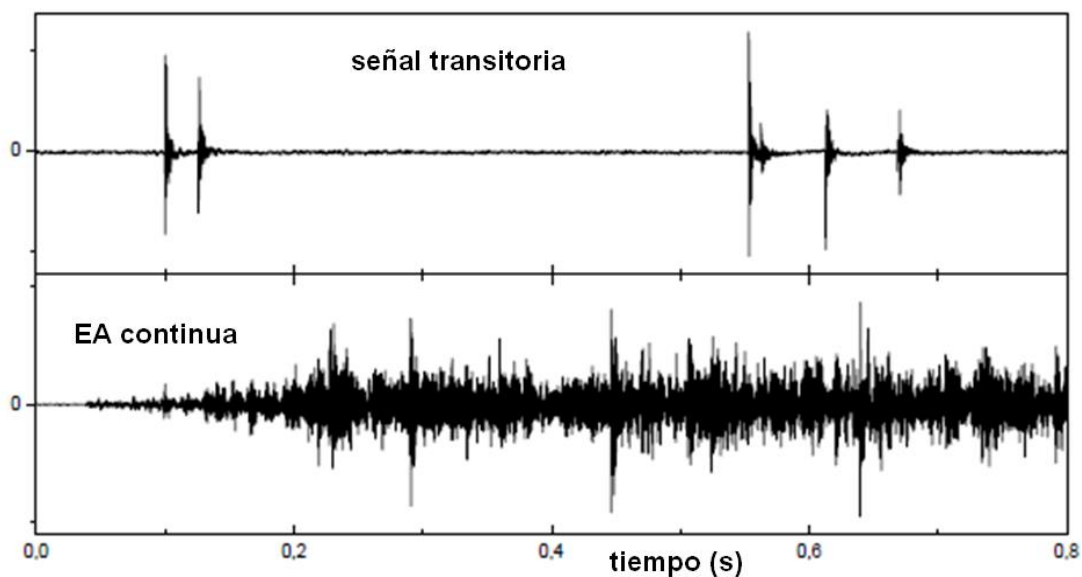


Figura 1. Ejemplos de señales transitorias comparadas con una emisión continua de ondas acústicas (Grosse y Ohtsu, 2008).

1) “Señal transitoria” (bursts)

Estas señales tienen puntos definidos claramente de principio y final del ruido que provoca un defecto (fig. 2); son características de aparición y crecimiento de fisuras de un material.

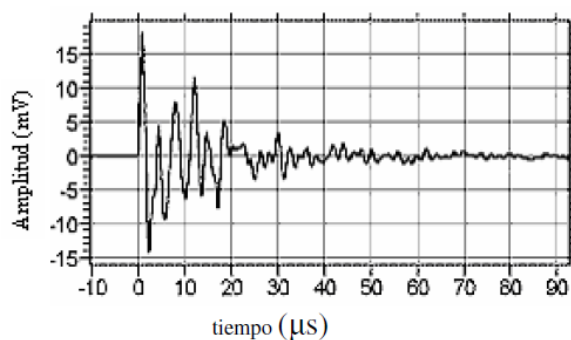


Figura 2. Señal transitoria (Vallen, 2002).

2) “Señal continua”

Son ondas continuas que tienen amplitudes y frecuencias variadas, pero nunca se terminan; son características de movimientos o dislocaciones. La fig. 3 representa un modelo de señal continuo típico.

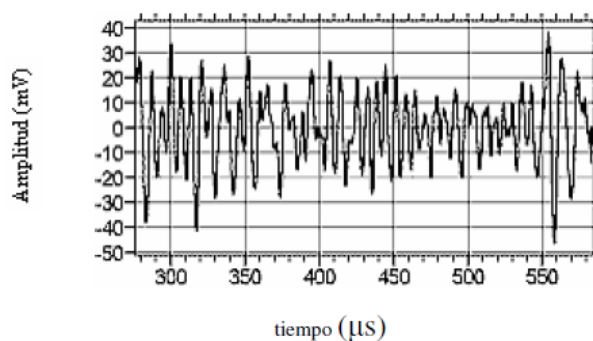


Figura 3. Señal continua (Vallen, 2002).

“El monitoreo de las emisiones acústicas continuas puede utilizarse para controlar el funcionamiento de las máquinas, aunque a menudo es difícil localizar la fuente de la emisión. La mayoría de las técnicas utilizadas en las EA son más adecuadas para señales de ráfagas y, por lo tanto, generalmente se tratan con mayor detalle.” (Grosse y Ohtsu, 2008, p. 4)

Análisis de las señales de emisión acústica

Diferencias entre la TEA basada en parámetros y en la señal

Los enfoques para registrar y analizar las señales de EA se pueden dividir en dos grupos principales: técnicas basadas en parámetros (clásicas) y en señales (cuantitativas). Ambos enfoques se utilizan actualmente con éxito para diferentes aplicaciones y es útil comprender sus diferencias.

La razón por la que existen dos enfoques está relacionada con la rápida evolución de la microelectrónica en las últimas décadas ya que, anteriormente, no era posible registrar y almacenar un gran número de formas de onda (señales) durante un período de tiempo suficiente.

Aunque en los últimos años se han logrado avances técnicos significativos, todavía no es posible utilizar técnicas basadas en señales para supervisar grandes estructuras y edificios debido a los costos económicos relativamente altos y el tiempo requerido para aplicar técnicas modernas basadas en señales, razones por las cuales las técnicas basadas en parámetros todavía son populares.

Las diferencias entre los dos enfoques son cada vez más pequeñas, ya que algunos de los dispositivos utilizados para la técnica clásica son ahora capaces de almacenar las señales detectadas.

Para aplicaciones que utilizan técnicas de análisis basadas en señales, es fácil aplicar herramientas de software personalizadas para extraer parámetros de EA para el análisis estadístico de los datos obtenidos.

Los mejores instrumentos son aquellos que pueden adaptarse a diferentes aplicaciones, pudiéndose grabar formas de onda si se está tomando un enfoque basado en señal o registrar grandes números de eventos si se está tomando un enfoque paramétrico que requiere el análisis estadístico de muchos eventos.

Si los eventos de EA se registran con uno o más sensores, de modo que un conjunto de parámetros se extraen de la señal y posteriormente se almacenan, pero la señal en sí no se almacena, el procedimiento se denomina normalmente una técnica de EA basada en parámetros (o clásica). La idea es que las señales son completamente descritas por el conjunto de parámetros y almacenar una cantidad relativamente pequeña de datos de parámetros consume menos tiempo y espacio de almacenamiento que si se almacenan formas de ondas completas.

Usando la llamada técnica de EA basada en señales (cuantitativa), se registran y almacenan tantas señales como sea posible, junto con sus formas de onda, que han sido convertidas de señales analógicas a digitales (A/D).

Un análisis más comprensivo (y demorado) de los datos es posible utilizando este enfoque, pero normalmente sólo en un entorno de post-procesamiento y no en tiempo real.

Los dos enfoques están más relacionados con la forma en que se almacena la información, aunque en este texto se utilizan con preferencia los términos "TEA basado en parámetros" o "basado en señales".

Ventajas y desventajas del uso de técnicas de EA basadas en parámetros (Grosse y Ohtsu, 2008)

Las principales ventajas de las técnicas de EA clásicas son las altas velocidades de grabación y almacenamiento de datos, que facilitan la rápida visualización de los mismos. Esto hace que la técnica sea muy económica.

En cambio, cuando se almacena una forma de onda de señal completa registrada por varios sensores (aproximaciones basadas en señales), el sistema de grabación se apaga durante un corto período (llamado retardo o tiempo muerto) mientras se almacena la información, lo cual puede resultar en una pérdida de información.

Almacenar sólo algunos parámetros reduce significativamente este tiempo de retardo.

Por el contrario, reducir una señal complicada a sólo unos pocos parámetros puede ser una limitación significativa y a veces francamente engañosa. En aplicaciones prácticas puede

ser difícil discriminar una señal de EA del ruido (por ej.: causada por impulsos electrónicos) después de que la señal se haya reducido a unos pocos parámetros.

Una complejidad añadida, es que en muchos experimentos los parámetros de las señales de EA están fuertemente relacionados con el material y la geometría de la estructura. Diferentes modos de onda relacionados con las ondas de compresión, de cizallamiento o de superficie, así como las reflexiones, contribuyen a que la forma de la señal realce su complejidad.

Los últimos aparatos de medición pueden extraer parámetros EA mientras localizan automáticamente las señales. En estos casos, normalmente no es posible controlar los algoritmos utilizados para este procedimiento, ni influir en la exactitud de la localización.

Varios cientos o incluso miles de eventos pueden ser parametrizados y localizados por estos dispositivos de caja negra por minuto; sin embargo, incluso en situaciones en las que se debe manejar un gran número de señales de EA, el método "clásico" es el elegido.

Es recomendable que se registren e inspeccionen señales de EA seleccionadas al azar para evaluar si el sistema de monitoreo funciona correctamente y verificar las condiciones de ruido.

Ventajas y desventajas del uso de técnicas de EA basadas en señal (Grosse y Ohtsu, 2008)

Si se utiliza un enfoque basado en señales, es necesario analizar las formas de onda registradas por los sensores.

Existe una serie de procedimientos de análisis para evaluar los parámetros de fractura; el primer paso en el análisis es generalmente la localización 3D de la ruptura. También, pueden aplicarse análisis más avanzados, por ejemplo: cálculos del mecanismo de origen.

Una de las mayores ventajas de la TEA basada en señal es la capacidad de discriminación de señal a ruido basada en formas de onda, ya que las formas de onda están disponibles después de la medición y no se borran como se hace normalmente en aplicaciones basadas en parámetros.

Además, es posible aplicar diferentes métodos de análisis de señales utilizando un software de post-procesamiento, que puede incluir algoritmos de clasificación o diferentes técnicas de filtrado para mejorar la relación señal-ruido y así ayudar a extraer información sobre las propiedades del material.

La fiabilidad de la interpretación de los datos puede mejorarse significativamente si se utilizan métodos basados en señales.

El inconveniente de los enfoques basados en señales es que normalmente se puede registrar un número menor de eventos; aunque el tiempo para la extracción de parámetros es inmediato, tienen que ser almacenadas digitalmente un gran número de señales.

Para reducir la cantidad de datos no relacionados con el fallo del material, se deben aplicar algoritmos sofisticados de activación (banda de referencia, velocidad de rotación, etc.). Por un lado, esto puede parecer que añade una interferencia artificial; sin embargo, uno tiene que reconocer que los métodos basados en parámetros suelen utilizar un nivel de umbral arbitrariamente establecido para activar el proceso de extracción de parámetros y esto puede causar aún más inconvenientes.

Por otro lado, debemos tener en cuenta que no todas las señales de EA pueden ser registradas debido a la disipación y efectos geométricos de dispersión que absorben muchas de las señales débiles antes de que alcancen la superficie de la estructura.

“La cuestión de cuál de las técnicas de AE basadas en parámetros o señal es más útil no tiene una respuesta definitiva. Como se ha dicho, las diferencias entre los métodos están desapareciendo a medida que la tecnología mejora. Sin embargo, las tendencias actuales definitivamente favorecen las técnicas basadas en la señal en lugar de otras. La decisión de qué técnica debe aplicarse es principalmente una cuestión de capacidad de almacenamiento de datos y componentes electrónicos y está limitada también por las limitaciones financieras de un proyecto.” (Grosse y Ohtsu, 2008, p. 56)

Análisis de los parámetros de la emisión acústica

El objetivo final de monitorear los fenómenos de EA es proporcionar información beneficiosa para prevenir la fractura fatal, al correlacionar las señales de EA detectadas con un proceso de fractura o deterioro creciente.

La actividad de EA se observa transitoriamente o inesperadamente, y las señales generalmente contienen componentes de frecuencia más alta sobre el intervalo audible así como una variedad de duraciones.

Un disparo de señal se determina convencionalmente mediante el establecimiento del umbral. En el caso de la monitorización de disparo, sólo las señales cuyas amplitudes superan los niveles del umbral se reconocen como señales de EA.

En la edad temprana de la medición de EA, las características paramétricas de las formas de onda se emplearon normalmente para evaluar las características de EA.

Actualmente, con el avance rápido de la tecnología informática, las formas de onda de EA se pueden registrar fácilmente así como las características paramétricas. Por lo tanto, las

características basadas en la forma de onda como la frecuencia de pico y el centroide de frecuencia se determinan adicionalmente en tiempo real.

Las características paramétricas de EA se extraen así y proporcionan buena información para correlacionar el comportamiento de fallo de los materiales.

Identificación de una señal de EA

A diferencia de las ondas detectadas en las pruebas de ultrasonidos o de vibración, las señales de EA emergen rápida y aleatoriamente.

La discriminación de dichas señales de las ondas corrientes es el primer paso para analizar la actividad de EA; para ello, se establece el umbral de voltaje de onda, que es equivalente a un nivel de voltaje en un comparador electrónico.

A continuación, las señales que superan el umbral de voltaje se identifican como señales de EA y la finalización de la señal o la duración se determina como el período cuando ésta no excede el umbral de voltaje establecido.

El protocolo mencionado se ha desarrollado para extraer características paramétricas de EA directamente de los sensores sin la necesidad de grabar la señal.

En el caso de la grabación digital, el tiempo de inicio para registrar la forma de onda es la misma que la anterior y la longitud o duración de una forma de onda que se va a grabar se determina independientemente por los usuarios.

Parámetros de señal EA

Parámetros clásicos / convencionales

La señal eléctrica identificada como señal de EA es generada por fenómenos de fractura. Por lo tanto, las características de los parámetros de EA se han estudiado para inferir fractura o fenómenos físicos.

En lo que sigue, los parámetros de señal más ampliamente utilizados se explican a partir de definiciones ISO 12716 2001:

1. *Golpe / evento*: es una señal que excede el umbral y hace que un canal del sistema acumule datos. Se usa frecuentemente para mostrar la actividad EA con el número contado para un período (tasa) o números acumulados. En la figura 4, la señal se corresponde a un "golpe".

2. *Cuentas / conteos / recuento de tono / contaje de emisión*: es el número de veces dentro de la duración del evento, donde se excede el umbral establecido. Se emplea para cuantificar la actividad de EA así como el "golpe". En la fig. 4 se observan nueve conteos.

Los "recuentos" dependen fuertemente del umbral empleado y la frecuencia de operación. Los conteos entre el tiempo de disparo sobre el umbral y la amplitud de pico se denominan "Cuentas al Pico", que es igual a cuatro en la fig. 4.

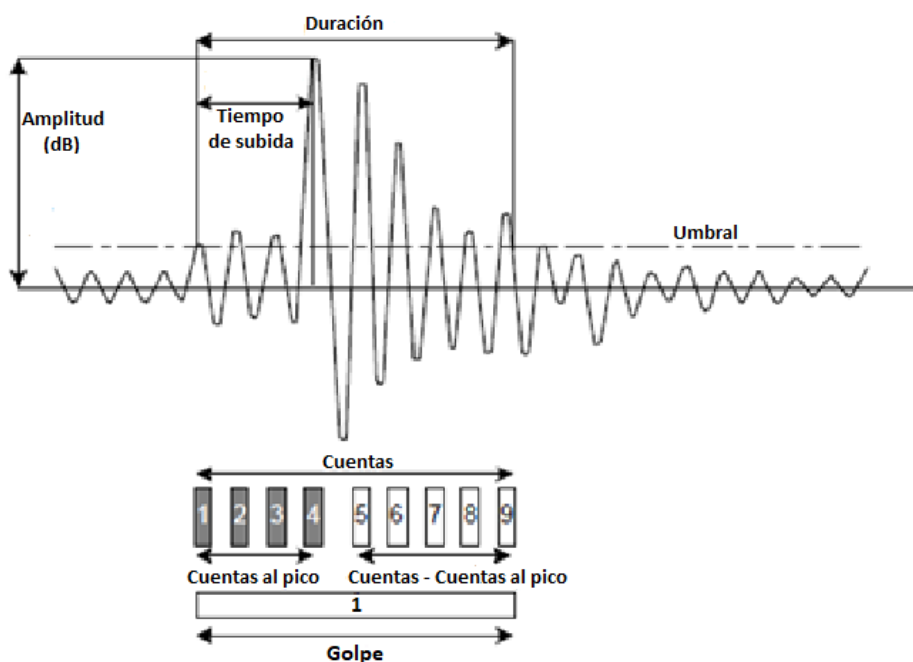


Figura 4. Parámetros convencionales de las señales (Grosse y Ohtsu, 2008).

3. *Amplitud*: generalmente se asigna el voltaje del máximo valor de la señal. Se expresan en una escala de decibelios en lugar de escala lineal donde $1\mu\text{V}$ en el sensor se define como 0 dB de EA. La amplitud está estrechamente relacionada con la magnitud del evento fuente.

Como se ha mencionado, las señales EA se detectan sobre la base del umbral de voltaje, la amplitud es también un parámetro importante para determinar la capacidad de detección del sistema. La magnitud de la amplitud en cada señal se ha analizado a menudo en relación con la distribución de frecuencias.

4. *Duración*: se asigna a un intervalo de tiempo entre el tiempo de disparo de una señal de EA (forma de onda) y el tiempo de desaparición. Se expresa generalmente en microsegundos, lo cual depende de la magnitud de la fuente y del filtrado de ruido.

5. *Tiempo de subida*: se asigna a un intervalo de tiempo entre el tiempo de activación de la señal de EA y el tiempo de la amplitud de pico. Está estrechamente relacionado con la función fuente-tiempo, y se aplica para clasificar el tipo de fractura o eliminar las señales de ruido.

6. *Energía*: las definiciones de energías son diferentes en los proveedores de sistemas de EA, pero generalmente se define como un área medida bajo la envolvente de la señal rectificadas. La energía se prefiere para interpretar la magnitud del evento fuente sobre los

recuentos porque es sensible tanto a la amplitud como a la duración, y menos dependiente del umbral de tensión y de las frecuencias operativas.

Otros parámetros

1. *Frecuencia media*: valor calculado que resulta del cociente entre los "Conteos" y la "Duración", que determina una frecuencia media sobre un golpe de EA. Se utiliza habitualmente cuando las formas de onda de señal son prácticamente difíciles de registrar.

2. *Frecuencia inicial*: valor calculado que resulta del cociente entre las "Cuentas al pico" y el "Tiempo de subida".

3. *Frecuencia de reverberación*: valor calculado que resulta del cociente entre las diferencias entre "Conteos" y "Cuentas al pico", divididos por la diferencia entre la "Duración" y el "Tiempo de subida".

4. *Valor de RA*: valor calculado que resulta del cociente entre el "Tiempo de subida" y la "Amplitud", mostrando el recíproco de gradiente en formas de onda de señal EA, que se reporta en ms/V. Los cálculos de RA se han utilizado para clasificar el tipo de grietas.

Parámetros de frecuencia

Los sistemas de EA recientes son tan potentes que las formas de onda de la señal de EA se pueden registrar en tiempo real.

En la actualidad, tales características en el dominio de frecuencia, como se muestra en la figura 5 desempeñan un papel importante en la interpretación de datos de EA.

1. *Centroide de frecuencia*: característica de frecuencia calculada reportada en kilohertzio, que resulta de una suma de magnitud multiplicada por la frecuencia dividida por una suma de magnitud, como equivalente al primer momento de inercia.

2. *Frecuencia de pico*: característica de frecuencia reportada en kilohertzio, que se define como el punto en el espectro de potencia en el que se observa la magnitud de pico.

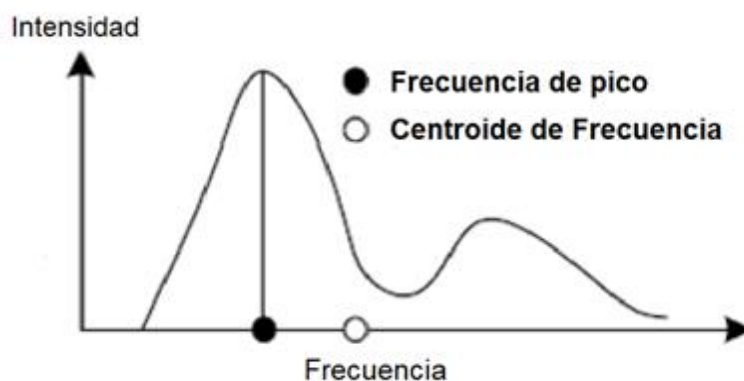


Figura 5. Conformación de la frecuencia de pico y el centroide de frecuencia (Grosse y Ohtsu, 2008) [5].

Análisis paramétrico

Con el fin de interpretar los datos de EA obtenidos, las características paramétricas basadas en correlaciones en el tiempo o en parámetros externos se utilizan habitualmente con su frecuencia de ocurrencia o tendencia acumulada.

Además, los valores estadísticos de los parámetros y algunas combinaciones entre ellos, así como algunos externos han sido estudiados intensivamente para relacionarse con la escala de fractura o el grado de daño en los materiales / estructuras.

Clasificación de fisuras

Para correlacionar el comportamiento de las fisuras con los parámetros de EA, se considerarán dos modos de falla típicos: fractura por tracción (modo I) y por corte (modo II).

En estructuras de hormigón el modo falla cambia con el progreso de la fractura, pasando del modo I al modo II (Grosse y Ohtsu, 2008).

La abertura de una grieta es un movimiento principal cuando las grietas del modo I se nuclean, mientras que el degaste (fretting) o deslizamiento en una grieta existente es un movimiento importante para generar las grietas del modo II (Grosse y Ohtsu, 2008).

En general, la actividad de EA acompañada de crecimiento o formación de grietas se denomina "actividad de EA primaria", mientras que el caso sin crecimiento de grietas se denomina "actividad de EA secundaria" (Grosse y Ohtsu, 2008).

En la etapa estable de crecimiento de la fractura, normalmente se observa actividad EA acompañada de grietas de modo I. Como resultado, se esperan pocos eventos de este tipo durante el proceso de descarga.

Al aproximarse al fallo final, la actividad de EA durante el proceso de descarga podría ser generada como las grietas modo II. Por lo tanto, la actividad de EA durante la descarga tiene un potencial para mostrar el grado de daño.

En materiales de hormigón, se propone la clasificación de tipos de fisuras, utilizando la combinación de la frecuencia media (AF) y los valores de RA. Esta técnica de clasificación ha sido estandarizada (JCMS 2003) y se muestra en la figura 6.

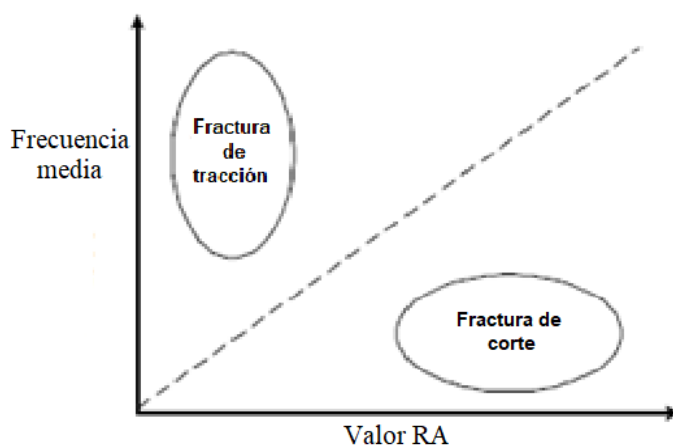


Figura 6. Clasificación del tipo de fractura con la combinación de la frecuencia media y el valor RA (Grosse y Ohtsu, 2008).

Solución del plano de falla - Técnica del primer movimiento

Hay varias formas de determinar el tipo de grieta y la orientación de las fuentes de EA. Una de ellas consiste en utilizar las polaridades de los pulsos iniciales de onda P: esto se conoce como la *Técnica del primer movimiento*.

La distribución de los dos sentidos de la polaridad de la onda alrededor del foco está determinada por el patrón de radiación de la fuente.

Utilizando la distribución de las polaridades, es posible estimar la orientación de los planos nodales (donde no se produce desplazamiento) y, por lo tanto, el mecanismo de la fuente.

Es importante tener en cuenta que, debido a la simetría del patrón de radiación, se pueden ajustar dos planos ortogonales. Estos planos a menudo se conocen como el "plano de falla" y el "plano auxiliar" (Grosse y Ohtsu, 2008).

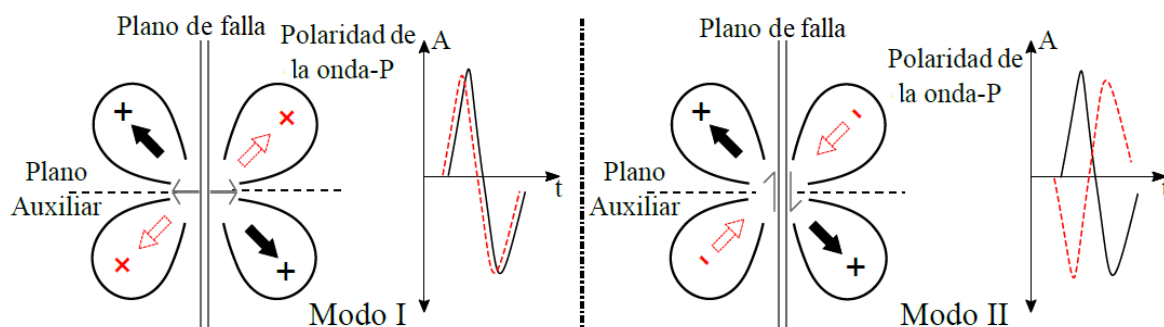


Figura 7. Representación de los patrones de radiación de la onda: de una abertura de una grieta a la izquierda y del cizallamiento de la grieta a la derecha (Birck, 2016).

En el caso de una grieta de apertura (modo I), las polaridades positivas se medirían en todos los sensores; pero en el caso de una fractura por corte (modo II), la polaridad del inicio de la onda P cambia de positiva (deflexión hacia arriba de la forma de onda) a negativa (deflexión hacia abajo) de acuerdo con la posición del sensor con respecto a la fuente y los planos cortantes (fig. 7).

Lo expresado anteriormente supone que los sensores se han calibrado correctamente, de modo que una deflexión positiva de la señal indica un movimiento de alejamiento de la fuente.

Si se analiza el patrón de radiación de la fuente, es importante que el patrón se muestree adecuadamente sobre la esfera focal. Esto implica que se utilicen suficientes transductores, proporcionando una buena cobertura de la esfera focal, es decir, una buena distribución de los sensores en todos los ángulos con respecto al plano de falla.

Distribución de amplitudes

Al generarse una grieta pueden aparecer diferentes tipos de señales de EA con rangos de frecuencias y amplitudes variables. Estas diferencias pueden estar relacionadas con el grado de daño de la estructura.

Las microfisuras generan un gran número de eventos de una pequeña amplitud, mientras que las macrofisuras generan menos eventos pero de mayor amplitud.

Cuando las grietas se abren se crean muchos eventos de pequeña amplitud, ya que la mayor parte de la energía ya se ha liberado (Li y Xi, 1995; Iwanami et al., 1997).

También, las grietas de tracción generan eventos de gran amplitud, mientras que las fisuras de cizallamiento crean señales de amplitud más pequeñas (Li y Xi, 1995; Iwanami et al., 1997).

“El análisis del valor b puede tener en cuenta todos estos factores y podría utilizarse como una forma alternativa de procesar e interpretar los datos registrados durante un monitoreo de EA local” (Colombo, 2013).

Debido a que la amplitud de pico de la EA se asocia con la magnitud de la fractura, el valor b (que se define como una pendiente de la distribución de amplitud) se conoce como un índice efectivo relacionado con los estados de fractura (Mogi, 1962; Scholz, 1968).

Un valor b elevado muestra el estado de los materiales donde las fracturas microscópicas ocurren más predominantemente que las fracturas macroscópicas. Por otro lado, un valor b pequeño indica que prevalece la ocurrencia de macro-fracturas.

En sismología, los eventos de mayor magnitud ocurren con menor frecuencia que los eventos de menor magnitud. Este hecho puede cuantificarse en términos de una relación de frecuencia de magnitud, para lo cual Gutenberg y Richter propusieron la fórmula empírica:

$$\log_{10} N = a + bM_L \quad (2.1)$$

donde M_L = magnitud de Richter de los eventos; N = frecuencia incremental (es decir, el número de eventos con magnitudes en el rango de $M_L \pm \Delta M/2$); a y b son constantes empíricas (Shearer, 1999).

La magnitud Richter (M_L) es proporcional al logaritmo de la amplitud máxima (A_{max}) registrada en una traza sísmica, corregida para la atenuación en amplitud con la distancia debida a la propagación de la onda y la absorción inelástica. Esta magnitud es proporcional al logaritmo del área de ruptura fuente (S):

$$M_L \propto \frac{2}{3} c \log_{10} A_{max} \propto \frac{2}{3} c \log_{10} S \quad (2.2)$$

donde el factor c varía según el transductor.

El mismo principio se puede aplicar al método de EA para estudiar la escala de la "distribución de amplitud" de las ondas de EA generadas durante el proceso de agrietamiento en el laboratorio o en las estructuras de ingeniería. A partir de la ecuación 2.1, el valor b es el gradiente negativo de la gráfica logarítmica de frecuencia-magnitud y, por lo tanto, representa la pendiente de la distribución de amplitud.

Como el valor b cambia sistemáticamente con las diferentes etapas de crecimiento de la fractura (Sammonds et al., 1994), podría utilizarse para estimar el desarrollo del proceso de fractura. En términos de la TEA, la fórmula de Gutenberg-Richter puede modificarse como:

$$\log_{10} N = a + b' A_{dB} \quad (2.3)$$

donde ahora A_{dB} = pico de amplitud de los eventos de EA en decibelios

$$A_{dB} = 10 \log_{10} A_{max}^2 = 20 \log_{10} A_{max} \quad (2.4)$$

Comparando las ecuaciones 2.2 y 2.4, el valor b obtenido con esta relación debería multiplicarse por un factor de 20 para ser comparable con el que se usa en la sismología (Shiotani et al., 2001).

Valores entre 50 y 100 eventos se consideran números apropiados por los resultados del coeficiente de correlación cuando los datos se ajustan a la ecuación de Gutenberg-Richter (Shiotani et al., 2001).

Debemos tener en consideración que el valor de la amplitud de pico de EA varía con las condiciones de monitorización, los métodos de configuración del sensor, medios de propagación y localizaciones de ocurrencia; por lo tanto, la distribución de amplitud de EA también depende de estas condiciones.

En Sammonds et al. (1994) se trata la evolución del daño en rocas; para ello, se traza la tendencia del valor b en el tiempo y se observa un mínimo instantes antes de la falla dinámica. De ello podría deducirse que la disminución en el valor b conduce directamente a la determinación de la ocurrencia de la falla dinámica que se produce inmediatamente después del valor b mínimo.

En términos generales, cuando las microfisuras distribuidas se producen en las primeras etapas del daño, el valor b es alto y cuando los macrofisuras comienzan a localizarse, el valor b es bajo.

Capítulo 3

Revisión bibliográfica

Este capítulo presenta una breve explicación de materiales compuestos, la clasificación según su configuración y cuando recurrir a ellos. Luego se mencionarán los distintos tipos de mecanismos de aumento de la tenacidad en compuestos, haciendo mayor énfasis en el mecanismo por el uso de fibras. Por último, se explicarán los procesos de ruptura que ocurren en los compuestos reforzados por fibras cortas con distribución aleatoria.

Materiales compuestos

El uso de materiales compuesto en el diseño estructural tuvo un incremento notable en los últimos años, ya que presentan ciertas cualidades y características especiales, que resultan diferentes a los materiales simples isótropos de uso convencional en estructuras, presentando una elevada relación resistencia-peso, rigidez-peso y resistencia a la corrosión, siendo adecuados para construcciones cuyo peso es una variable fundamental de diseño.

Los componentes estructurales que demandan formas complejas, resistencia a los impactos, elevada rigidez y grandes volúmenes de producción son ideales para la fabricación a partir de materiales compuestos (Oñate et al., 2000).

Un material compuesto está constituido por distintas fases o componentes. Cada una de estas fases puede considerarse uniforme, con propiedades cuantitativas conocidas. A pesar de que el número de constituyentes puede ser muy grande en el campo de la ingeniería mecánica, los materiales compuestos suelen estar formados por un material llamado refuerzo, inmerso dentro de otro llamado matriz. (Uberti, 2012).

Dos aspectos determinan las propiedades de un material compuesto: las geometrías de las fases y las propiedades físicas de cada una de ellas.

Si consideramos la geometría de las fases, se pueden clasificar en materiales particulados (en los que la fase de refuerzo se encuentra en forma de partículas que se adhieren entre sí mediante una matriz continua); o en *materiales fibrosos* (en los que el refuerzo se encuentra en forma de fibras).

En los materiales fibrosos, las fibras pueden ser cortas y tener una orientación aleatoria o pueden ser largas y tener una orientación específica.

En este trabajo se tratará principalmente los materiales compuestos reforzados con fibras cortas.

Mecanismos de aumento de tenacidad

Como ya se mencionó previamente, en los últimos años se ha perfeccionado considerablemente la generación de nuevos materiales, denominados como materiales compuestos, destinados a sustituir a los convencionales.

Los materiales compuestos, se constituyen por la acción combinada de dos o más elementos distintos, que permiten mejorar la combinación de características mecánicas tales como la rigidez, fragilidad, tenacidad, capacidad de absorción de energía de deformación, dureza, comportamiento post-fisuración, la resistencia a las condiciones ambientales y a altas temperaturas.

Para poder desarrollar estos compuestos, es necesario conocer las propiedades mecánicas, constitución física y química de los materiales y la forma en que se pueden combinar.

La utilización de fibras para refuerzo de hormigones de alta resistencia ha tenido resultados muy satisfactorios al ser sometidos a altas temperaturas, y permiten obtener una mayor eficiencia en los resultados económicos de grandes obras de la ingeniería. Esta nueva tecnología de construcción permite que el hormigón pueda aumentar considerablemente su calidad en muy poco tiempo, cuestión que no se logra con ningún otro material estructural. La figura 8 muestra algunas aplicaciones de hormigón reforzado con fibra.



Figura 8. Aplicaciones de hormigón reforzado con fibras (Maccaferri, 2002-2007).

Muchos compuestos están formados por sólo dos fases en el que uno se denomina matriz, que es continua y rodea a la otra fase, que es la fase dispersa. Estos se basan en las propiedades de las fases que lo constituyen, así como también en la cantidad relativa y la geometría de la fase dispersa.

Los mecanismos fundamentales de aumento de tenacidad son por microfisuras, por partículas o por fibras, siendo estas últimas las que mayor efectividad generan en la mejora de

resistencia a la fractura, durabilidad, ductilidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción en flexión, siempre que el tipo de fibra utilizada sea apropiada y en dosis adecuadas (Uberti, 2012).

Para que el aumento de tenacidad se pueda realizar por microfisuras, las mismas deben tener un crecimiento estable, cuestión que no sucede en materiales frágiles ya que el grado de endurecimiento de las microfisuras depende de la temperatura; además, los bajos esfuerzos residuales no pueden impedir que se vuelvan inestables y se propaguen (Uberti, 2012).

El refuerzo de materiales por la utilización de partículas se puede diferenciar en: materiales reforzados por partículas de gran tamaño y materiales reforzados por dispersión.

En el primer caso, las partículas puede tener gran variedades geométricas pero con dimensiones similares en todas las direcciones. Restringen el movimiento en las proximidades de la matriz soportando parte de la carga transferida por la misma, de este modo aumentan la tenacidad del compuesto.

En el segundo caso, el mecanismo de aumento de tenacidad es similar al que ocurre con el endurecimiento por precipitación, en el cual el aumento de tenacidad se debe a la interacción entre las partículas y discordancias dentro de la matriz. En la fabricación de estos materiales compuestos, es necesario mantenerlos a elevadas temperaturas durante períodos prolongados, ya que las partículas dispersas son elegidas para ser reactivas con la fase matriz (Uberti, 2012).

Los materiales también pueden ser reforzados a través de whiskers que son monocristales muy delgados (pequeños filamentos) que tienen un cociente longitud-diámetro muy grande, poseen alto grado de perfección cristalina y virtualmente están libres de defectos; por ello, presentan elevada resistencia y costo. Su dificultad radica en que es difícil e impracticable incorporarlos dentro de una matriz.

Los compuestos reforzados por fibras dúctiles que poseen elevada resistencia a la tracción, así como también gran adherencia fibra-matriz, permite a los compuestos generar el mecanismo más eficiente de refuerzo. Esto contribuye al aumento de la tenacidad en todos los procesos, desde el despegue hasta la ruptura de la fibra.

Aumento de la tenacidad de materiales compuestos reforzados por fibras

La relación de tensión de las fibras y la apertura de la fisura se relacionan con el aumento de tenacidad de compuestos reforzados por fibras. Esta tenacificación se logra por diversos procesos y efectos tales como: el despegue de la interfaz fibra-matriz (*debonding*), el deslizamiento (*slip*) o la extracción de la fibra respecto a la matriz (*pull-out*), la fragmentación de la matriz en la región de salida de la fibra (*spalling*) y a la tensión de ruptura de la fibra (*aparent strength*).

El mecanismo de aumento de tenacidad consiste en que la matriz transfiere parte de la tensión aplicada a las fibras, que resisten una porción de la carga; por lo tanto, el grado de refuerzo dependerá de un enlace fuerte en la interfaz fibra-matriz.

En la figura 9 se muestran fibras comerciales Wirand® agregadas al concreto como armadura tridimensional, encargadas de redistribuir las tensiones aplicadas al elemento estructural, restringiendo propagaciones de grietas y aumentando la resistencia después de la fisuración del elemento estructural.

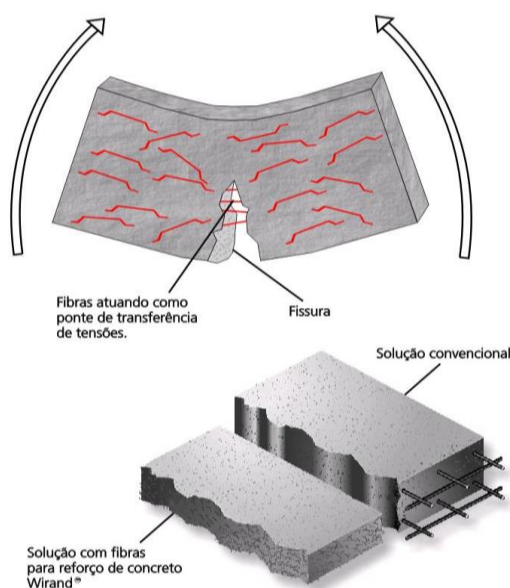


Figura 9. Fibras de acero reforzando hormigón (Maccferri, 2002-2007).

El módulo de elasticidad de la fibra debe ser mayor al de la matriz para lograr un mayor rendimiento estructural del compuesto fibra-matriz, lo que brindará una resistencia a la tracción elevada. Para ello, se necesita que la adherencia entre ambos materiales sea óptima para así evitar el arrancamiento de las fibras antes de que la resistencia sea movilizada.

En el trabajo realizado por Uberti B. (2012) se demuestra que el efecto de la orientación de la fibra y la distribución en la matriz también debe ser considerado, ya que la orientación de una fibra relativa al plano de ruptura o fisura, influye fuertemente en su capacidad de transmitir cargas. Si una fibra es colocada paralela al plano de ruptura no tiene ningún efecto, mientras que una fibra perpendicular a la ruptura tiene el máximo efecto.

La fibra se comporta como una barrera contra la propagación de grietas, aunque algunas de ellas pueden llegar a fallar individualmente, la fractura total del compuesto no se produce hasta que un gran número de fibras han fallado.

La alta resistencia en la unión entre la fibra y la matriz es esencial, ya que la resistencia final del material compuesto depende de la magnitud de esta conexión. (Uberti, 2012)

Procesos de ruptura de materiales compuestos (Uberti, 2012)

El estudio del proceso de ruptura de materiales compuestos permite entender los procesos que ocurren en diversas escalas del problema estudiado.

El efecto de aumento de la tenacidad (*toughening*) que fibras cortas producen en cerámicos es conocido y aplicado en varios campos de ingeniería.

Conocer con profundidad como es la interacción de esfuerzos que se presentan en la fibra y matriz durante este proceso permite mejorar este efecto como lo muestran trabajos clásicos en el área (Brandt, 1985; Brebbia et al., 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*, *snubbing* y *spalling* los cuales producen que la descripción del aumento de tenacidad, conocido como *toughening*, sea complejo. Se describen brevemente los fenómenos antes citados:

Cuando una fisura atravesada por una fibra tiende a abrirse, la fibra antes de desprenderse de la matriz ejerce una presión intensa sobre la matriz. Antes de que ocurra el despegue (*debonding*), las tensiones generadas por esta presión alcanzan un máximo.

Es posible que las tensiones debajo de la fibra inclinada cerca del punto dónde la fibra sale de la matriz, 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 indicado en la figura 10.

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 fibra de romperse, en otras palabras, la fibra permanece intacta y puede contribuir al aumento de tenacidad.

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 fig. 11. La superficie despegada de la fibra puede deslizarse con respecto a la matriz, comenzando un proceso de fricción entre fibra y matriz.

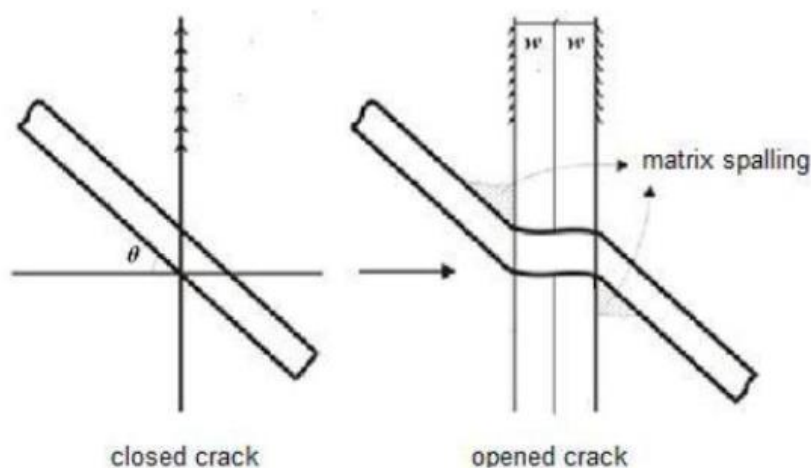


Figura 10. Efecto de Spalling en la interacción entre Fibra-Matriz (Uberti, 2012).

En el punto de salida, dónde la fibra comienza a sobresalir de la cara de la fisura, se produce un pliegue de la fibra que se puede observar en la fig. 11. En este punto, la matriz actúa como una polea con fricción, este efecto es denominado *snubbing*. Li (2003) lo explica como una cuerda alrededor de una polea dónde la fricción se incrementa exponencialmente.

La combinación de los efectos de *spalling* y *snubbing* hacen que el aumento de tenacidad debido a la interacción fibra-matriz sea complejo.

El efecto de *snubbing* se presenta únicamente cuando el ángulo entre la dirección de la fibra y la fuerza aplicada no están alineadas. En este fenómeno se muestra como la fuerza ejercida por la fibra incrementa en esta nueva configuración, es decir a mayor ángulo, indicado como Φ_f en la figura 11, mayor será la fuerza que actúa sobre la parte de la fibra que continúa embebida en la matriz P_{sf} .

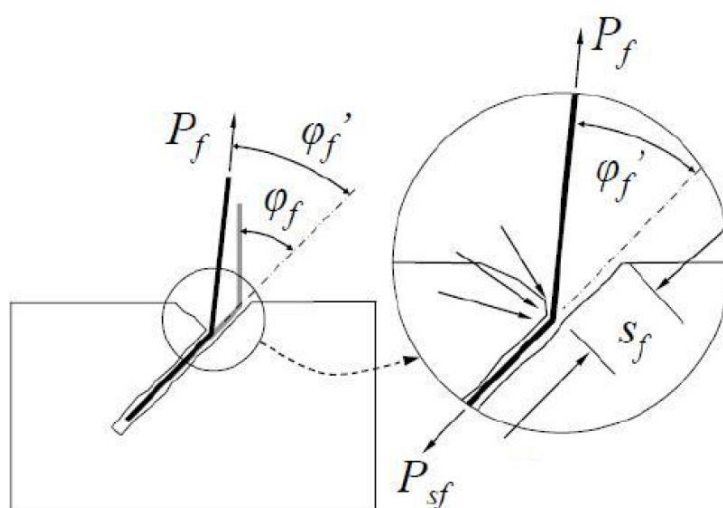


Figura 11. Ilustración del efecto de snubbing (Uberti, 2012).

Capítulo 4

Materiales y métodos

En el siguiente capítulo se describe las bases del método numérico utilizado para el modelado del problema en estudio. Además, se explica la forma en que se obtienen los resultados del análisis de EA utilizando el MED. Estos resultados se utilizan para la evaluación y el monitoreo del daño en especímenes de material cuasi frágil reforzados por fibras cortas, que se presenta en los próximos capítulos.

Método de los elementos discretos

En el Método de los Elementos Discretos (MED) se considera al medio modelado como un sistema de partículas discretas, generalmente de forma esférica y masa conocida. En el método cada partícula es identificada separadamente y sus posiciones instantáneas son determinadas a partir de las ecuaciones de movimiento.

Cundall aparece como uno de los principales precursores del método (Cundall, 1971 y 1979). El método que propuso se basa en realizar una integración explícita de las ecuaciones de movimiento de una estructura formada por partículas rígidas con masas conectadas entre sí, mediante resortes y amortiguadores.

El MED fue aplicado con gran éxito en el modelado numérico de procesos que envuelven un comportamiento discontinuo predominante, relacionado con sólidos no cohesivos. También ha sido aplicado con suceso en el estudio de materiales susceptibles de fracturar, donde la hipótesis de medio continuo, base de los métodos numéricos tradicionales (elementos finitos y de contorno) es violada.

Como ejemplos se pueden citar el transporte de sedimentos en un fluido (Goth y Sakai, 1997 y Ching-Jang Lin, 2000), modelado de filtros con capas granulares (C.S. Chou, 2000). También se utilizó en el modelado de procesos de degradación y fractura en sólidos cohesivos, entre los cuales pueden ser citados: simulación de explosión en rocas (Ladislav, 2003; Procházka, 2004), fractura de materiales compuestos como el hormigón, por ejemplo (Sawamoto, 1998; Camborde, 2000; Brara, 2001; Wittel, 2003).

Particularmente, a través de la formulación del MED utilizada en este trabajo, fueron modelados procesos de fractura dinámica en rocas, producto de terremotos (Dalguer y otros, 2003), impacto en concreto armado (Riera, 1980, 1984), procesos de fractura en hormigón y hormigón armado (Iturrioz y Riera, 1998), simulación del comportamiento de suelos frente a cargas explosivas (Iturrioz y Riera, 2001), simulación de propagación dinámica de fisuras

(Spellmeyer y otros 2001), problemas de impacto en materiales compuestos poliméricos (Barrios D'Ambra y otros 2002, 2003), fenómenos de fractura por impacto en polímeros (Barrios D'Ambra y otros, 2004). También existen trabajos previos en los cuales se presenta la determinación de parámetros fractomecánicos con el MED publicados por Tech y otros (2003), Kostaski y otros (2004 y 2006), Barrios D'Ambra y otros (2006). Trabajos como los de Uberti y otros (2016.a y 2016.b) también implementaron esta formulación para el estudio de materiales compuestos reforzados por fibras cortas.

En otro abordaje, algunos trabajos combinan el método de los elementos discretos con el método de los elementos finitos (Gethin, 2001; Munjiza, 2002, 2004; entre otros).

Características de la formulación del método utilizada en este trabajo

La formulación original fue propuesta por Nayfeh y Hefzy en 1978 (citado por Hayashi) que reemplazaron una estructura reticulada espacial por un continuo equivalente, para disminuir la cantidad de grados de libertad y disminuir así el esfuerzo computacional.

El modelo de discretización empleado en este trabajo fue desarrollado por Hayashi (1982) y verificado también por Rocha (1989) e Iturrioz (1995).

El Método de los Elementos Discretos consiste esencialmente en la discretización espacial del continuo por medio de un reticulado espacial formado por la repetición de un módulo regular. Las rigideces de las barras que componen el reticulado son equivalentes a la del continuo que se quiere representar. Como se consideran barras de reticulado espacial, por cada nudo se tienen tres grados de libertad. La masa del modelo es discretizada y concentrada en los nodos del reticulado espacial ya mencionado.

La figura 12 muestra el arreglo cúbico básico o módulo. Este módulo está compuesto de ocho nodos en sus vértices más un nodo central.

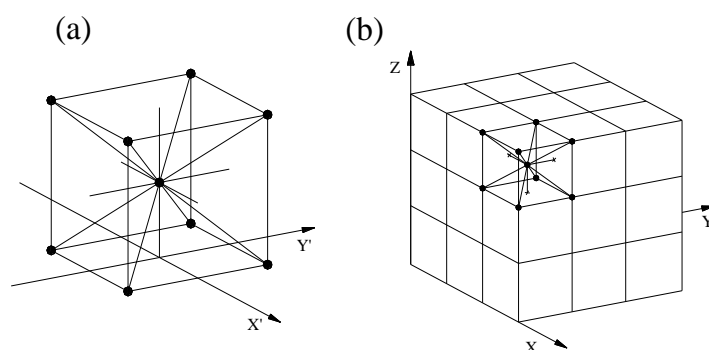


Figura 12. a) Detalle del módulo cúbico básico, b) Prisma compuesto por varios módulos cúbicos.

Rigidez de las barras equivalentes al continuo

La equivalencia entre el arreglo cúbico y un sólido elástico ortótropo con los ejes principales del material orientados en la dirección de los elementos longitudinales fue

verificada por Hayashi (1982), dentro del campo de la elasticidad lineal. Sólo debe ser impuesta la restricción $\nu = 0.25$ al valor del módulo de Poisson para que la equivalencia sea perfecta, es decir que el material se comporte como isótropo. Para otros valores de ν aparecen pequeñas diferencias en los términos de corte, estas diferencias pueden despreciarse sobre todo cuando se está interesado en la respuesta no lineal del modelo estudiado.

A continuación se presenta en forma resumida las deducciones que permiten llegar a las constantes elásticas de un sólido y a las rigideces equivalentes de las barras para el módulo cúbico presentado en la figura 12, las cuales fueron desenvueltas en las tesis de Hayashi (1982) e Iturrioz (1995) y en el trabajo de Nayfeh y Hefzy (1978).

La relación constitutiva de un cuerpo elástico arbitrario, en notación indicial, se puede escribir de la siguiente forma:

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i, j = 1 \dots 6) \quad (4.1)$$

En el caso del cuerpo anisótropo y elástico la matriz de las constantes elásticas, C_{ij} , queda definida conociendo 21 parámetros independientes. Si el material es isótropo, es posible realizar simplificaciones que permiten expresar la matriz C_{ij} en función apenas de dos constantes independientes. En este último caso, se puede escribir C_{ij} como sigue:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

donde C_{11} , C_{12} , C_{44} son funciones del módulo de elasticidad longitudinal E y del coeficiente de Poisson ν .

Como se están analizando estructuras reticuladas a partir de elementos unidireccionales es de esperar que cada elemento contribuya a la rigidez global de la estructura y la suma de las contribuciones medias de cada barra forme la matriz final.

Como todas las barras poseen el mismo módulo de elasticidad E , cada conjunto de barras paralelas define un continuo con una propiedad unidireccional efectiva, que será llamada Q_{11} . Como Q_{11} es tomado como un valor medio ponderado con relación al área de influencia de la barra en un determinado conjunto de barras paralelas, su valor dependerá de la separación entre estas barras.

El elemento cúbico de la figura 12 posee dos valores diferentes para Q_{11} , uno correspondiente a las columnas que son normales a las caras del cubo y otro correspondiente

a las barras diagonales. Estas propiedades serán diferenciadas respectivamente por Q_{11}^n y Q_{11}^d .

Para una estructura cúbica el valor del parámetro Q_{11}^n puede ser fácilmente determinado proyectando el área de las barras en una cara del cubo como se muestra en la figura 13 a).

Entonces en cada cara del módulo cúbico de área Lc^2 se tiene una contribución de dos barras normales enteras. De esta forma, cada elemento tiene un área efectiva de contribución igual a $(Lc^2/2)$. Por eso, la relación entre la rigidez de la barra $E \cdot A_n$ y el área efectiva de contribución de la misma provee el valor medio de una propiedad unidireccional efectiva en la dirección de las barras normales a las caras del módulo Q_{11}^n :

$$Q_{11}^n = \frac{E \cdot A_n}{Lc^2/2} \quad (4.3)$$

En forma similar se procede para obtener el valor medio de la propiedad unidireccional en la dirección de las barras diagonales en relación a las caras del módulo cúbico Q_{11}^d . Se debe también, determinar el área efectiva de contribución de cada diagonal, la cual es indicada en la figura 13 b). Luego, Q_{11}^d está dado por la expresión:

$$Q_{11}^d = \frac{\sqrt{3} \cdot E \cdot A_d}{Lc^2} \quad (4.4)$$

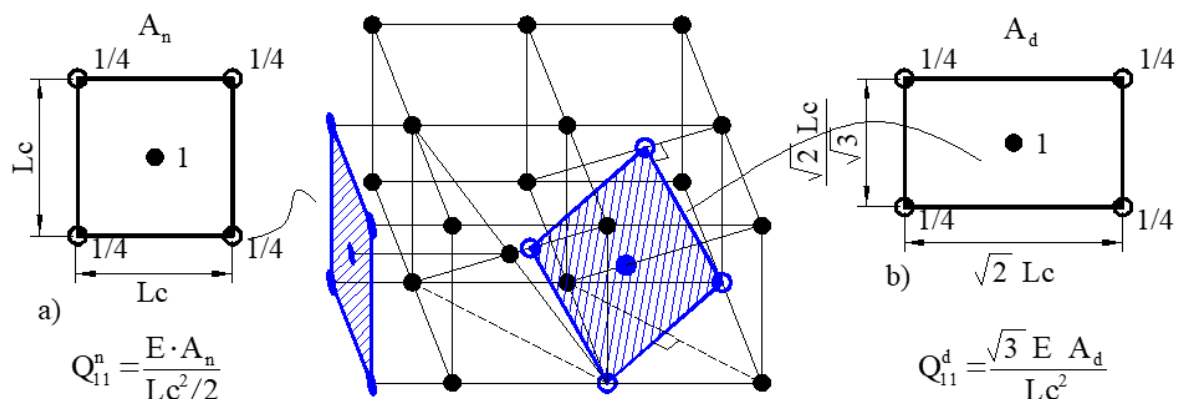


Figura 13. Determinación del área efectiva de las barras a) normales y b) diagonales.

En la representación del continuo utilizada en este trabajo, a través de la estructura reticulada, es necesario que se considere la influencia de cada barra en la rigidez del sólido equivalente, o sea, una rigidez global. Para esto es utilizada la ecuación 4.5 (Nayfeh y Hefzy 1979; Iturrioz 1995), que permite la transformación de las constantes elásticas de un sistema ortogonal de coordenadas cartesianas x_i para otro cuyas coordenadas son \bar{x}_i .

$$\overline{Q}_{ij} = \sum_{I=1}^3 f_I(Q_{I1}^n, \alpha_{Ikl}^n) + \sum_{J=1}^4 f_J(Q_{11}^d, \alpha_{Jkl}^d) \quad (k,l = 1, 2, 3) \quad (4.5)$$

donde α_{Iij}^n y α_{Jkl}^d son los cosenos directores de los sistemas cartesianos \bar{x}, x_I^n y \bar{x}, x_J^d respectivamente. \overline{Q}_{ij} representa las constantes elásticas del sólido equivalente representado por la estructura reticulada.

El primer término corresponde a la contribución de las barras normales a las caras del módulo cúbico y el segundo termino corresponde a las cuatro direcciones de las diagonales del cubo.

Trabajando con las ecuaciones 4.3 a 4.5 se obtiene:

$$\begin{aligned} C_{11} &= Q_{11}^n \cdot \left(1 + \frac{4}{9} \cdot \delta\right) \\ C_{12} &= Q_{11}^n \cdot \left(\frac{4}{9} \cdot \delta\right) \\ C_{44} &= Q_{11}^n \cdot \left(\frac{4}{9} \cdot \delta\right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

donde:

$$\delta = \frac{Q_{11}^d}{Q_{11}^n} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{A_d}{A_n} \quad (4.7)$$

sustituyendo las expresiones de C_{ij} en la matriz (3-12) se obtiene:

$$C_{ij} = \frac{2 \cdot E \cdot A_n}{Lc^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 + \frac{4}{9} \cdot \delta & \frac{4}{9} \cdot \delta & \frac{4}{9} \cdot \delta & 0 & 0 & 0 \\ \frac{4}{9} \cdot \delta & 1 + \frac{4}{9} \cdot \delta & \frac{4}{9} \cdot \delta & 0 & 0 & 0 \\ \frac{4}{9} \cdot \delta & \frac{4}{9} \cdot \delta & 1 + \frac{4}{9} \cdot \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{9} \cdot \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4}{9} \cdot \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4}{9} \cdot \delta \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

que es la expresión propuesta por Nayfeh y Hefzy (1978), dónde A_n y A_d son datos del problema.

En el trabajo de Nayfeh y Hefzy (1978) se aclara que la ecuación 4.8 es equivalente a la matriz de rigidez de un material isótropo y homogéneo sólo en el caso en que $\delta = 9/8$ (lo

que implica que $\nu = 0.25$). Para otros valores de ν la equivalencia no es perfecta y las diferencias se concentran en los términos de corte (Iturrioz, 1995).

Las constantes elásticas E , ν y μ pueden ser obtenidas para el continuo equivalente a partir de los correspondientes C_{ij} de la expresión anterior, como sigue:

$$\begin{aligned} E &= C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{11} + C_{12}} \\ \nu &= \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \\ \mu &= \frac{1}{2}C_{44} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Considerándose las ecuaciones 4.8 y 4.9, es obtenida la relación entre las constantes elásticas E , ν y μ y las constantes elásticas del sólido equivalente de la estructura reticulada, ecuación 4.10.

$$\begin{aligned} E &= \frac{2 \cdot E \cdot A_n \cdot (9 + 12\delta)}{Lc^2 \cdot (9 + 8 \cdot \delta)} \\ \nu &= \frac{4 \cdot \delta}{9 + 8 \cdot \delta} \\ \mu &= \frac{8 \cdot E \cdot A_n \cdot \delta}{9 \cdot Lc^2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Como lo que interesa es obtener las rigideces de las barras ($E \cdot A_n$) y ($E \cdot A_d$) en función de las propiedades elásticas del sólido que representa, E , ν , simplemente reemplazamos estos valores en la ecuación 4.7 obteniendo:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{9 \cdot \nu}{(4 - 8 \cdot \nu)} \\ E \cdot A_n &= \frac{Lc^2 \cdot (9 + 8 \cdot \delta)}{2 \cdot (9 + 12 \cdot \delta)} \cdot E \\ E \cdot A_d &= \frac{2 \cdot \delta \cdot E \cdot A_n}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Estas expresiones son válidas si el módulo o arreglo básico de barras es cúbico, como el mostrado en la figura 12 a).

Para una célula básica de forma diferente, se deben obtener nuevas relaciones. Bush y otros (1977) y Noor y Mikulas (1988) (citados por Hayashi, 1983 e Iturrioz, 1995) presentan estas relaciones para tetraedros, en cuanto otros autores proponen realizar el cálculo de las rigideces de las barras directamente por calibración numérica. Schlangem (1993) realizó una

revisión bibliográfica de varios tipos de arreglos utilizados en el modelado de estructuras de hormigón.

Ostoja y Starzenski (1995) también presentan el cálculo de propiedades equivalentes de barras para el caso en que existe ortotropía utilizando células tetraédricas.

Masas nodales

Como se comentó anteriormente, la masa del cuerpo simulado se discretiza y se la coloca en los nudos del reticulado, y el valor de la misma depende del volumen de influencia del nudo. Considerándose el módulo cúbico básico de las figuras 12 a) o 13, se puede observar que en el volumen de dicho módulo (Lc^3) están comprendidos dos nudos, el central y la suma de la octava parte que aporta cada nudo de las aristas del módulo.

Como la masa del continuo comprendida dentro de ese volumen elemental es $\rho \cdot Lc^3$, siendo ρ la densidad del material, la masa de cada nudo completo deberá ser la mitad ($\rho \cdot Lc^3/2$).

Los nudos del vértice del modelo global tienen solamente un octavo de la masa de un nudo completo, por lo tanto su masa será de $\rho \cdot Lc^3/16$. Los nudos de las aristas del modelo global tendrán un cuarto de la masa del nudo completo ($\rho \cdot Lc^3/8$) y los nudos pertenecientes a las caras o superficies del modelo global la mitad ($\rho \cdot Lc^3/4$).

Solución de la ecuación de equilibrio

Como se explicó anteriormente se consiguió representar el continuo por un sistema tridimensional de n grados de libertad.

Para cada nudo de masa \mathbf{m} es considerado el sistema de fuerzas representado en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 14. Quedando la ecuación de movimiento para el sistema completo:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\bar{\mathbf{x}}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}} + \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{t}) - \bar{\mathbf{P}}(\mathbf{t}) = 0 \quad (4.12)$$

donde $\bar{\mathbf{x}}$ representa el vector de desplazamientos nodales, \mathbf{M} la matriz de masa nodal (diagonal), \mathbf{C} es una matriz de amortiguamiento, también considerada diagonal, y $\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{t}) - \bar{\mathbf{P}}(\mathbf{t})$ representa la diferencia entre el vector de fuerzas internas $\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{t})$ y el vector de fuerzas externas $\bar{\mathbf{P}}(\mathbf{t})$. Se considera que estas fuerzas actúan sobre los nudos del modelo.

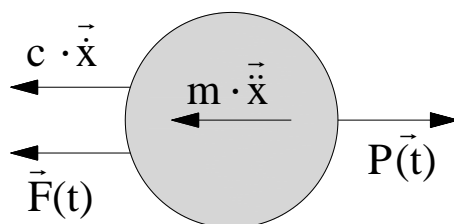


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre para un nudo.

Para cada nodo i del modelo se verifica que:

$$\vec{F}^i(t) = \sum_{b=1}^k \vec{F}^b \quad (4.13)$$

siendo k el número de barras que concurren al nudo i . La fuerza interna en cada barra, \vec{F}^b , es obtenida a partir de una ecuación constitutiva elemental, que se puede expresar como sigue:

$$\vec{F}^b = \lambda(\varepsilon_b, \dot{\varepsilon}_b) \quad (4.14)$$

siendo que ε_b y $\dot{\varepsilon}_b$ representan la deformación y la velocidad de deformación de la barra b y λ será una función que dependerá del tipo de material a modelar (relación constitutiva).

La ecuación de equilibrio 4.12 es integrada en el tiempo valiéndose de un esquema de integración explícita, utilizando el método de diferencias finitas centrales, de manera de obtener la coordenada actual del nudo en cada paso de integración.

En relación a la matriz de amortiguamiento C , se adoptó la hipótesis simplificativa de considerar el amortiguamiento proporcional a la masa M (Iturrioz, 1995).

$$C = M \cdot D_f \quad (4.15)$$

siendo D_f una constante vinculada al coeficiente de amortiguamiento crítico ξ_n .

$$D_f = \xi_n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \quad (4.16)$$

donde f_n es la frecuencia natural de vibración de modo n (Hz). De un modo general el modo n es adoptado como siendo igual al modo fundamental de vibración de la estructura (Iturrioz, 1995).

Relación constitutiva de la barra para modelar la rotura del material

Rocha (1989) propuso una ley constitutiva bilineal para los elementos que permite capturar el comportamiento de materiales hasta la ruptura, la misma se presenta en figura 15. Como menciona Rocha, esta ley fue propuesta originariamente por Hilleborg en 1978.

La relación constitutiva de cada barra tiene la siguiente forma:

$$\text{Fuerza} = \text{función (deformación de la barra)} \quad (4.17)$$

El comportamiento a compresión de la barra es lineal elástico, la ruptura del modelo global cuando está comprimido, deberá ocurrir por tracción indirecta (efecto de Poisson).

En la figura 15, P_{cr} representa la fuerza máxima de tracción transmitida por la barra, ϵ_p es la deformación asociada a P_{cr} , E_A es la rigidez de las barras del modelo reticulado y kr es la ductilidad, parámetro que permite calcular la deformación para la cual la barra no transmite más esfuerzos de tracción, ϵ_r .

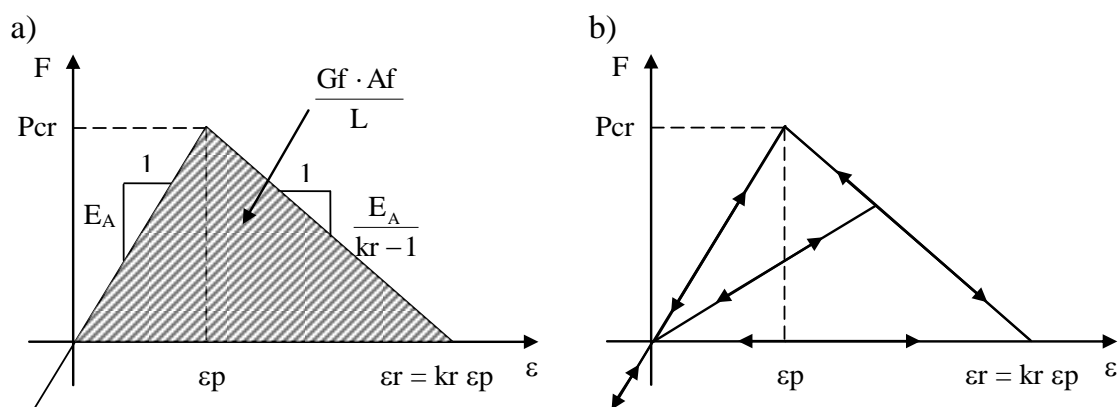


Figura 15. Relación Constitutiva Elemental de las barras del reticulado – a) Diagrama constitutivo adoptado con sus parámetros de control; b) Esquema para la carga y descarga (Rocha, 1989).

La deformación límite ϵ_r es elegida para satisfacer la condición de que cuando un elemento falla y la fisura se abre, se disipa una cierta cantidad de energía. Esta energía es igual al producto del área de la superficie fracturada, A_f , la cual está relacionada con L_c , por el valor de la tasa de energía superficial G_f , que es una propiedad del material.

Las propiedades del material pueden ser modeladas como campos aleatorios, lo que implica que las mismas pueden variar de elemento a elemento siguiendo una ley estadística establecida.

Es importante destacar que P_{cr} , ϵ_p , ϵ_r y G_f son propiedades exclusivas del material, A_f y L_c son propiedades exclusivas del modelo, los parámetros E_A y kr dependen tanto del modelo como del material.

La deformación de crítica de falla ϵ_p se define como la máxima deformación antes del inicio del daño. ϵ_p es un micro-parámetro, es decir, un parámetro que gobierna la ley constitutiva al nivel de la barra.

El módulo de elasticidad E , el factor intensidad de tensiones K_c y la deformación crítica ϵ_p se relacionan con la expresión clásica de la mecánica de la fractura (Kanninen y Popelar, 1985) dada por:

$$K_c = \sigma_p Y \sqrt{\pi d} = E \varepsilon_p Y \sqrt{\pi d} \quad (4.18)$$

en la cual, Y es un parámetro que tiene en cuenta la influencia de las condiciones de contorno y de la orientación de la fisura crítica de tamaño d.

En el caso del comportamiento al inicio de la ruptura ese asume como lineal, entonces $\sigma_p = E \varepsilon_p$ y, recordando la equivalencia entre K_c y la energía específica de fractura G_f , se obtiene la siguiente expresión:

$$\sqrt{G_f E} = E \varepsilon_p Y \sqrt{\pi d} \quad (4.19)$$

Con la finalidad de simplificar la ecuación 4.19, una longitud característica del material d_{eq} es definida como:

$$d_{eq} = Y \sqrt{\pi d} \quad (4.20)$$

Substituyendo la ecuación 4.19 en la 4.20, se obtiene:

$$d_{eq} = \frac{G_f}{\varepsilon_p^2 E} \quad (4.21)$$

La ecuación 4.21 indica que d_{eq} puede ser considerada como una propiedad del material ya que no depende del nivel de discretización, representando de hecho una longitud característica del material (semejante al ancho crítico de la región plastificada en la punta de la fisura en el modelo de Dugdale).

Aislando la deformación de falla crítica en la ecuación 4.21, se puede obtener:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{G_f}{d_{eq} E}} \quad (4.22)$$

El número de fragilidad, propuesto por Carpinteri (1981) como una medida del grado de ductilidad de la estructura puede ser reescrito utilizando las ecuaciones 4.18, 4.19 y 4.22 en el contexto de la formulación del MED formado por barras, como es presentado en la ecuación siguiente:

$$s = \sqrt{\frac{d_{eq}}{R}} \quad (4.23)$$

Se debe notar que s no solo considera las propiedades del material (K_c y σ_p), sino también el tamaño de la estructura, representando por la longitud característica R. Como se muestra en la ecuación 4.23, el número de fragilidad puede ser definido como la raíz cuadrada de la relación entre la longitud característica del material y la longitud característica de la estructura (R). Está claro entonces, que el comportamiento de la estructura será frágil si $s \rightarrow 0$ o sea $d_{eq} < R$, o dúctil si $d_{eq} > R$.

Cabe señalar que, la definición de d_{eq} está incorporada la geometría y las condiciones de contorno de la fisura.

Para comprender el significado de la longitud característica d_{eq} , se puede considerar que, si durante el proceso de daño de una estructura formada por un material caracterizado por un determinado valor de d_{eq} forma un defecto de dimensión a_{eq} ($a_{eq} = Y(\pi a)^{1/2}$) mayor o igual al valor de d_{eq} , esto implicaría que el defecto se propagaría cuando la tensión de tracción sobre la fisura es $\sigma_p = E \cdot \epsilon_p$ de forma inestable. Sin embargo, para que eso acontezca, la dimensión característica de la estructura R debería ser mayor que el tamaño del defecto, o sea $R > a_{eq}$, esto es, $R > d_{eq}$; de esta forma, la propagación de forma inestable de la fisura tendrá espacio físico por recorrer.

Observaciones sobre la implementación del criterio de rotura utilizado:

- Es importante precisar que ϵ_p , E , P_{cr} , d_{eq} y G_f son considerados propiedades exclusivas del material, mientras que A_f y L_c son propiedades exclusivas del modelo. k_r y E_A dependen tanto del material como del modelo.
- Se puede demostrar que el criterio constitutivo utilizado es objetivo frente a la discretización del modelo.
- Una condicionante del modelo en la definición de L_c es la siguiente:

Cuando un elemento rompe, toda la energía de deformación acumulada en él, es consumida en el proceso de fractura. Esto no es lo que sucede en realidad, pues parte de la energía de deformación se preserva con la forma de energía cinética (vibraciones inducidas) y energía elástica, en las dos partes en las que el elemento se divide. Como no es posible tener en cuenta esta subdivisión para un elemento aislado (porque las masas están concentradas en los nudos, y no a lo largo de su longitud), esto resulta una restricción en términos de un valor máximo para la longitud de L_c .

Integración por diferencias finitas

La integración explícita presenta la gran ventaja de realizar un balance energético durante todo el proceso, constituyendo una información de gran utilidad para comprender los fenómenos estudiados. Esta evaluación de la respuesta en el tiempo permite no perder de vista el problema físico que a veces se pierde en las dificultades de índole numéricas.

Otra ventaja es que la integración explícita no requiere del montaje y armado de la matriz de rigidez. Esto es especialmente conveniente para el análisis dinámico no lineal, en donde en cada paso de integración en el tiempo la matriz de rigidez debe ser modificada. (Riera, 1980). Esto también facilita el estudio de estructuras que no estén totalmente vinculadas, como por ejemplo, seguir la trayectoria de los fragmentos en que se rompe una estructura.

Debido a la utilización de un método de integración explícita en la integración de las ecuaciones de movimiento, el intervalo de tiempo Δt se ve restringido, por condiciones de estabilidad numérica, a un valor crítico $\Delta t_{\text{crítico}}$.

El método de las diferencias finitas centrales presenta el menor intervalo crítico en comparación con los otros métodos explícitos; para este modelo se ha adoptado un $\Delta t_{\text{crítico}}$ en función de la longitud de las barras (L_c) y de la velocidad de propagación de la onda de compresión V_p , según:

$$\Delta t_{\text{crítico}} \leq 0,6 \cdot \frac{L_c}{V_p} \quad (4.24)$$

$$\text{con } V_p = \sqrt{E/\rho}.$$

El proceso de integración básicamente consiste en:

- Dada una configuración deformada en el instante j
- Se obtienen las fuerzas internas, en esta configuración, en el instante j .
- Conocidas las otras fuerzas actuantes en el instante j
- Se determina la configuración deformada en el instante $j+1$.

Se pueden encontrar detalles de la implementación de diferencias finitas en libros de métodos numéricos (Burden y Faires, 1996; Bathe, 1996).

Distribución aleatoria de los parámetros del material

Iturrioz et al. (2009, 2011) y Miguel et al. (2010) modelaron la aleatoriedad del material considerando G_f como un campo aleatorio con una función densidad de Weibull del tipo III, caracterizado por un promedio de $\mu(G_f)$ y un coeficiente de variación $CV(G_f)$. La función de probabilidad acumulada es dada por:

$$F(G_f) = 1 - e^{-\left(\frac{G_f}{\beta}\right)^\gamma} \quad (4.25)$$

donde β y γ son parámetros de escala (tamaño) y forma, respectivamente. El valor medio $\mu(G_f)$ y la desviación estándar $CV(G_f)$ son dados por:

$$\mu(G_f) = \beta[\Gamma(1 + 1/\gamma)] \quad (4.26)$$

$$CV(G_f) = \beta[\Gamma(1 + 2/\gamma) - \Gamma^2(1 + 2/\gamma)]^{1/2} \quad (4.27)$$

donde Γ es la función Gamma dada por $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$.

Para generar los valores pseudoaleatorios de G_f , se utiliza la siguiente expresión:

$$G_f = \beta[-\ln(1-u)]^{1/\gamma} \quad (4.28)$$

donde u es un número aleatorio con distribución uniforme de probabilidad en el intervalo $[0;1]$.

También es necesario considerar la función de correlación espacial (L_{corr}) de la función aleatoria de G_f (Iturrioz et al., 2014b). En la presente versión del MED, la función de correlación se considera constante, lo que significa que el intervalo de longitud de la correlación $L_{\text{corr}} = 2 \cdot L_c$. La información sobre este tema se puede encontrar en Iturrioz et al. (2009), Miguel et al. (2010) y Kostaski (2012).

Metodología utilizada para obtener el tensor de tensiones

A continuación se explica cómo fueron calculadas las componentes del tensor de tensiones y de deformaciones para cada módulo básico.

Los resultados fueron adecuados para poder ser visualizados en el programa de elementos finitos ANSYS (Batista y otros 2003).

Toda la descripción realizada a continuación está basada en un módulo cúbico orientado siguiendo las coordenadas globales presentadas en la figura 16 (Batista et al., 2003, y Batista, 2007).

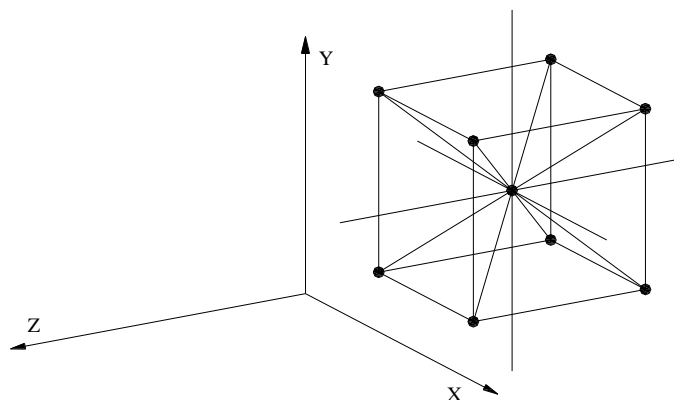


Figura 16. Módulo cúbico utilizado como referencia para la explicación de la obtención del tensor de tensiones, orientado con el sistema de coordenadas global.

Tensiones normales

La tensión normal en cualquiera de las direcciones ortogonales al módulo está determinada por una fuerza equivalente dividida por el área de la sección transversal del módulo. Esta fuerza equivalente está compuesta por:

- El promedio de las fuerzas correspondientes a las barras de las aristas en la dirección analizada.
- El promedio de los valores correspondientes a suma de las fuerzas en las barras diagonales de uno y otro lado proyectadas según la dirección analizada.

c) El promedio de las fuerzas en las barras centrales en la dirección analizada.

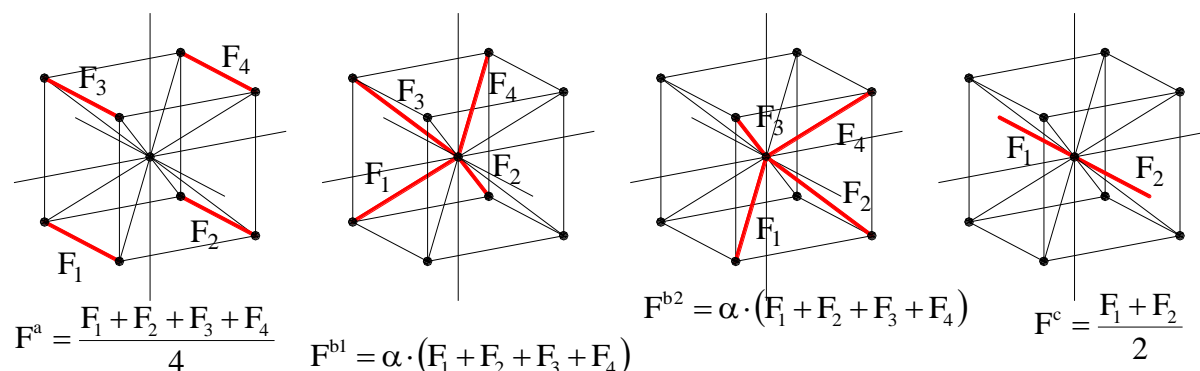


Figura 17. Componentes de la fuerza equivalente para el cálculo de la tensión normal.

En la figura aparece el valor α que es la tangente del ángulo formado por las barras y la dirección ortogonal analizada. Este valor es de 0.577.

La fuerza equivalente se obtiene como la suma de las fuerzas descritas en la figura 17.

$$F_{\text{normal equivalente}} = F^a + F^b + F^c \tag{4.29}$$

Tensiones tangenciales

Las tensiones tangenciales solamente incluyen las barras diagonales, y son determinadas también por una fuerza equivalente dividida por el área de la sección transversal del módulo. A continuación se describe a modo de ejemplo como se obtiene la fuerza equivalente en la dirección “x” global en un plano perpendicular a la dirección “y” (F_{xy}).

Esta fuerza equivalente está formada por:

- a) El promedio de la diferencia entre la fuerza de la barra superior y la inferior de un lado.
- b) El promedio de la diferencia entre la fuerza de la barra superior e inferior del otro lado.

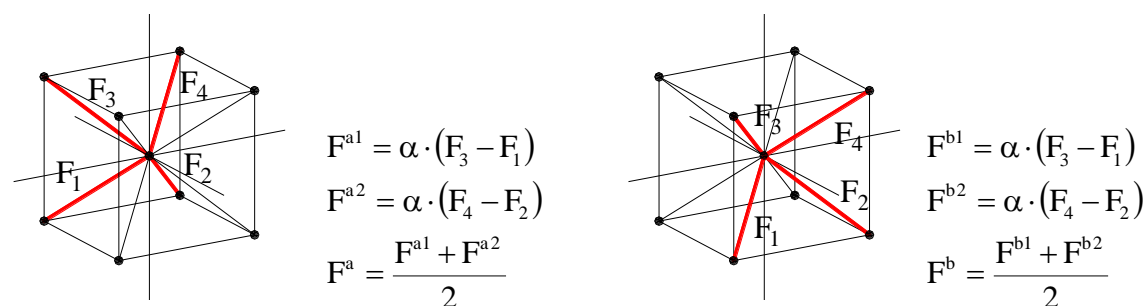


Figura 18. Componentes de la fuerza equivalente para el cálculo de la tensión tangencial.

De la misma forma que en la figura 18, el valor α es la tangente del ángulo de las barras diagonales y la dirección ortogonal analizada.

Realizando la sumatoria de las fuerzas se obtiene que F_{xy} está dado por:

$$F_{xy} = \frac{F^a + F^b}{2} \quad (4.30)$$

De la misma manera que se analizó la fuerza equivalente F_{xy} , siguiendo el mismo procedimiento se pueden calcular F_{yz} y F_{xz} (Batista et al., 2003).

Batista et al. (2003) realizaron la comprobación del correcto funcionamiento de la forma de calcular el tensor de tensiones verificando los resultados obtenidos con el MED de problemas cuya solución era conocida.

Problemas verificados con el MED

En forma de resumen se presentan a continuación los distintos tipos de problemas que fueron analizados con el MED con la formulación presentada anteriormente y para los cuales demostró ser apto.

- Problemas con no linealidad geométrica. (Hayashi, 1982)
- Problemas con no linealidad física y geométrica. (Hayashi, 1982)
- Impacto sobre una placa elástica. (Hayashi, 1982)
- Aplicaciones en problemas básicos de la MELF. (Rocha, 1989)
- Simulación de materiales no homogéneos con propiedades aleatorias. (Rocha, 1989)
- Aplicaciones al Hormigón. Corroboración de la teoría de banda de fisuración de BAZANT. (Rocha, 1989)
- Aplicación del DEM a estructuras elastoplásticas. (Iturrioz, 1995)
- Análisis de estructuras de Hormigón Armado sometido a cargas de impacto e impulsivas. (Iturrioz, 1995).

Con los ejemplos presentados en este apartado se demuestra que el MED también es apto para:

- Medir el factor de intensidad de tensiones estático para modos de falla simples o mixtos, en 2 y 3 dimensiones. Aplicando la tasa de energía liberada y el COD.
- Medir el factor de intensidad de tensiones dinámico para modos de falla simples o mixtos, en 2 y 3 dimensiones, aplicando el COD.
- Calcular la velocidad y camino de propagación de una fisura.
- Captar la propagación de ondas de tensión y la influencia de los bordes o contornos libres en esta distribución de tensiones.
- Reproducir configuraciones de rotura complejas (como las de impacto del disco) y los mecanismos de fractura producidos.

La técnica de las emisiones acústicas aplicada en resultados del MED

El análisis de EA se realiza a partir del post-procesamiento de los resultados obtenidos de simulaciones numéricas utilizando el MED.

Las señales de los eventos de EA se obtienen de las aceleraciones nodales de determinados nodos definidos aquí como sensores, estos nodos se definen como el central del módulo básico de control; es decir, un sensor de EA ubicado en la cara del plano xz de un sólido será representado en el modelo discreto por el registro de la aceleración del nudo central de un módulo cúbico localizado en la misma cara y en la misma posición que el sensor de EA en el modelo sólido y con la misma dirección del sensor (dirección y en la fig. 19).

Es importante notar que, en general, un sensor real de EA tiene como salida una señal de tensión eléctrica [V], ya en el MED la señal es obtenida por un valor de aceleración [m/s^2].

La utilización de la aceleración nodal como signo de EA ya fue utilizada en trabajos de Iturrioz et al. (2013, 2014a)

Con los resultados obtenidos de la simulación numérica con el MED, se utilizan las definiciones y los parámetros definidos en el capítulo 2; sin embargo, algunas unidades físicas difieren en cuanto a las presentadas anteriormente, pero estas diferencias no modifican la forma del análisis y de evaluación del resultado.

Como ejemplo se puede citar el caso del valor RA, en el cual en análisis experimentales se obtiene en [s/V] y por el análisis de las simulaciones se obtiene en [$s / m/s^2$].

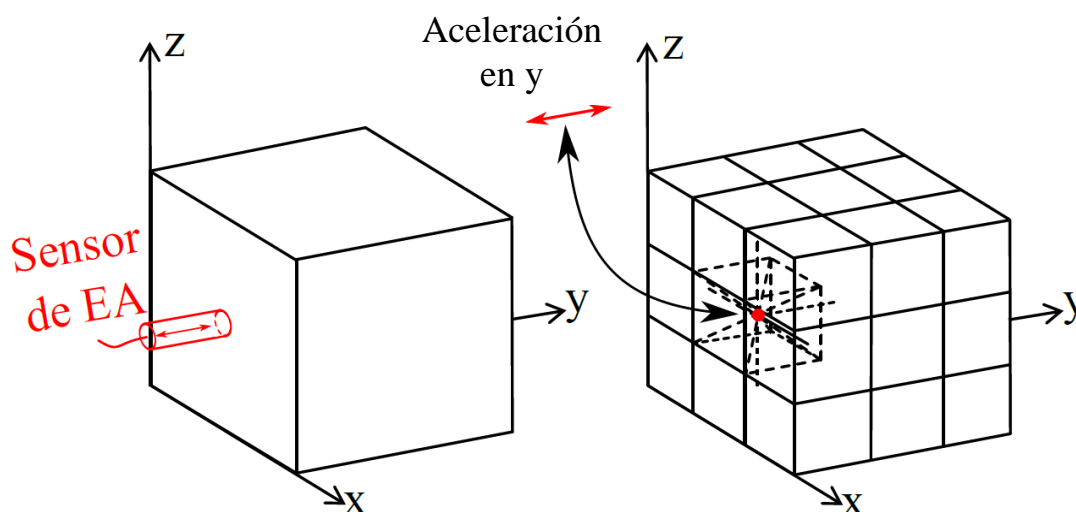


Figura 19. Representación del sensor en un sólido para el modelo del MED (Birck, 2016).

Como se asume que los sensores han sido debidamente calibrados de forma que una desviación positiva de la señal indique un movimiento en el sentido de alejarse de la fuente,

entonces, el signo de EA obtenido por el MED es corregido en cuanto a la señal para aquellos sensores localizados en el sentido negativo de los ejes cartesianos.

Los sensores se orientan de forma que el regulador de dirección del sensor (t) sea normal a la superficie en que se encuentren.

En el análisis de la señal de EA, obtenido por las simulaciones en el MED, no se aplica ningún filtro.

Capítulo 5

Problema en estudio

En este capítulo se detalla el modelo físico propuesto para el análisis de las emisiones acústicas del presente trabajo.

Modelo físico

Se realiza el estudio de las EA de un material compuesto de matriz cementicia reforzado por fibras cortas de acero. La matriz se encuentra fisurada en su tramo medio obteniendo dos mitades y las fibras cumplen el objetivo de unir ambas partes de la matriz.

Se aplican desplazamientos prescritos en dirección normal a la fisura mencionada, tanto en el borde superior como en el borde inferior de la placa.

El porcentaje volumétrico de fibras en el compuesto será de ($V_f=0,8\%$) y el módulo de elasticidad de la matriz cementicia (E_m) y de la fibra de acero (E_f) son bien conocidos.

Para el análisis que se propone, la fibra se encuentra centrada respecto al plano de la fisura considerando tres ángulos de inclinación de la fibra; éstos son 30° , 60° y 90° .

La placa simulada tiene dimensiones 25mm x 25mm de lados, con una fibra de 10mm de largo y 0,5mm de diámetro, según:

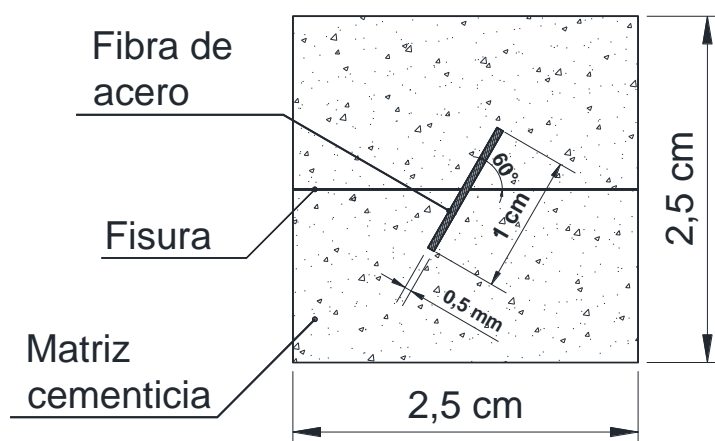


Figura 20. Modelo físico de problema en estudio del caso con fibra a 60° .

Cada orientación de fibra considerada se simula numéricamente de forma aislada dentro de la placa cementicia fisurada; se colocan sensores a cada lado de la fisura (figura 21) los que detectan las ondas de EA en cada bloque de la placa fisurada.

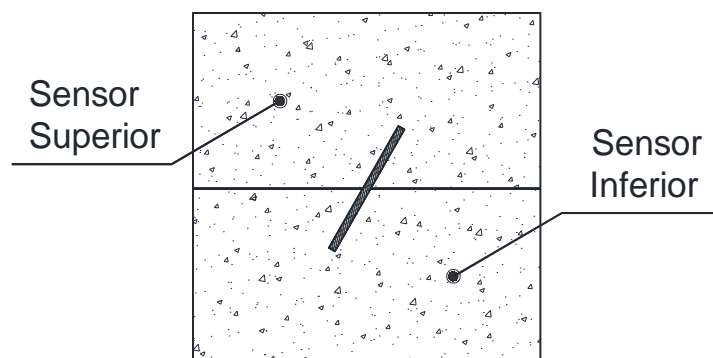


Figura 21. Ubicaciones de los sensores dentro del modelo físico.

Como se mencionó, los desplazamientos prescritos aplicados en los bordes inferior y superior de la placa se aplican a una velocidad suficientemente baja, de modo que no se logre inducir efectos dinámicos durante el proceso de carga del modelo propuesto.

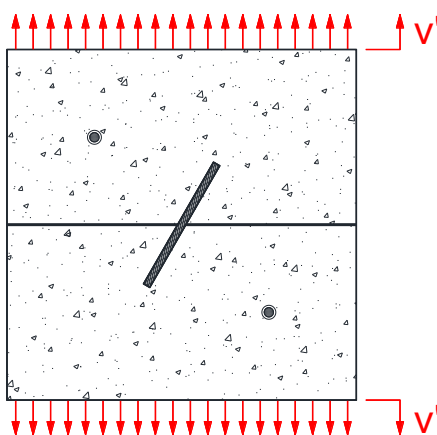


Figura 22. Dirección y aplicación de los desplazamientos al modelo físico.

Capítulo 6

Metodología empleada en el modelo numérico

En el presente capítulo se describe la metodología implementada en el MED para representar el modelo físico descrito en el capítulo anterior, en ella se explican la configuración geométrica y condiciones de bordes empleadas en la fisura y el compuesto estudiado, también se detalla la discretización empleada para el arreglo cúbico de barras utilizado.

Configuración geométrica y condiciones de borde

Las condiciones de borde de la fisura y los elementos dentro del compuesto se representan en la figura 23; en ella se puede observar el empleo de un material denominado interfaz que permite modelar una aproximación de la adherencia generada entre la fibra y matriz.

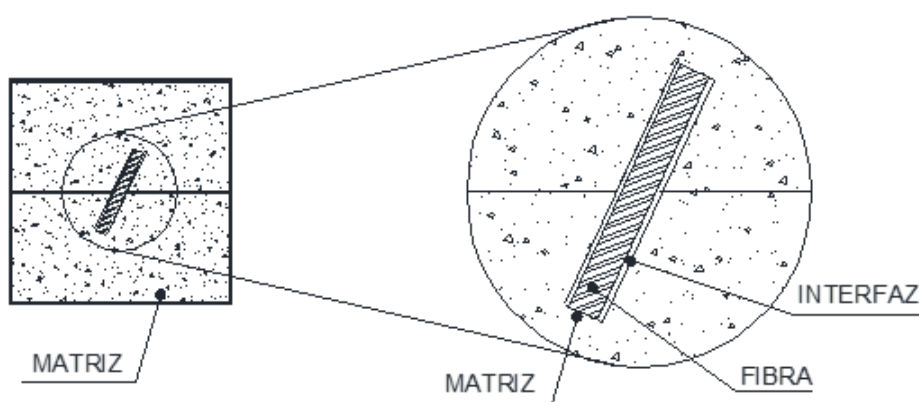


Figura 23. Material compuesto con una macro fisura reforzado con fibras cortas y configuración geométrica del conjunto fibra matriz estudiada.

En este trabajo se considera la placa bajo estado plano de deformaciones, lo que implica que no haya desplazamientos en la dirección perpendicular al plano en el que se desarrolla el modelo de la figura.

Los desplazamientos horizontales en el plano de la figura no son restringidos en este análisis.

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 puede encontrar más información del procedimiento sobre cómo generar estas fisuras, se aclara que solo se modeló la fisura en la matriz hasta el contorno de la interfaz.

En la Tabla 1 se indican los parámetros y propiedades mecánicas empleadas para cada uno de los materiales utilizados en las simulaciones realizadas dentro del presente trabajo, la calibración y adopción de dichos valores fueron verificadas en los trabajos de Uberti y otros (2016.b).

Tabla 1. Parámetros y propiedades mecánicas utilizados en el modelo del MED.

Coefficiente de amortiguamiento	50000
Coefficiente de Poisson [ν]	0.25
Masa específica de Matriz [ρ_m]	2000 kg/m ³
Módulo de Young de Matriz [E_m]	30 GPa
Deformación Crítica de Matriz, ϵ_{pm}	2,18 x 10 ⁻⁴
Energía específica de fractura de Matriz [G_{fm}]	100 N/m
Masa específica de Fibra [ρ_f]	7800 kg/m ³
Módulo de Young de Fibra [E_f]	200 GPa
Deformación Crítica de Fibra, ϵ_{pf}	2,10 x 10 ⁻³
Energía específica de fractura de Fibra [G_{ff}]	21780 N/m
Masa específica de Interface [ρ_i]	5200 kg/m ³
Módulo de Young de Interface [E_i]	0.11 GPa
Deformación Crítica de Interface, ϵ_{pi}	2,00 x 10 ⁻²
Energía específica de fractura de Interface [G_{fi}]	80000 N/m

Parámetros aleatorios implementados

Cabe aclarar que los valores de energía de fractura introducidos para la matriz, la fibra y la interface fueron considerados como un campo aleatorio, con un valor medio $\mu(G_f) = G_f$, valor indicado en la tabla 1 para los tres tipos de materiales estudiados, con un coeficiente de variabilidad $CV(G_f) = 50\%$ y una densidad de probabilidades de Weibull (Ecuación 4.25).

Introducir el G_f como un campo aleatorio implica que la ley bilineal constitutiva presentada en la figura 15 varía de elemento a elemento cambiando su valor de deformación crítica (ϵ_p).

Mayores detalles sobre las características aleatorias de los parámetros de entrada son discutidos en Kostaski et al (2011).

Discretización empleada en el modelo

En el MED formado por barras se construyó el modelo de la figura 23 empleando el módulo cúbico presentado en la figura 12, el mismo consideró que la longitud de las barras normales del módulo es $L_c=0,25$ mm.

En la figura 24 se muestra el modelo numérico completo para el caso de la fibra a 90° . En el mismo se utilizaron cien módulos en la dirección horizontal y vertical; el espesor de la placa es de un módulo cúbico, siendo solo este necesario para el estado plano considerado. Para representar el compuesto estudiado se utilizaron dos y cuarenta módulos para representar el espesor y longitud de la fibra respectivamente. El espesor de la interfaz se modeló con un módulo cúbico.

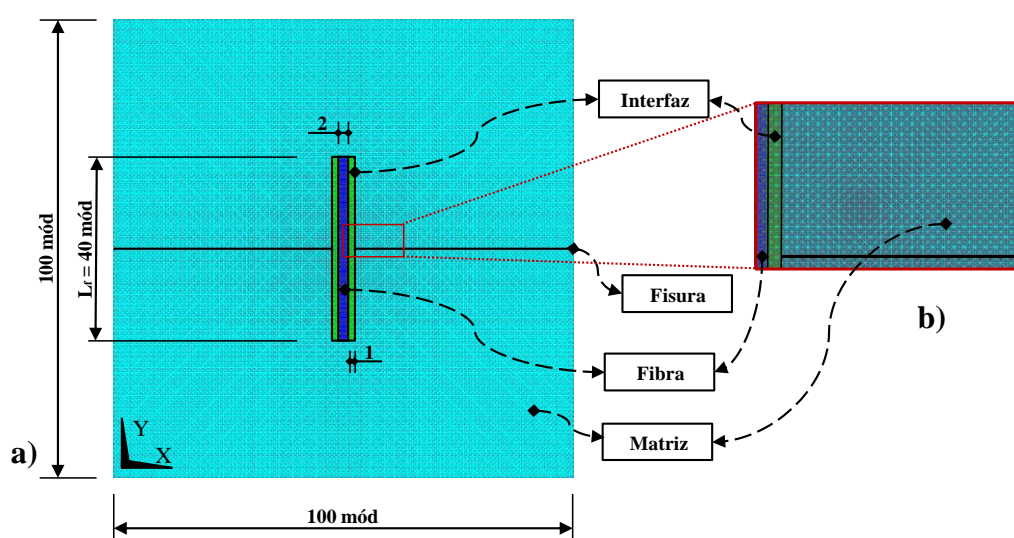


Figura 24. Discretización empleada de la fibra, interfaz y matriz fisurada en el modelo de MED; a) módulos utilizados; b) detalle de barras.

Se puede observar en la figura 24, que las barras de color azul representan la fibra de acero dentro del compuesto; las barras de color verde, la interfaz; y las de color cian, la matriz cementicia; un mayor detalle se puede observar en la fig. 24 b).

Los desplazamientos prescritos se aplican en los nudos centrales de cada módulo cúbico ubicado en los extremos superior e inferior del bloque.

La velocidad de aplicación de los desplazamientos prescritos es de 0,03 m/s, siendo una velocidad baja que no solo permite inducir los efectos de inercia, si no también, no provoca valores muy elevados de ruido en los resultados de las EA, de modo de permitir una mejor caracterización de los tipos de ondas.

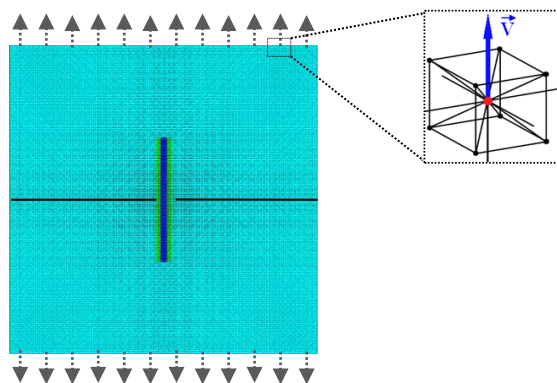


Figura 25. Esquema de aplicación de desplazamientos prescritos (v).

El intervalo de tiempo que se aplica para cada integración por diferencias finitas es de $7,0E-9$ seg., valor que cumple con la restricción dada en la ecuación 4.24 para cada uno de los materiales que componen el compuesto.

De este modo, la apertura de la fisura se determina como:

$$w = 2 \cdot v \cdot \Delta t_{\text{crítico}} \quad (5.1)$$

donde v es la velocidad de aplicación de los desplazamientos y $\Delta t_{\text{crítico}}$ es el intervalo de tiempo en el que se aplican.

El control de la condición cuasi-estática de la simulación es realizado a través del balance energético del modelo.

Capítulo 7

Resultados, conclusiones y recomendaciones

Resultados

Presentación de resultados de EA obtenidos de las simulaciones numéricas

En la figura 26 se presentan los resultados obtenidos de la simulación numérica del caso de la fibra ubicada a 90° respecto al plano de la fisura. En ella se observan curvas de *aceleraciones normalizadas vs el tiempo normalizado* del ensayo numérico con el MED.

Para cada caso de inclinación de la fibra, el tiempo máximo, respecto del cual se normaliza, se ha considerado como el tiempo en el que ocurre un salto en la energía cinética durante la simulación. Las EA se normalizaron respecto al valor de amplitud positiva de uno de los eventos que se presentan a lo largo de ensayo simulado.

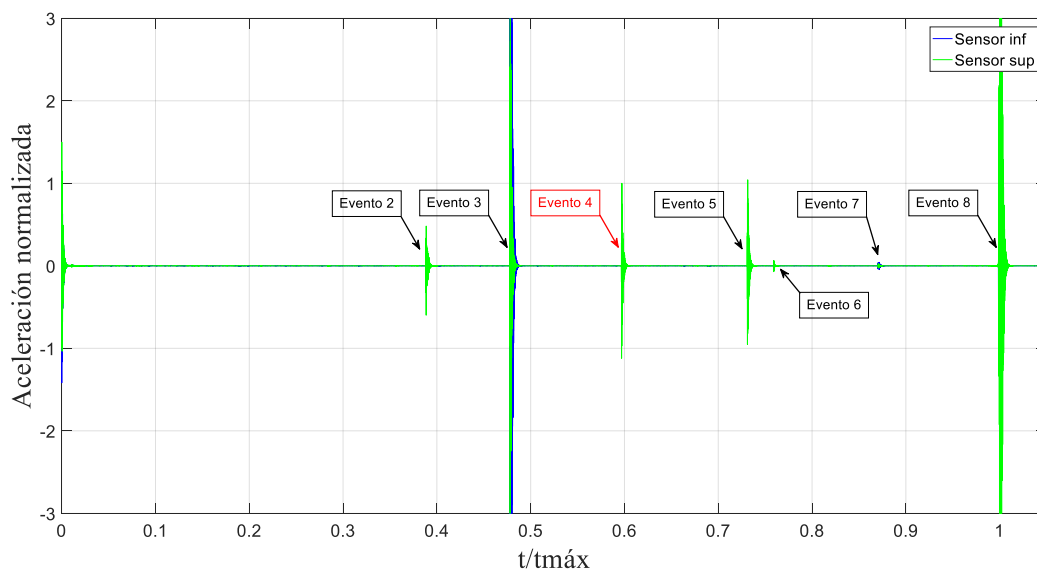


Figura 26. Señales de EA durante la simulación de $\theta = 90^\circ$. Aceleración vertical normalizada respecto al evento 4 vs tiempo de ensayo normalizado.

Curvas similares a la de la figura 26, se presentan en las figuras 27 y 28 del anexo y corresponden a los casos restantes de inclinación de fibra analizados (60° y 30°).

Análisis del valor b

En las figuras 29 a 31 se presentan gráficos que contienen la curva de la *fuerza de puente* (F) vs el *tiempo normalizado*, así como el *conteo instantáneo y acumulado* de los eventos detectados, para los tres casos de inclinación de fibra en estudio. Se observa también la división del tiempo del ensayo en tres intervalos, los que serán determinantes en el análisis del “valor b”.

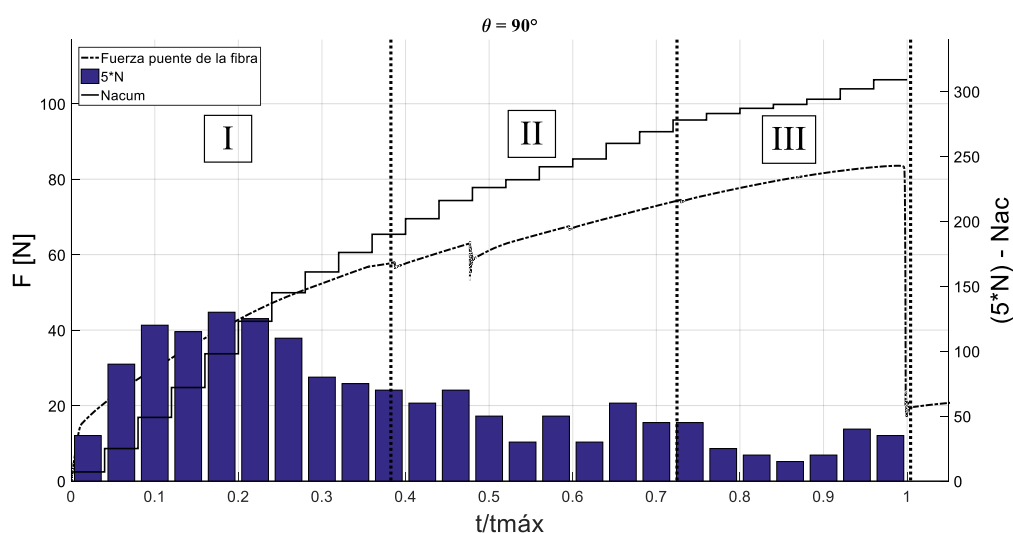


Figura 29. Curva de fuerza de puente, gráfico de barras de conteos de eventos instantáneos y gráficos en escaleras de conteos de eventos acumulados vs tiempo de ensayo normalizado para $\theta = 90^\circ$.

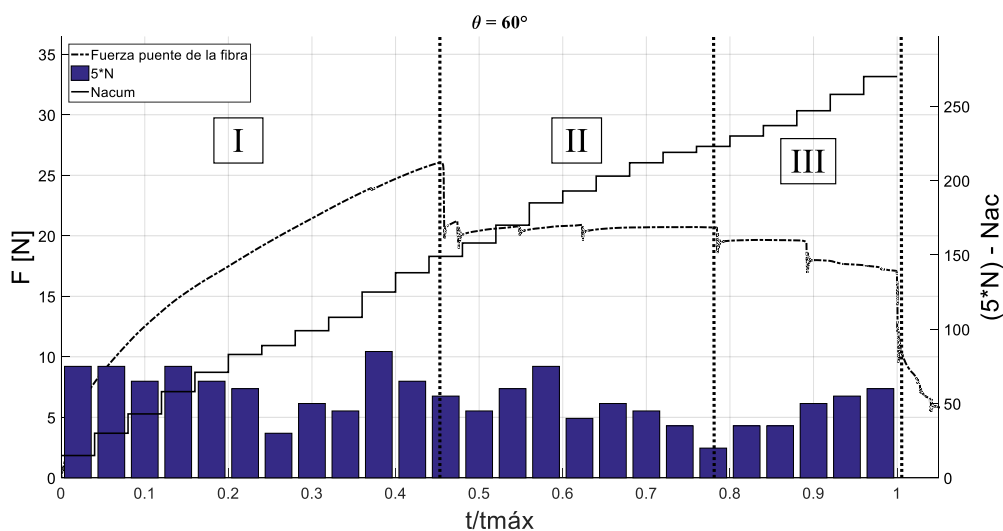


Figura 30. Curva de fuerza de puente, gráfico de barras de conteos de eventos instantáneos y gráficos en escaleras de conteos de eventos acumulados vs tiempo de ensayo normalizado para $\theta = 60^\circ$.

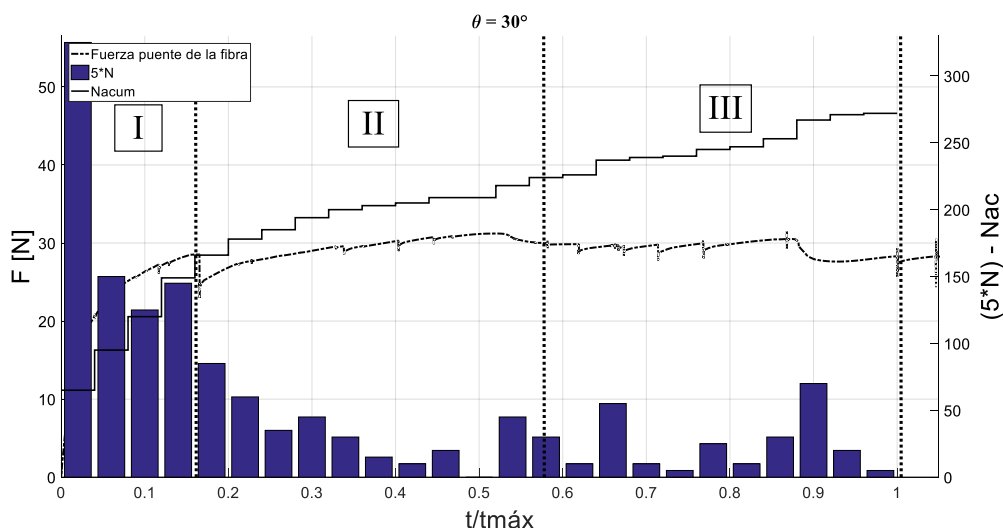


Figura 31. Curva de fuerza de puente, gráfico de barras de conteos de eventos instantáneos y gráficos en escaleras de conteos de eventos acumulados vs tiempo de ensayo normalizado para $\theta = 30^\circ$.

Los intervalos para cada caso de inclinación de la fibra fueron determinados del siguiente modo:

- el 1^{er} intervalo (I) es aquél tramo en el que no haya sucedido una caída de la fuerza puente;
- el 2^{do} intervalo (II) considera aquél tramo en el que la fuerza puente se mantuvo relativamente constante una vez sucedida la primera caída;
- el 3^{er} intervalo (III) es aquel que considera de tiempo restante hasta el fin de la simulación cuando ocurre un salto en la energía cinética.

Analizando los resultados de estas tres figuras se puede corroborar que cuando $\theta=90^\circ$ se obtuvo una fuerza puente mayor a la obtenida en los otros casos, el mismo resultado se puede observar en Uberti (2012).

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos del conteo de eventos y valor b para cada intervalo de tiempo. También, se indica el valor de la fuerza puente máxima para cada θ . Los valores señalados con * señalan aquellos valores de números de eventos que se consideran muy bajos respecto a las consideraciones de Shiotani et al. (2001) mencionados en el capítulo 2; los cuales a pesar de presentar una caída del valor b respecto al tiempo, no revelan la falla inminente del modelo, demostrando la importancia del número de eventos contados para este tipo de análisis.

Tabla 2. Resultados obtenidos de números de eventos y valor b por intervalo de tiempo e inclinación de la fibra; y también, la fuerza puente máxima por modelo.

θ	Intervalo de tiempo	N eventos Sensor Sup.	N eventos Sensor Inf.	Valor b Sensor Sup.	Valor b Sensor Inf.	Fuerza Puente Máx [N]
90°	I	95	91	1,535	1,207	83,6
	II	37	47	1,033	1,181	
	III	27	14*	0,933	0,777 *	
60°	I	90	54	1,585	1,615	26,1
	II	67	9*	1,067	0,682 *	
	III	39	12*	0,593	0,543 *	
30°	I	93	63	1,605	1,207	40,4
	II	29	36	0,519	0,586	
	III	35	18*	0,448	0,113 *	

Los detalles de los resultados del valor b se presentan en las figuras 32, 33 y 34 de los anexos, cada una de ellas contienen las fórmulas y gráficos logarítmicos de frecuencia-magnitud representativos de los valores b presentados en tabla 2.

La figura 35 muestra los daños y fracturas correspondientes a los tres intervalos tiempo simulados para cada inclinación de la fibra modelada. Como demuestran los resultados obtenidos en el análisis del valor b, los gráficos c), e), f), h) e i) presentan la aparición y propagación de fisuras notables en los modelos, motivos de la caída del valor b observados en la tabla 2.

Las líneas de color blanco en las figuras indican aquellas barras que fueron dañadas durante el intervalo de tiempo que se estudia y las naranjas son aquellas que llegaron a la rotura. Los círculos rojos se utilizaron para señalar las áreas donde se provocaron grandes conteo de eventos respecto al número captado por el bloque opuesto y las fallas de carácter crítico que prueban los bajos valores b en dicho bloque. Estas diferencias entre un bloque y el opuesto ocurren por las aleatoriedades impuestas a las energías específicas de cada barra de los materiales considerados.

En las figuras 35 d) y h) se puede observar claramente cómo tras ocurrir el efecto de *spalling*, señalado con círculos celestes, y la posterior aparición del efecto *snubbing*, el compuesto analizado es aún capaz de resistir esfuerzos de aproximadamente la misma magnitud (ver figuras 30 y 31). Cabe aclarar que todavía no se han incorporado metodologías para detectar con certeza mediante el modelo numérico la captación efectiva del fenómeno de *snubbing*.

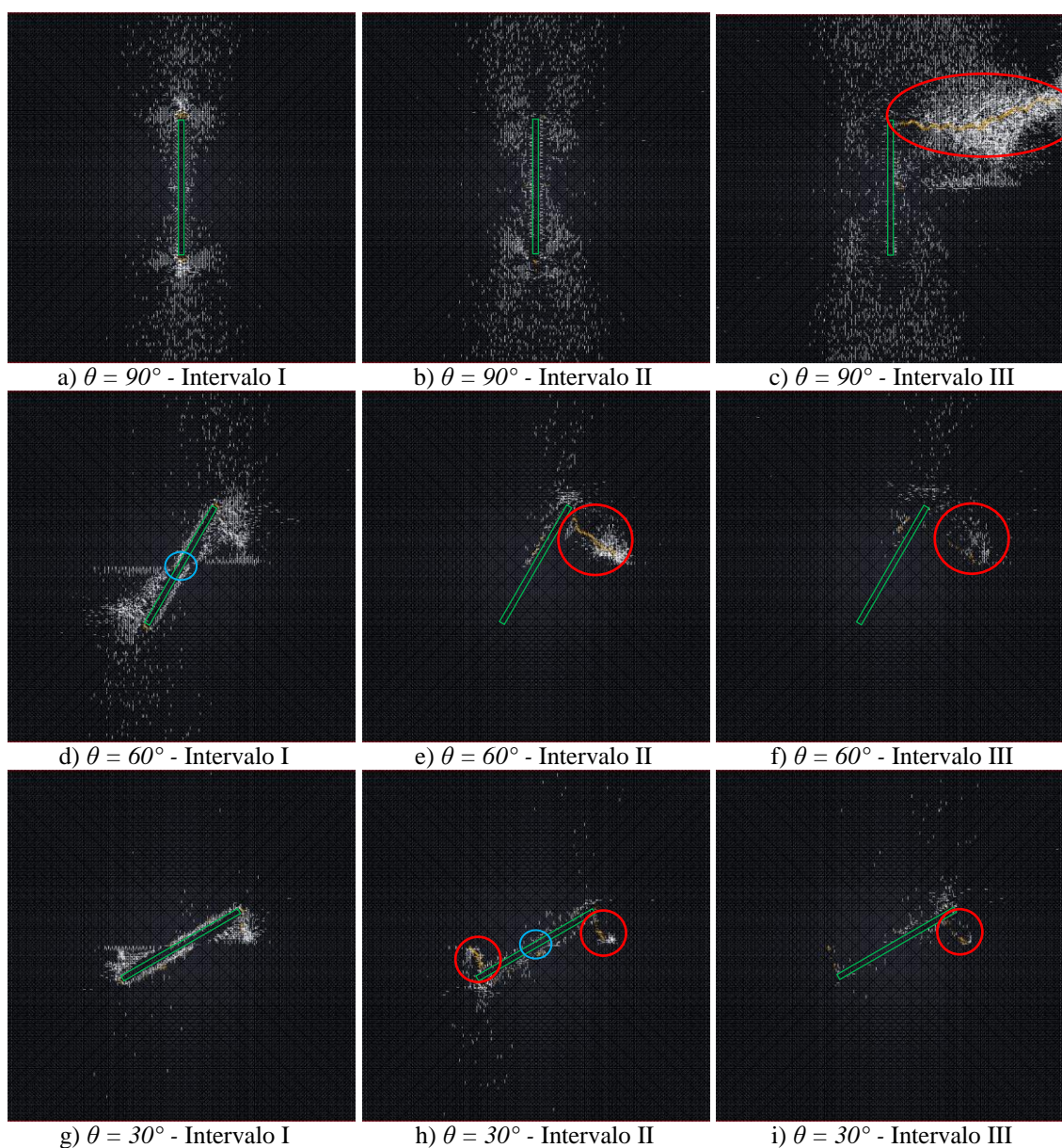


Figura 35. Evolución de daños por intervalos de tiempo e inclinación de la fibra.

Se puede analizar de cada imagen presentada en la figura que:

- En el **intervalo I** de cada inclinación de la fibra, se detectaron eventos que provocaron daños en un sector localizado de la placa, más específicamente en las cercanías de la fibra, esto es provocado por las elevadas presiones que ejerce la fibra sobre la matriz, previamente y durante el inicio el despegue de la fibra (*debonding*). Es por ello que el valor b ha sido el mayor, ya que solo se provocaron microfisuras o microdaños en la interfaz y matriz, dando como resultados valores b entre 1,7 y 1,2. Resultados similares se pueden observar en las investigaciones de Colombo et al. (2003).
- En el **intervalo II**, se detectaron daños que fueron con algunos eventos de mayor magnitud que en el período anterior. Para el caso de $\theta = 90^\circ$ caída del valor b , se produjo por una elevada cantidad de daños de mayor magnitud en amplios sectores de los bloques de prueba.

En el caso de $\theta = 60^\circ$, se generó la aparición y propagación de una fisura desde el extremo superior de la fibra y el borde inferior de la matriz, los cuales provocaron la caída en el valor de b . Sin embargo, se debe prestar atención en la gran disminución del valor b del bloque inferior, debida a que, como se mencionó al presentar la tabla 2, el bajo número de eventos que ocurrieron en dicho bloque provocaron un valor incorrecto del valor b para dicho sensor.

En el caso de $\theta = 30^\circ$, la gran disminución en el valor b de ambos bloques demuestra que sucedieron fisuras en ambos extremos de la fibra que se han propagado lentamente tras ocurrir nuevos eventos.

- En el **intervalo III**, ocurrieron eventos de mayores magnitudes acompañados de las propagaciones de las fisuras ya existentes hacia los bordes de los bloques, que dieron como resultado que el valor b fuera el menor en cada caso de θ . Esto provocó la generación de energía cinética en el modelo y la disminución de la fuerza puente.

Como se visualiza en la figura 35, cuando la fibra no forma un ángulo recto con el plano de la fisura, se generaron mayor cantidad de daños en las cuñas comprimidas por la fibra, producto de las elevadas tensiones que transmitió la fibra a la matriz en dichas cuñas.

También se puede realizar un análisis de la variación del valor b durante todo el tiempo de simulación. En la figura 36, se realizó la comparación con las variaciones de *las energías elástica y de daños* y valores dados por *la fuerza puente de la fibra vs apertura de la fisura* propuesta del modelo con $\theta = 30^\circ$.

El primer mínimo en la curva del valor b del sensor inferior señala la contigua ocurrencia de daños o fisuras que ocasionaron la caída de la fuerza puente, junto a un salto en la energía de daños y la consecuente caída de la energía elástica. Los siguientes valores indicados en las curvas de valor b se deben a cambios de pendiente o por ser un mínimo y señalan procesos del mismo tipo al descrito anteriormente.

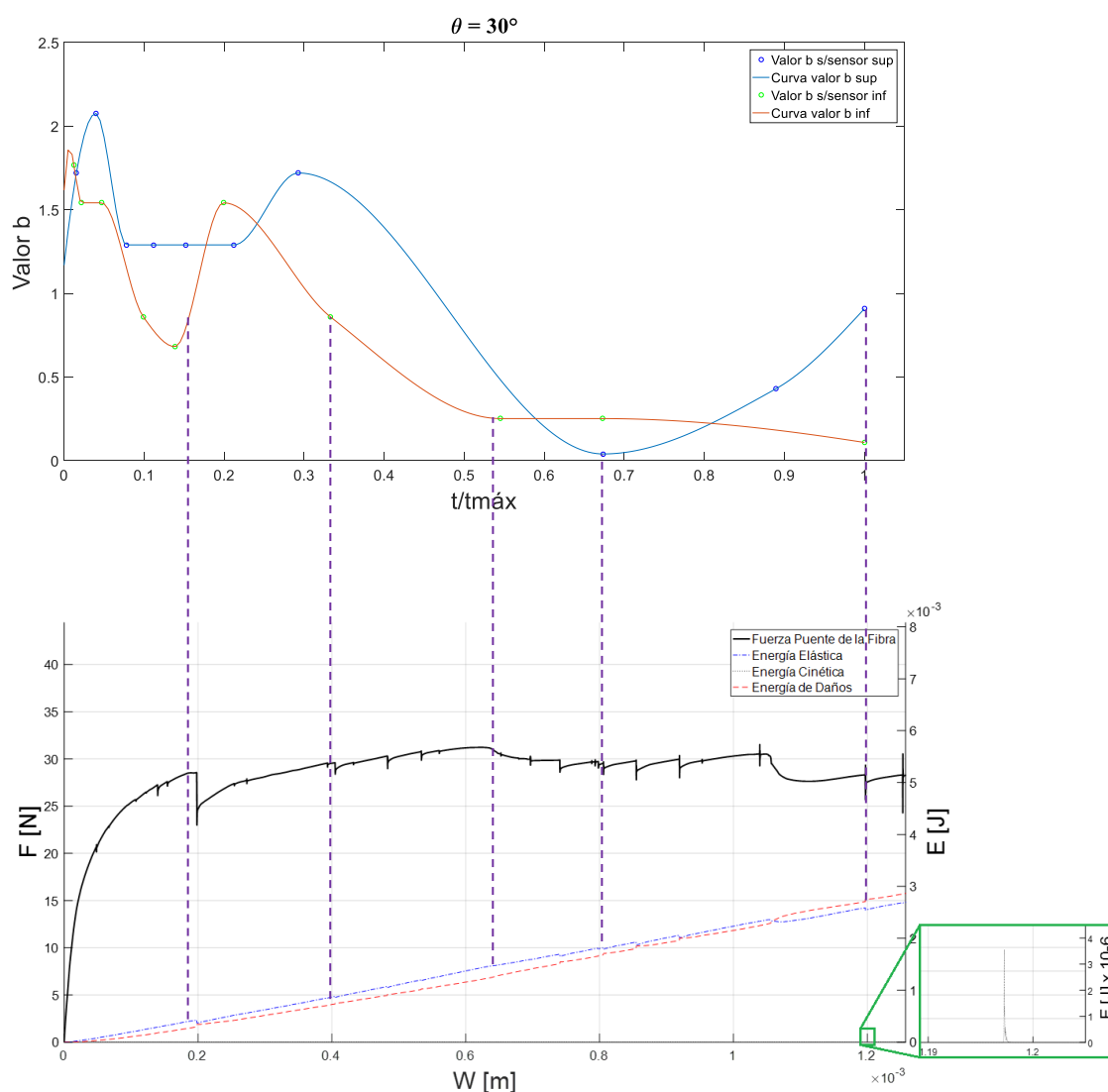


Figura 36. Variación del valor b durante el proceso de daño en el tiempo y gráficos de energías y fuerza puente vs apertura de la fisura para $\theta = 30^\circ$.

El mismo tipo de análisis y curvas fueron hechos con los valores de $\theta = 90^\circ$ y 60° , los resultados de los mismos se pueden encontrar en las figuras 37 y 38 del anexo.

Análisis de las señales de EA

Caracterización del origen de la señal según la forma de onda

Para poder caracterizar las señales de EA según el mecanismo de falla que las origine, solo se consideraron dos tipos posibles; estas se presentan en la figura 39.

Los eventos que no compartan la misma forma de la onda con las que se mencionan a continuación se deben a que son una combinación de los eventos caracterizados.

Para este tipo de análisis se propuso la utilización gráficos de EA con señales normalizadas. Las amplitudes de los eventos de EA se normalizaron respecto a un valor de las amplitudes de los eventos elegidos como representativos (ver la fig. 26, 27 y 28), en cambio el intervalo de tiempo utilizado para el análisis de cada evento es $\Delta t = 0,229376$ ms.

Por otro lado, como se cuenta con gráficos de curvas *Intensidad vs Frecuencia*, los mismos fueron obtenidos tras aplicar la Transformada de Fourier (FFT) a los gráficos a la señal de cada evento de EA. En dichos gráficos la variable *intensidad* también tuvo que ser normalizada, lo cual se hizo respecto al valor de *intensidad pico* propia del evento.

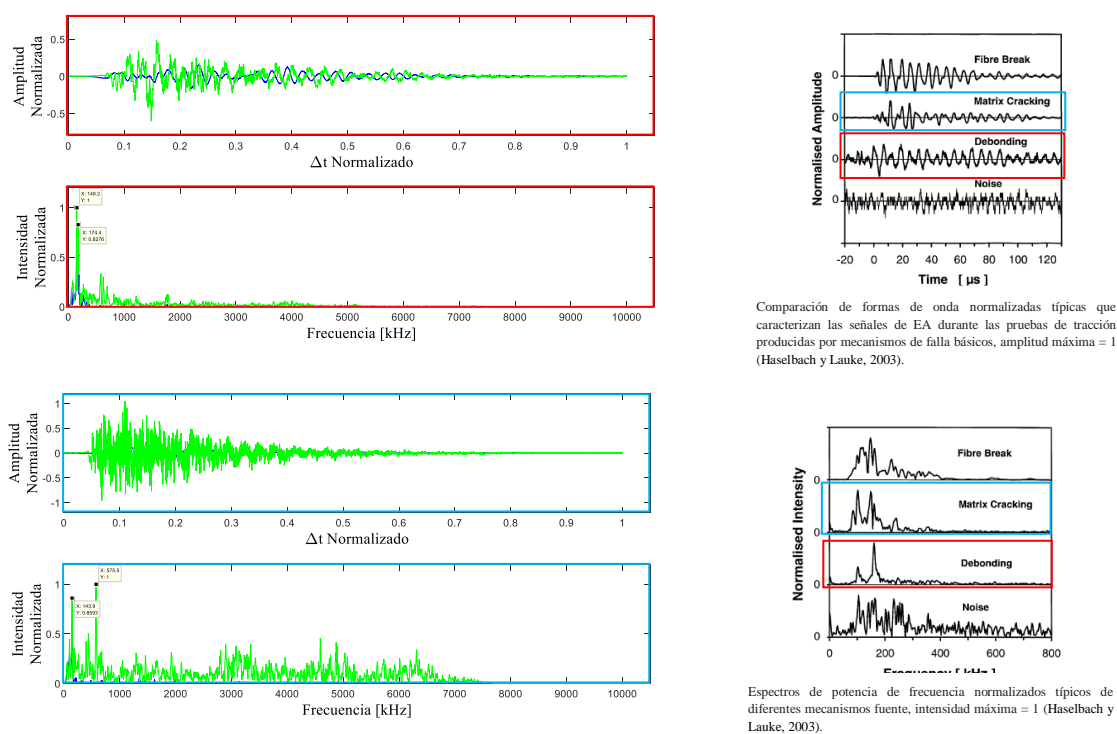


Figura 39. Señales de EA características en función del mecanismo de falla.

En la figura 39, solo se presentaron dos tipos de señales que derivan de mecanismos de fallas distintos. Por un lado, ocurre la fisuración de la matriz cementicia (*matrix cracking*) y; por el otro, acontecen daños tanto en la interfaz como en la matriz que se encuentra en los alrededores de la fibra, producto del despegue de la fibra (*debonding*).

Se debe mencionar que los daños ocurridos en el inicio de la captación de la señal, son los que determinan la forma de la onda y el gráfico de *intensidad vs frecuencia*.

En la figura 40 se muestran los daños que ocasionaron los eventos de la figura 39. En ellas se resaltó el contorno de la fibra con un rectángulo verde y con círculos fueron resaltados los daños que originaron las señales de EA, utilizando el rojo para denotar los daños ocurridos por despegue de la fibra y el celeste para aquellos ocasionados por fisuración o daños de la matriz.

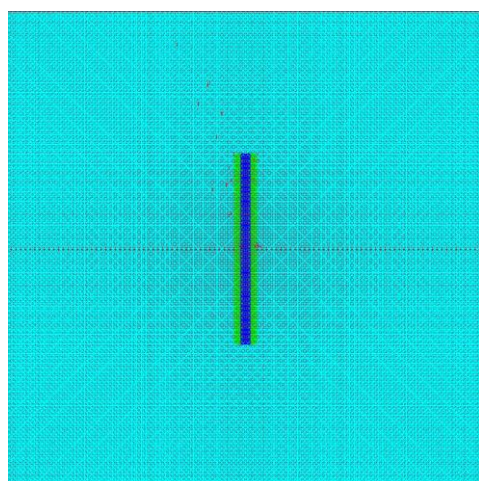
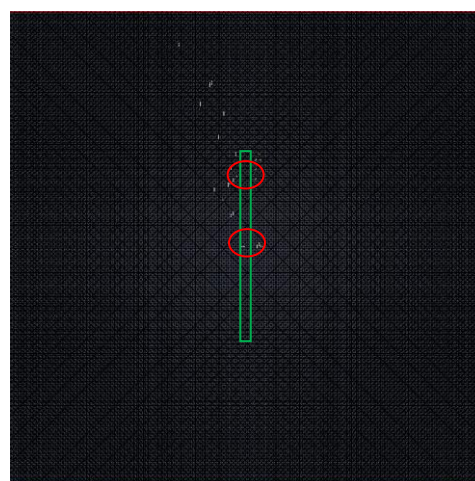
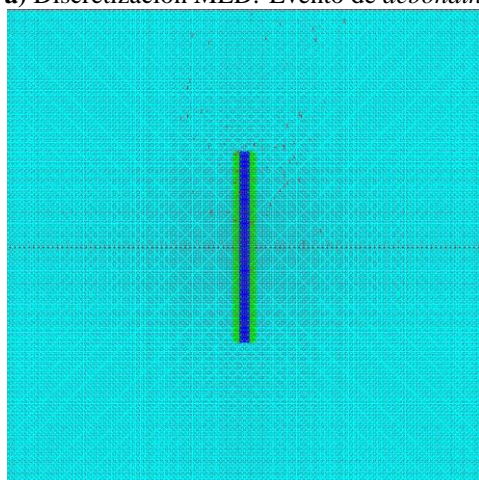
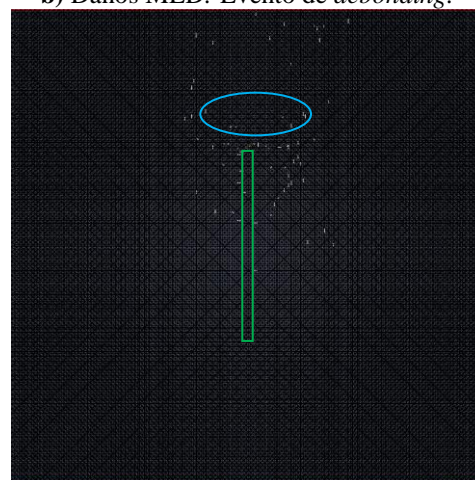
a) Discretización MED: Evento de *debonding*.b) Daños MED: Evento de *debonding*.c) Discretización MED: Evento de *matrix cracking*.d) Daños MED: Evento de *matrix cracking*.

Figura 40. Discretización del modelo y daños ocasionados por eventos de *debonding* y *matrix cracking* de la Figura 32.

Cuando la señal ocurre por el proceso de despegue de la fibra con la matriz, se podría decir que la onda tiene una amplitud pico y luego decae hasta un valor que mantiene constante por un período de tiempo. En el gráfico de *intensidad vs frecuencia* de la Figura 39 se puede observar que este tiene unos picos a valores menores que 1000 kHz y luego decae a valores despreciables.

En el caso de las señales debidas a procesos de daños o fracturas de la matriz, la onda tras alcanzar su valor máximo decae, con un comportamiento muy cizallante, de forma progresiva hasta llegar a un valor mínimo ocasionado por el ruido. En su respectivo gráfico de *intensidad vs frecuencia* encuentran valores apreciables hasta frecuencias aproximadas de 7000 kHz .

En la figura 39, los resultados obtenidos tras las simulaciones del MED fueron comparados con resultados experimentales obtenidos por Haselbach y Lauke (2003), quienes realizaron ensayos sobre unas probetas de compuestos de matriz epoxi con una fibra de vidrio perpendicular a la dirección comprometida del molde. De igual modo, las investigaciones realizadas por Huguet et al. (2001) y Godin et al. (2003) presentaron resultados similares en los gráficos de *amplitud vs tiempo* obtenidos a través de ensayos.

Ejemplos de los análisis de eventos de EA realizados

Como ya se ha explicado anteriormente, al producirse un daño o fractura dentro del material consecuentemente se genera un evento de EA que provoca la aparición de ondas de tensiones que liberan energía elástica perteneciente al material. De lo mencionado, podemos concluir que resulta conveniente complementar el análisis de la forma de la onda con la energía de daños liberada.

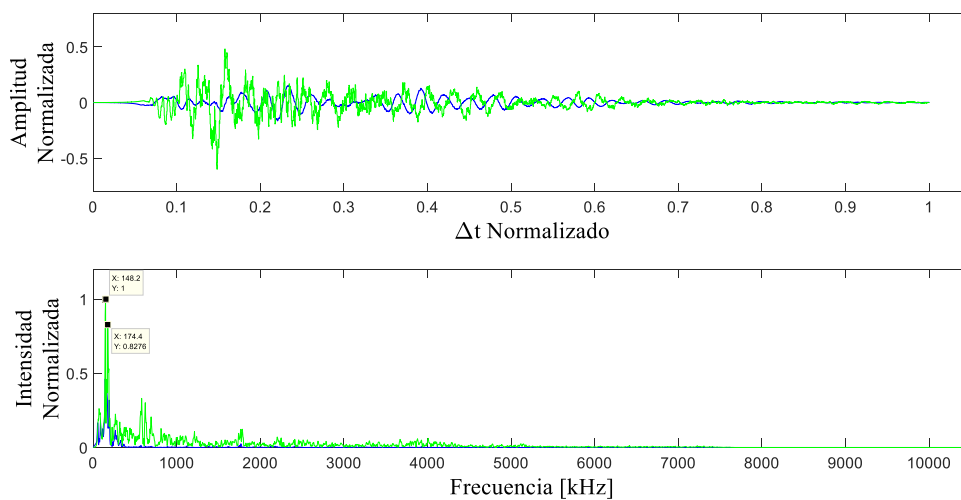
En las figuras 41 a 46 se pueden apreciar algunos de los eventos que formaron parte de los análisis realizados en la presente investigación. Las figuras se componen de tres gráficos de *amplitud normalizada*, ϵ_p y *energía liberada vs Δt* ; y también cuentan con los gráficos de *intensidad vs frecuencia* y, por último, los de *discretización y daños del MED*.

Al igual que en la figura 40, se resaltarán el contorno de la fibra y se señalará con círculos los daños que originaron las señales de EA con la misma paleta de colores que en la figura mencionada.

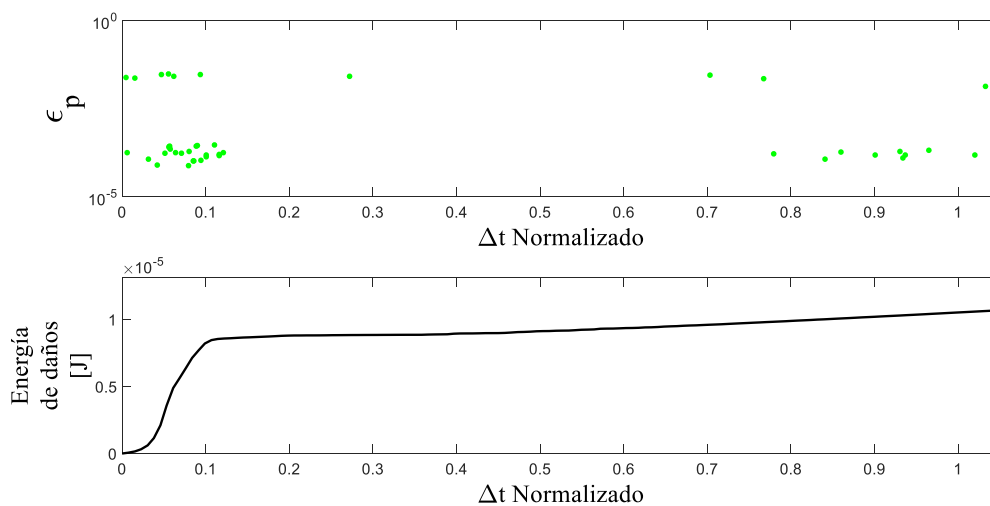
Los gráficos de ϵ_p vs Δt favorecen la percepción del lugar de presidencia de los daños, pudiendo ser de elementos de la interfaz o de la matriz, como también facilitan la observación del momento de ocurrencia de dichos daños durante el tiempo de captación de la onda de EA. Este gráfico se puede leer del siguiente modo: si aparece un punto en la mitad superior de las ordenadas, es producto de un daño o rotura de una barra que forma parte de la interfaz; si el punto aparece en la mitad inferior, el daño o rotura se produjo en un elemento de la matriz.

El resto de los eventos que también formaron parte del análisis se los puede observar en las figuras 47 a 57 del anexo.

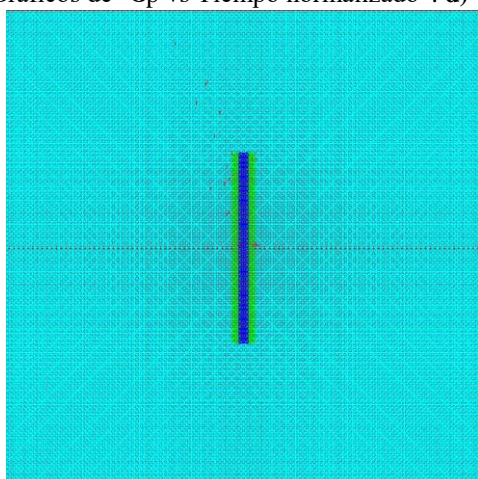
Los eventos indicados en las figuras 26 a 28 que no se encuentran analizados dentro del presente trabajo fueron despreciados en este análisis, ya sea debido a que, los eventos con amplitudes muy elevadas generaron grandes cantidades de barras dañadas que no permiten obtener conclusiones algunas y, los que cuentan con amplitudes muy pequeñas prácticamente no generaron daños en las barras del modelo simulado a través del MED.



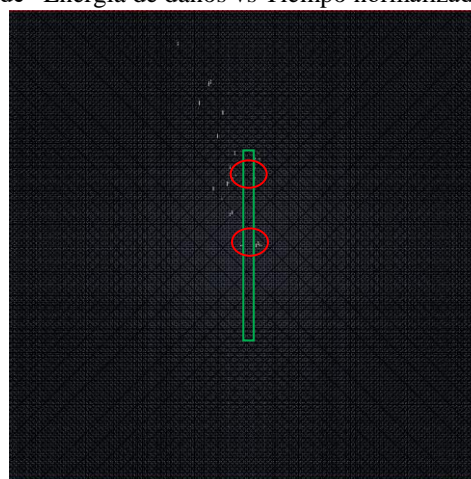
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ε_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

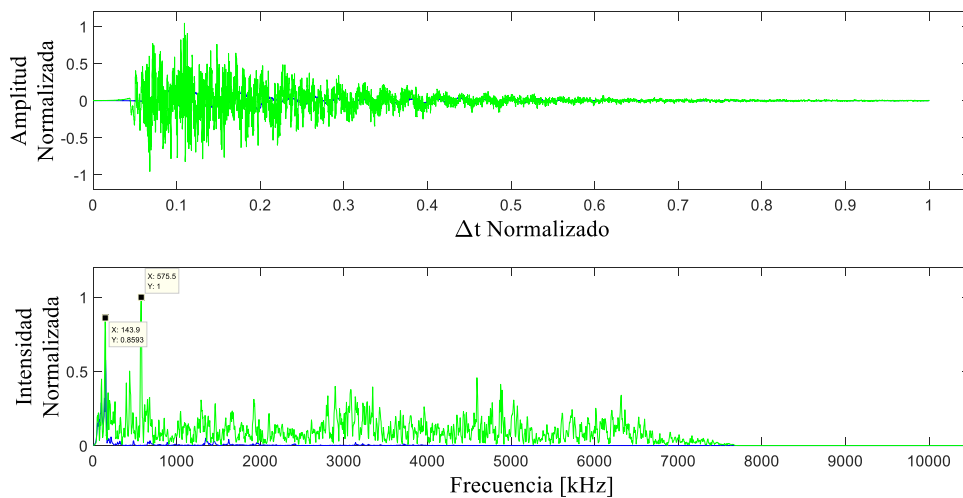


e) Discretización en el MED.

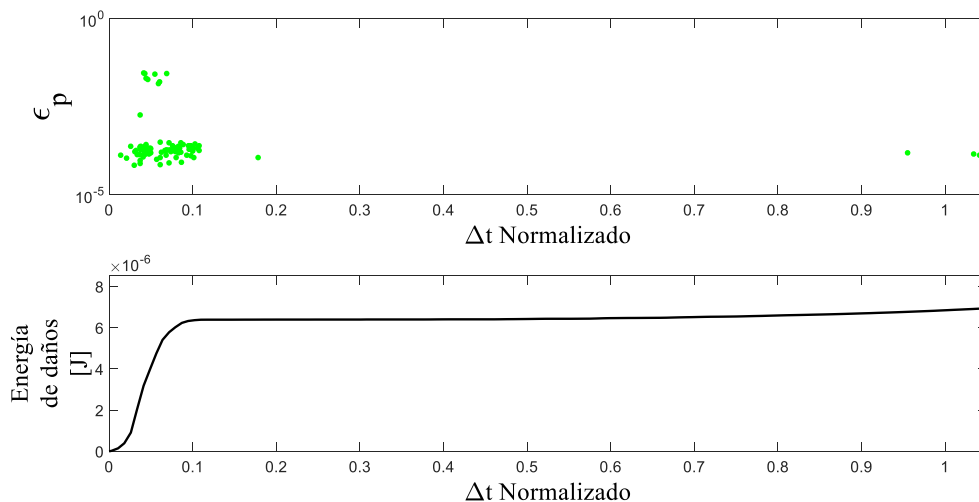


f) Daños en el MED.

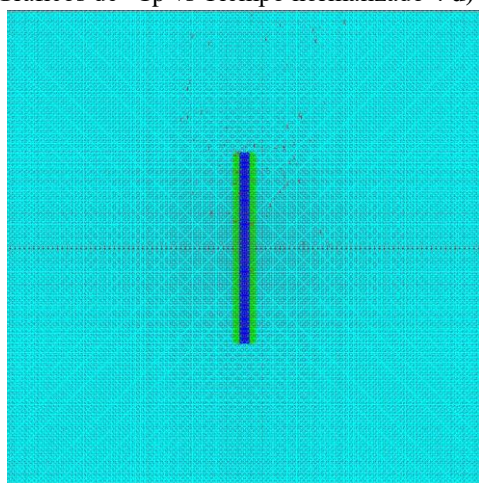
Figura 41. Gráficos de resultados del *Evento 2* de $\theta = 90^\circ$.



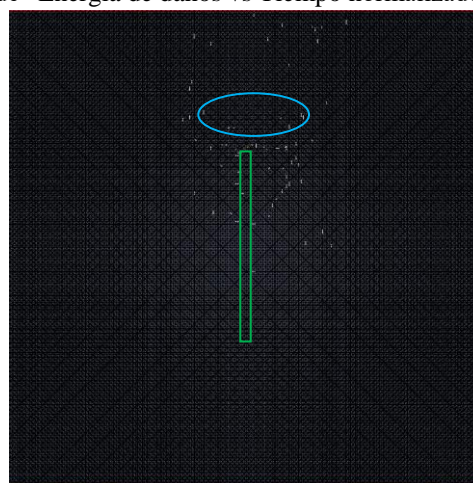
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

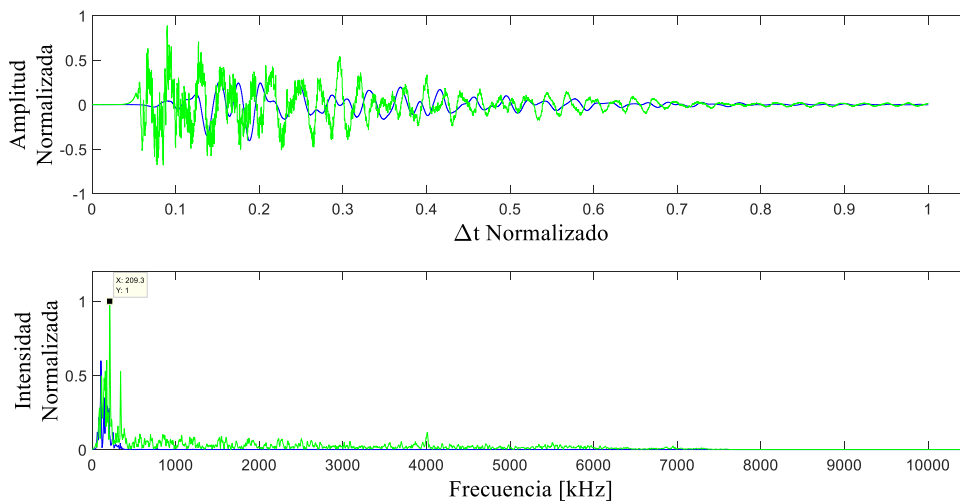


e) Discretización en el MED.

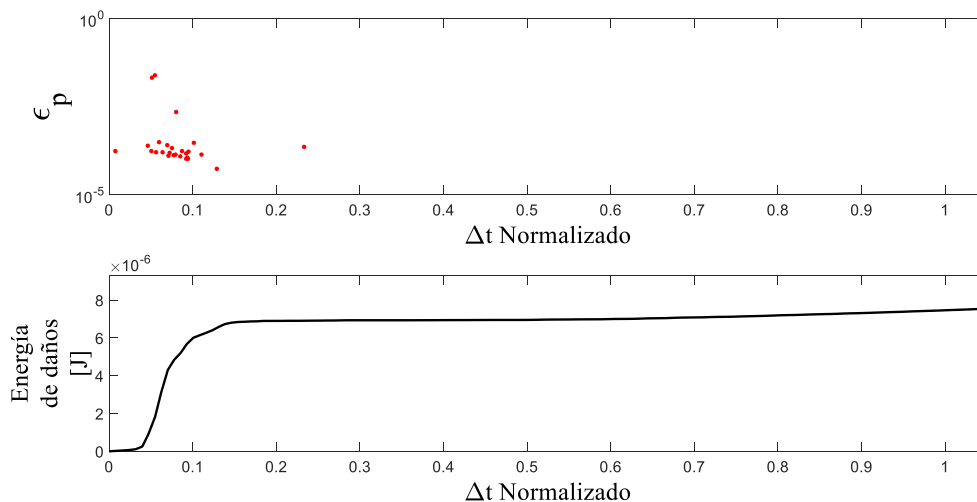


f) Daños en el MED.

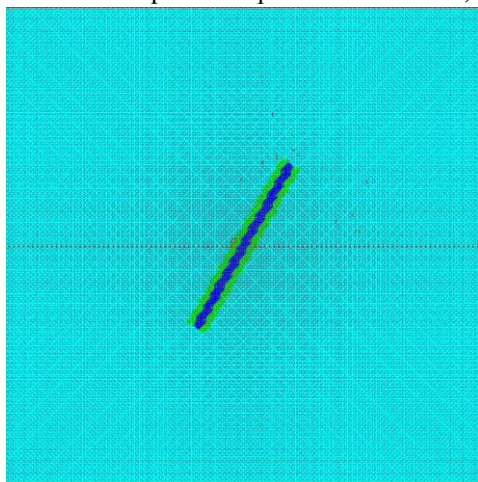
Figura 42. Gráficos de resultados del *Evento 5* de $\theta = 90^\circ$.



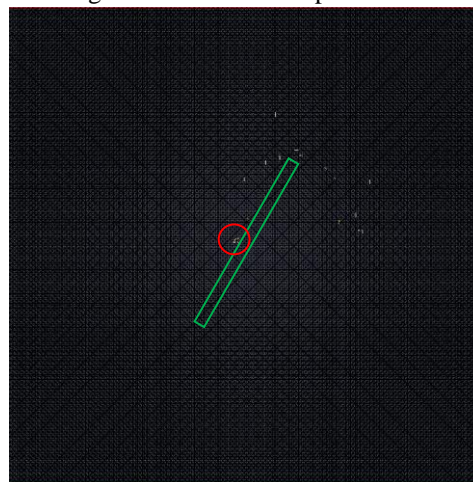
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

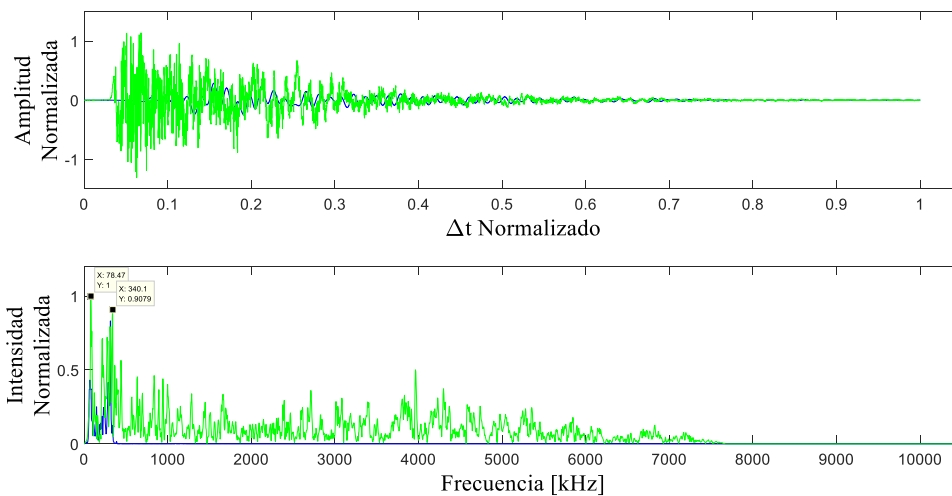


e) Discretización en el MED.

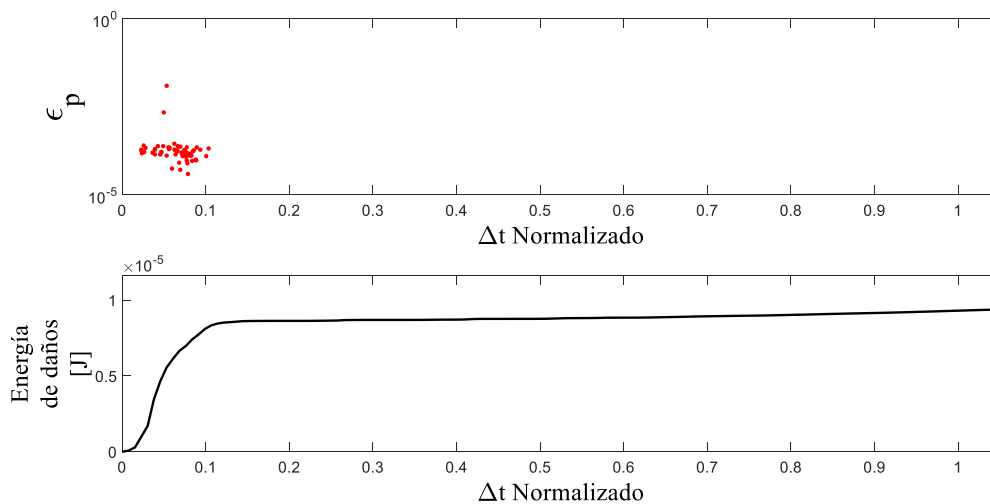


f) Daños en el MED.

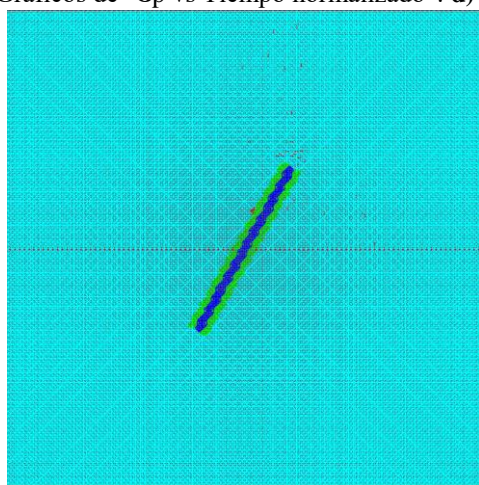
Figura 43. Gráficos de resultados del *Evento 5* de $\theta = 60^\circ$.



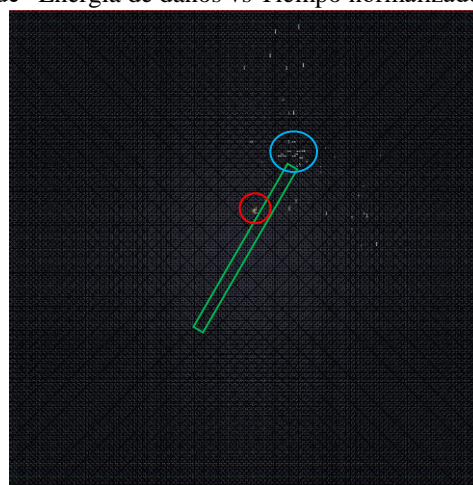
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ε̇p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

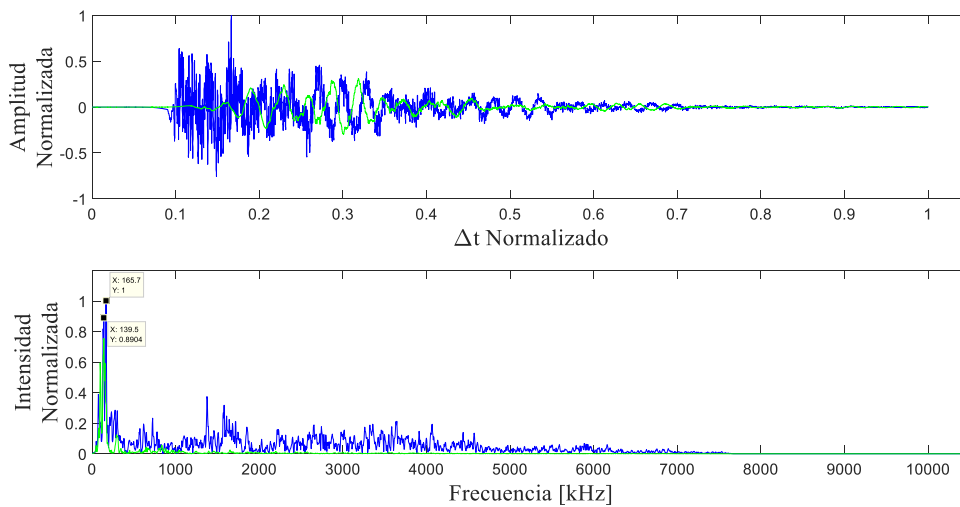


e) Discretización en el MED.

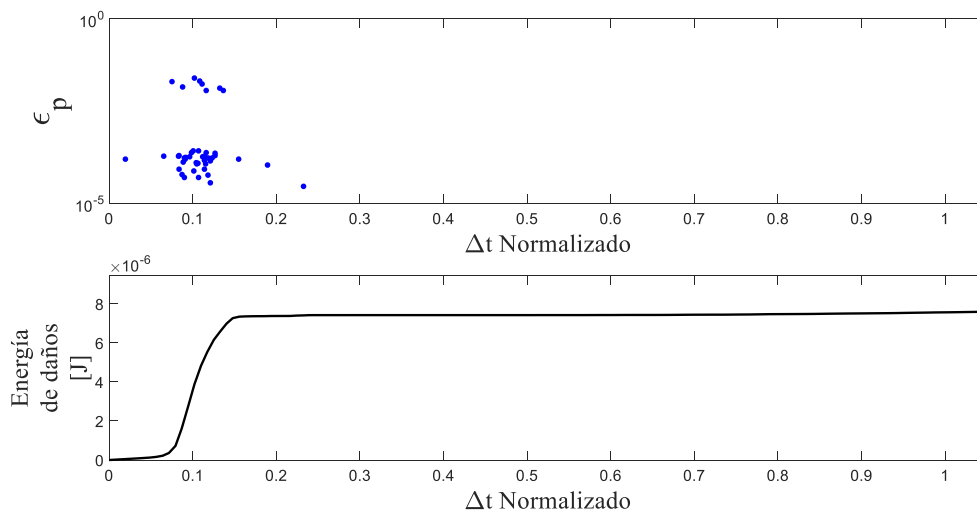


f) Daños en el MED.

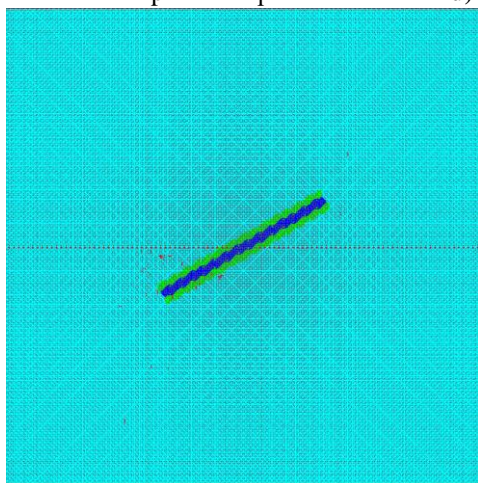
Figura 44. Gráficos de resultados del *Evento 6* de $\theta = 60^\circ$.



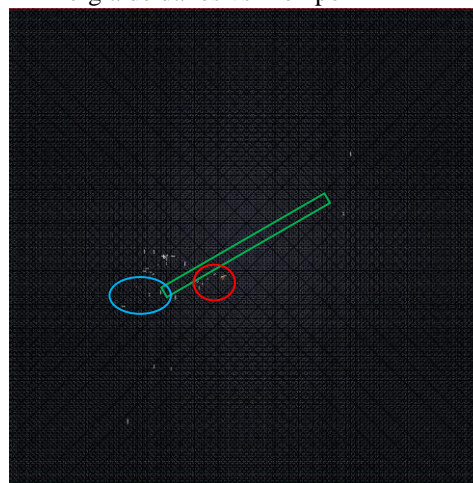
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

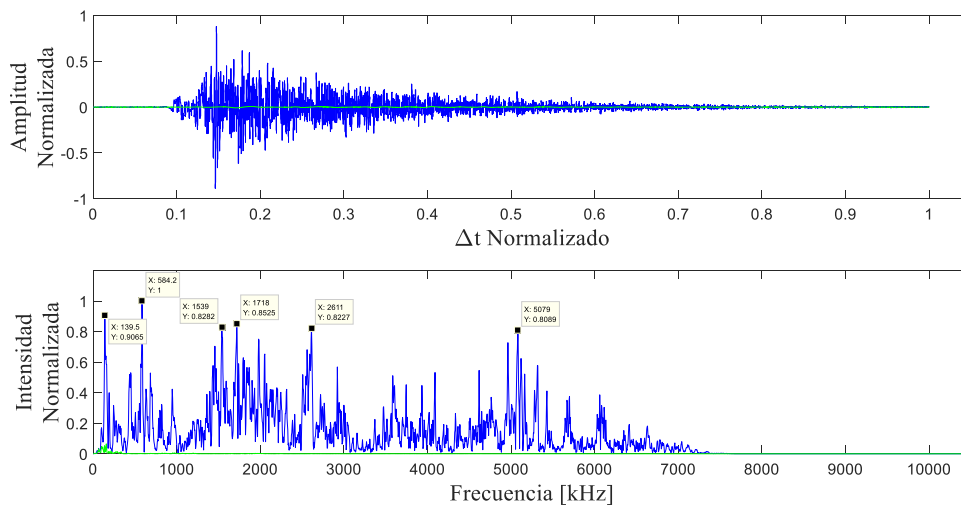


e) Discretización en el MED.

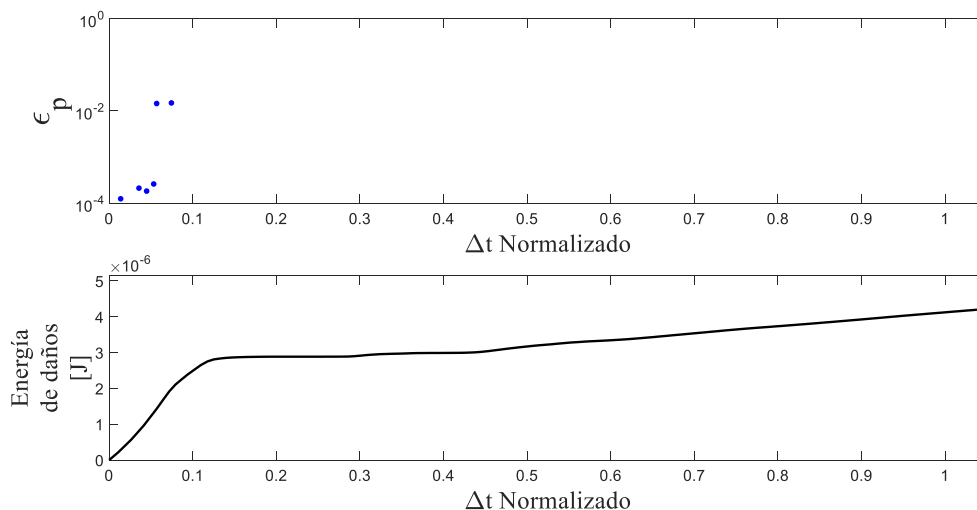


f) Daños en el MED.

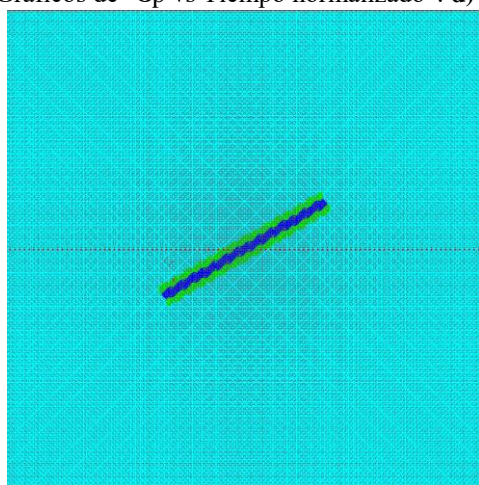
Figura 45. Gráficos de resultados del *Evento 6* de $\theta = 30^\circ$.



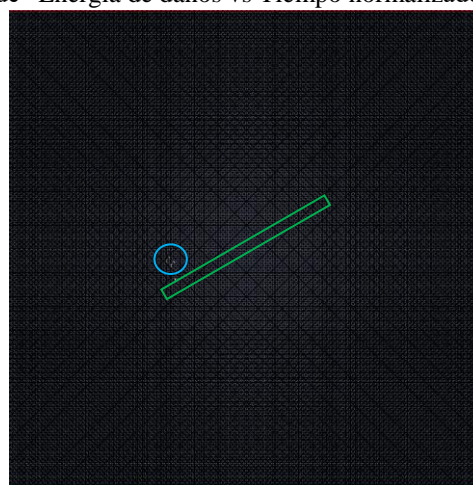
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.



e) Discretización en el MED.



f) Daños en el MED.

Figura 46. Gráficos de resultados del *Evento 13* de $\theta = 30^\circ$.

Como se puede apreciar, las formas de las ondas en los gráficos de *amplitud normalizada vs Δt* y las curvas *intensidad vs frecuencia*, ante procesos de daños en la interfaz o matriz, responden del modo mencionado precedentemente y los casos que se componen por ambos procesos dan como resultado combinaciones de las dos formas de ondas y curvas de *intensidad vs frecuencia*.

En la figura 43 f) se percibe como el proceso de despegue de interfaz de fibra-matriz (*debonding*), en el área señalada con un círculo rojo, es captado por el modelo numérico; luego se produce un pliegue de la fibra que, como se ha dicho más arriba, este efecto podría ser identificado como *snubbing*, pero deberían desarrollarse mecanismos más efectivos de detección en el modelo numérico. Este efecto de *snubbing* podría permitir el incremento de la fuerza ejercida por la fibra.

Los gráficos de energía de daños para cada uno de los eventos presentados dieron valores aproximados a 10^{-5} J, los cuales demostraron ser proporcionales al daño ocasionado al compuesto durante el evento, ya que como se puede observar en la figura 46 c) y d), fue menor la cantidad de barras dañadas respecto a la de los eventos restantes y es por ello que la energía de daños liberada fue la menor.

Clasificación de los modos fallas

Hay varias formas de determinar el tipo de grieta y la orientación de las fuentes de EA.

En este trabajo se utilizó la técnica del primer movimiento, esta nos permite clasificar el modo de fallas entre las grietas de apertura (modo I) y las fractura por corte (modo II).

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos por el análisis paramétrico que combina los valores de RA y la frecuencia media de cada evento analizado.

Es necesario aclarar que solo han sido clasificadas las señales del caso de $\theta = 60^\circ$, ya que el objetivo de dicha clasificación en el presente trabajo es demostrar que es posible la utilización de dichas técnicas en materiales compuestos.

Técnica del primer movimiento

En la figura 58 se señalan las ubicaciones de los dos sensores utilizados para la implementación de dicha técnica. Los mismos fueron ubicados únicamente en el bloque superior debido a las señales de EA solo fueron originados en dicho bloque.

Las figuras 59 y 60 muestran las curvas de EA como *aceleración vs tiempo* y los gráficos de *discretización y daños en el MED* de dos de los eventos analizados.

Los resultados de los eventos restantes son presentados en las figuras 61 a la 64 del anexo, en la que para el caso del evento 9 (figura 63) se presenta un segundo gráfico que se obtuvo por la adición de un sensor más y así determinar el modo de falla ocurrido, producto

de la ubicación inadecuada de los sensores mostrados de la figura 58 para el análisis de dicho evento.

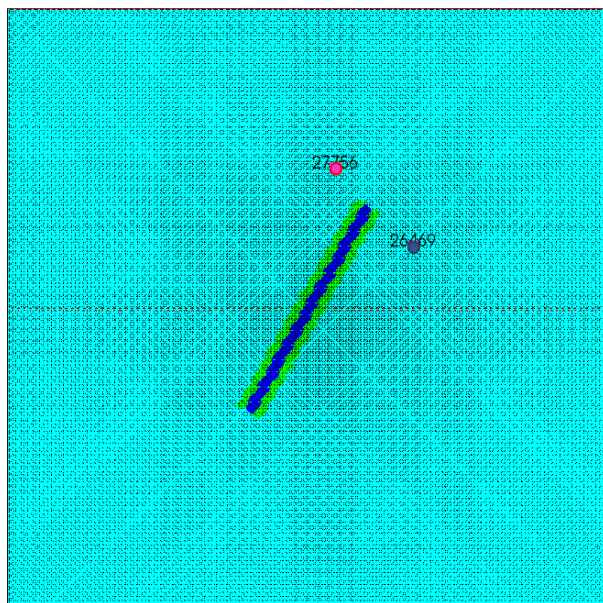


Figura 58. Ubicación nodal de sensores utilizados para el análisis por técnica del primer movimiento con su correspondiente número nudo.

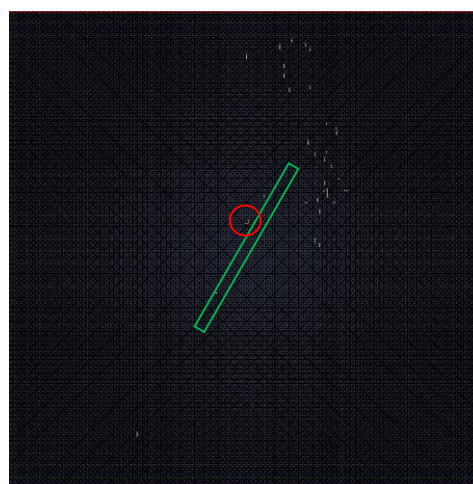
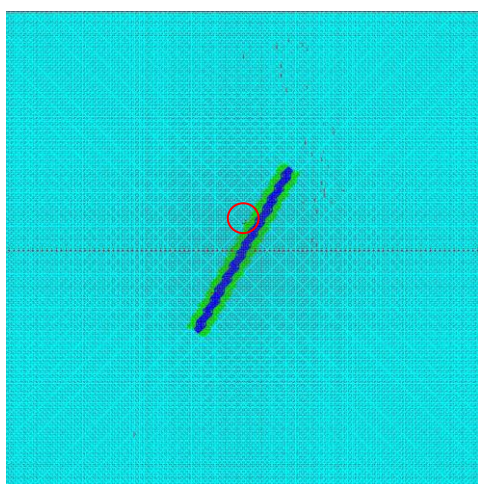
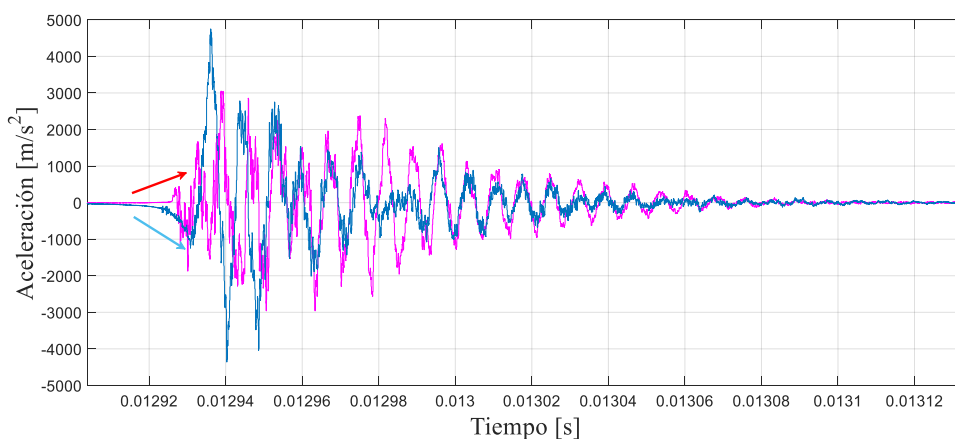


Figura 59. Técnica del primer movimiento del Evento 2 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de corte (Modo II).

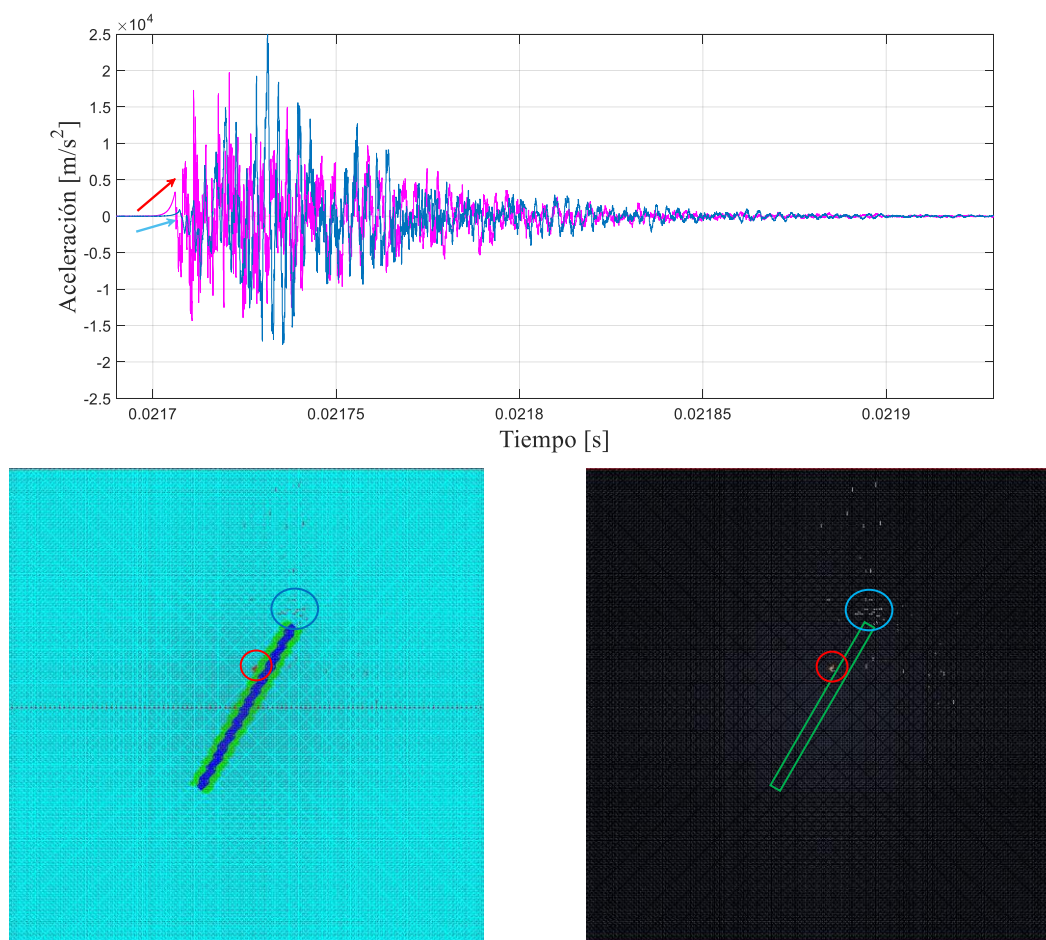


Figura 60. Técnica del primer movimiento del Evento 6 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de tracción (Modo I).

Tras haber realizado este análisis, se obtuvo como resultado que los eventos 3, 5 y 6 las fracturas ocurrieron debido a esfuerzos axiales (modo I); por el otro lado, los eventos 2, 9 y 10 fueron ocasionados por los de corte (modo II).

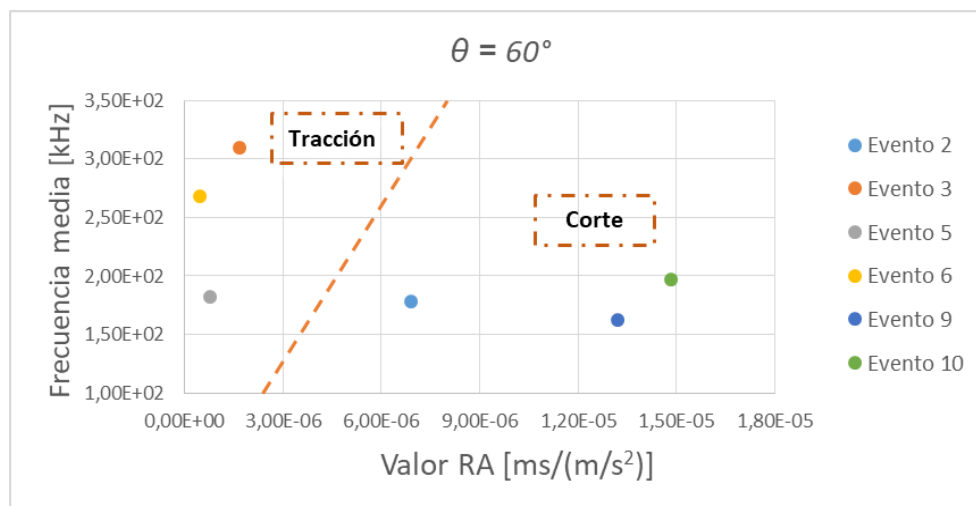
Clasificación de las fisuras utilizando el valor de RA

En la figura 65, se presenta la clasificación paramétrica utilizando el *valor de RA* y la *frecuencia media*, en la cual se grafican los eventos como puntos. Los resultados obtenidos para los seis eventos analizados en el punto anterior, permitieron trazar una aproximación de la pendiente de la recta que separa las fallas o daños producto de esfuerzos de corte o tracción.

En la tabla 3 se detallan los parámetros obtenidos las señales de los eventos utilizados para graficar la figura 65, de los cuales fueron captados por el único sensor ubicado en el bloque superior (ver curva verdes de la figura 27 de los anexos).

Tabla 3. Parámetros de las señales de eventos para gráfico *frecuencia media vs valor de RA*.

Parámetros de Señales	Evento 2	Evento 3	Evento 5	Evento 6	Evento 9	Evento 10
Conteos	22	48	40	51	15	22
Tiempo total [ms]	1,23E-01	1,55E-01	2,20E-01	1,90E-01	9,25E-02	1,12E-01
Frecuencia Media [kHz]	1,78E+02	3,09E+02	1,82E+02	2,68E+02	1,62E+02	1,97E+02
Tiempo al pico [ms]	2,20E-02	2,62E-02	1,08E-02	8,50E-03	1,33E-02	1,83E-02
Amplitud pico [m/s ²]	3,19E+03	1,56E+04	1,38E+04	1,77E+04	1,01E+03	1,23E+03
RA [ms/(m/s ²)]	6,90E-06	3,09E+02	7,81E-07	4,80E-07	1,32E-05	1,48E-05

**Figura 65.** Clasificación del tipo de fisuras basada en la combinación de *frecuencia media vs valor de RA*.

La posición de los eventos en la figura 65 presentan concordancia con los resultados obtenidos por la técnica del primer movimiento, demostrando que el gráfico muestra semejanza con el gráfico propuesto por Grosse y Ohtsu (2008) en la figura 6, pudiéndose concluir que los resultados son acertados en relación al origen de los esfuerzos causante de los eventos.

Conclusiones y recomendaciones

La técnica de las emisiones acústicas es aplicada en distintos tipos de materiales, incluyendo los materiales compuestos.

En este trabajo se ha utilizado un modelo numérico para el análisis de las EA en materiales compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras cortas de acero. Siendo útiles para la comparación con resultados experimentales del mismo tipo de material, facilitando la interpretación de los fenómenos involucrados en las EA experimentales.

Del trabajo realizado y los resultados obtenidos se concluye que:

- Es posible la implementación de la TEA en el MED para la modelación de materiales compuestos de matriz cementicia con fibras cortas de acero.
- La concordancia entre los resultados obtenidos en esta simulación y los obtenidos por ensayos de otros autores, reflejan las potencialidades de la implementación del MED en el análisis de eventos de EA en materiales compuestos.
- Es posible el análisis del valor b en modelos numéricos de materiales compuestos, dando resultados comparables con investigaciones experimentales.
- Es recomendable contar al menos 25 eventos para el cálculo del valor b en el modelo obtenido por el MED.
- Es posible el uso de las EA para determinar en el MED los tipos de daño producidos en materiales compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras cortas de acero.
- Las formas de las señales de EA emitidas y los gráficos en términos de frecuencia permiten predecir el origen de los daños producidos, entre los ocasionados por la fisuración de la matriz cementicia y los que son productos del despegue entre la fibra y la matriz.
- Es recomendable utilizar siempre los gráficos normalizados en términos de frecuencia en el modelo numérico para poder así tener más seguridad para predecir el origen de los daños.
- No se recomienda analizar en el MED, eventos de EA con amplitudes muy elevadas para predecir el origen de los daños, ya que no brindarán resultados concluyentes.
- Es posible el uso de la clasificación paramétrica en los modos de falla por tracción y corte (Modo I y II) para materiales compuestos modelados numéricamente en el MED, siendo recomendable complementar con otro tipo de análisis para determinar, en primera instancia, el valor de la pendiente de la recta que sirve como límite entre los modos mencionados.

Referencias Bibliográficas

- Birck, G. (2016). *Análise do processo de dano em material quase-frágil através da simulação de um modelo de barras* (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Birck G., Iturrioz I., Lacidogna G., Carpinteri A. (2010). Damage process in heterogeneous materials analyzed by a lattice model simulation. *Engineering Failure Analysis*, 70, 157-176. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.08.004
- Car E., Oller S., Oñate E. (2000). Propiedades estructurales de los materiales compuestos. En: *Tratamiento numérico de los materiales compuestos*. (p. 13-70). (1ra ed.) Barcelona, España: Editorial del Centro de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Colpo A. B., Koteski L. E., Iturrioz I. (2016). The size effect in quasi-brittle materials: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Damage Mechanics*, 0 (0), 7-20. doi: 10.1177/1056789516671776
- Colombo I. S., Main I. G., Forde M. C. (2003). Assessing damage of reinforced concrete beam using “b-value” analysis of acoustic emission signal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (3), 280-286. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(280)
- Daheme F., Yaacoubi S., El Mountassir M. (2015). Acoustic emission of composites structures: story, success, and challenges. *Physics Procedia*, 70, 599-603. doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.031
- Fukaura K., Ono, K. (2001). Acoustic emission analysis of carbide cracking in tool steels. *Journal of Acoustic Emission*, 19.
- Godin N., Huguet S., Gaertner R., Salmon L. (2004). Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers. *NDT&E International*, 37, 253-264. doi: 10.1016/j.ndteint.2003.09.010
- Grosse C. U., Ohtsu M. (Eds.) (2008). *Acoustic emission testing: Basics for research – Applications in civil engineering*. Leipzig, Alemania: Editorial Springer.
- Haselbach C. y Lauke B. (2003). Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion. *Composites Science and Technology*, 63, 2155–2162. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00193-3
- Huguet S., Godin N., Gaertner R., Salmon L., Villard D. (2001). Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Composites Science and Technology*, 62, 1433-1444. doi: 10.1016/S0266-3538(02)00087-8

- Iturrioz I., Lacidogna G., Carpinteri A. (2013). Experimental analysis and truss-like discrete element model simulation of concrete specimens under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 110, 81-98.
- Iturrioz I., Lacidogna G., Carpinteri A. (2014). Acoustic emission detection in concrete specimens: Experimental analysis and lattice model simulations. *International Journal of Damage Mechanics*, 23(3), 327-358.
- Justen A. L. (2012). *Aplicação de técnicas de emissão acústica na caracterização de dano em estruturas*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Kosteski L. (2010). *Aplicación del método de los elementos discretos en mecánica de fractura estática y dinámica* (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia.
- Kosteski L.E., Barrios D'Ambra R., Iturrioz I. (2012). Crack propagation in elastic solids using the truss-like discrete element method. *International Journal of Fracture*, 174(2), 139-161.
- Li V. C., Wang Y., Backer S. (1991). A micromechanical model of tension softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites. *J. Mech Phys. Solids*, 39 (5), 607-625.
- MACCAFERRI (2002-2007). Empresa do Grupo Industrial Maccaferri. Maccaferri, América Latina.
- Martínez-González E., Romeu J., Picas I., Casellas D. (diciembre, 2010). Aplicación de emisión acústica (EA) al estudio del comportamiento micro-mecánico de los AHSS. *AEIM*. Conferencia llevada a cabo en el XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España.
- Uberti, B. (2012). *Mecánica computacional aplicada al estudio de materiales compuestos de matriz frágil reforzado con fibras cortas*. Resistencia: Universidad Nacional del Nordeste.
- Uberti B., Invaldi M. A., Rossi Cabral N., Barrios D'Ambra R., Iturrioz I. (noviembre, 2016). Estudio paramétrico de la interfaz fibra-matriz en compuestos reforzados con fibras cortas. *ENIEF*. Conferencia llevada a cabo en el XXII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Córdoba, Argentina.
- Uberti B., Rossi Cabral N., Invaldi M. A., Barrios D'Ambra R., Iturrioz I. (noviembre, 2016). Materiales compuestos reforzados por fibras cortas: estudio utilizando el método de los elementos discretos formado por barras. Conferencia llevada a cabo en las XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Asunción, Paraguay.

ANEXOS

ANEXOS FIGURAS

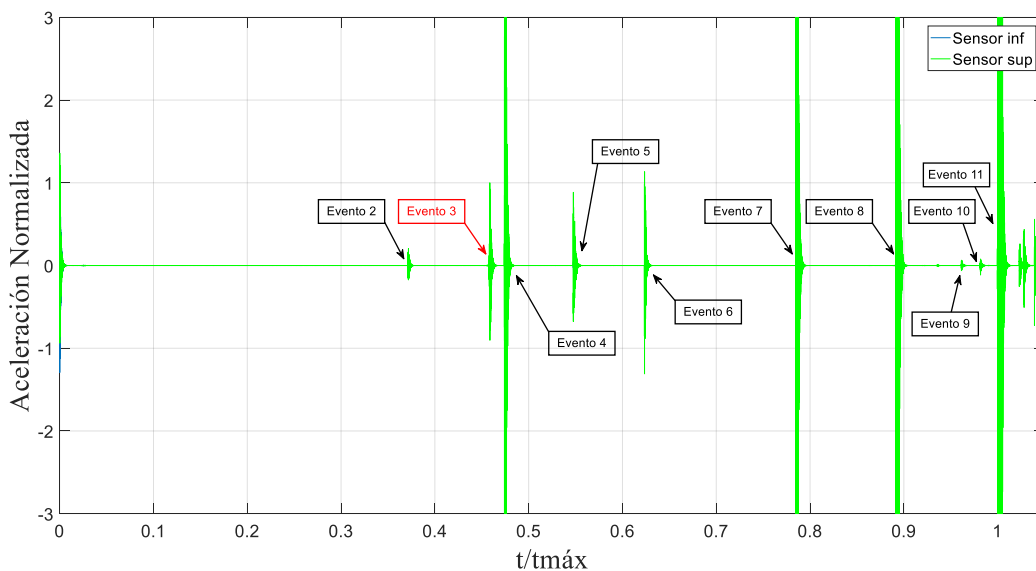


Figura 27. Señales de EA durante la simulación de $\theta = 60^\circ$. Aceleración vertical normalizada respecto al evento 3 vs tiempo de ensayo normalizado.

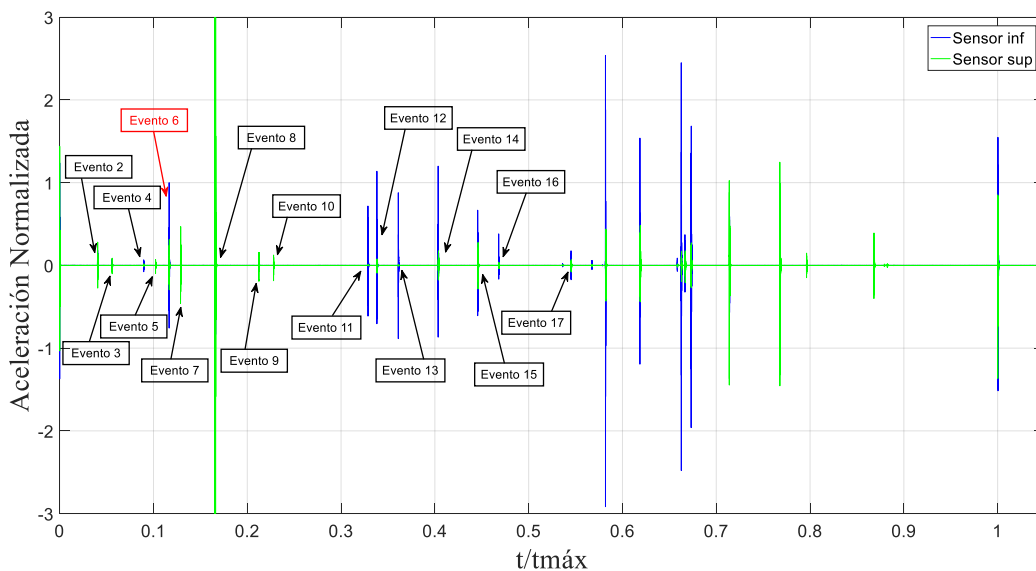


Figura 28. Señales de EA durante la simulación de $\theta = 30^\circ$. Aceleración vertical normalizada respecto al evento 6 vs tiempo de ensayo normalizado.

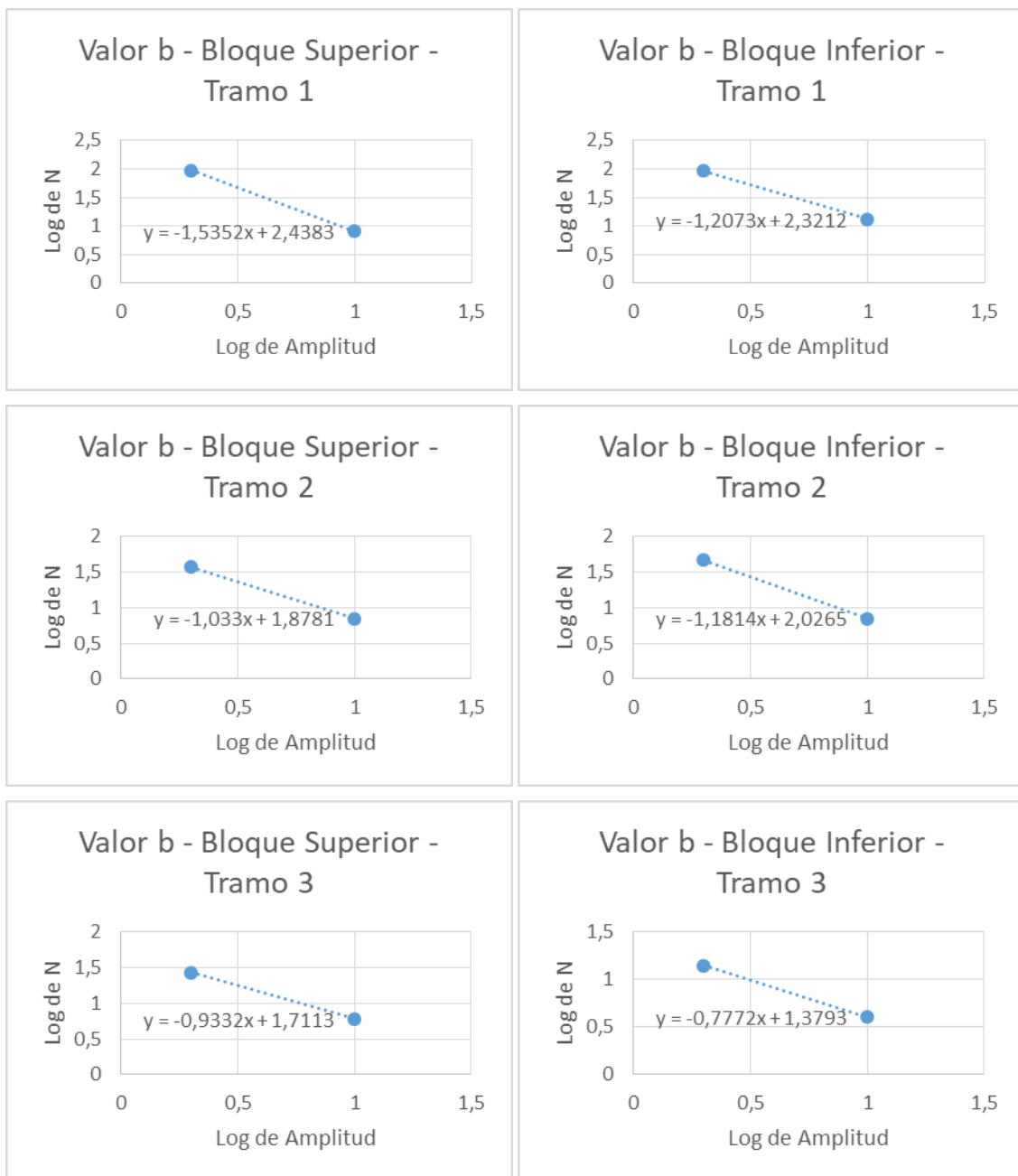


Figura 32. Valor b por intervalo $\theta = 90^\circ$.

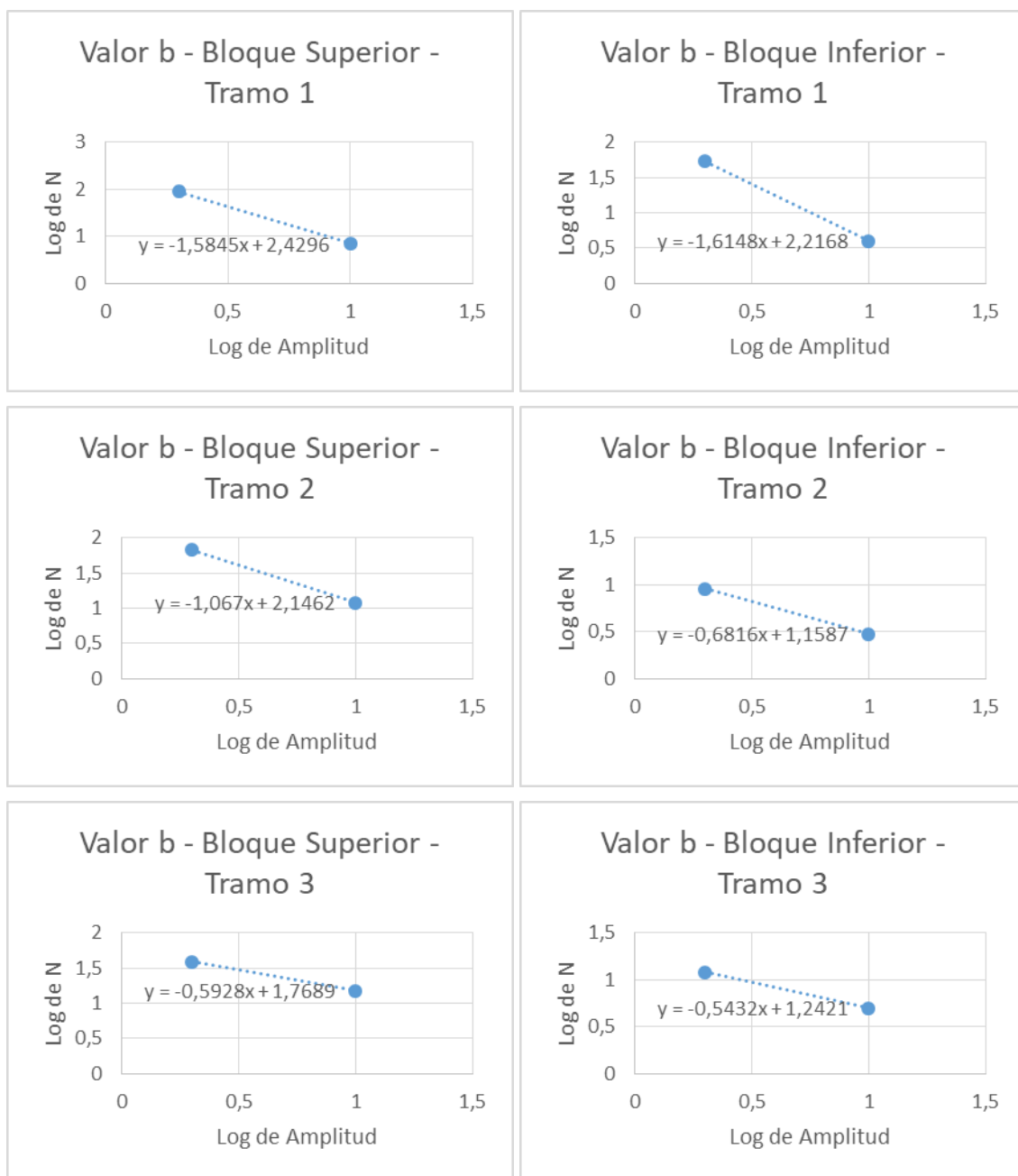


Figura 33. Valor b por intervalo $\theta = 60^\circ$.

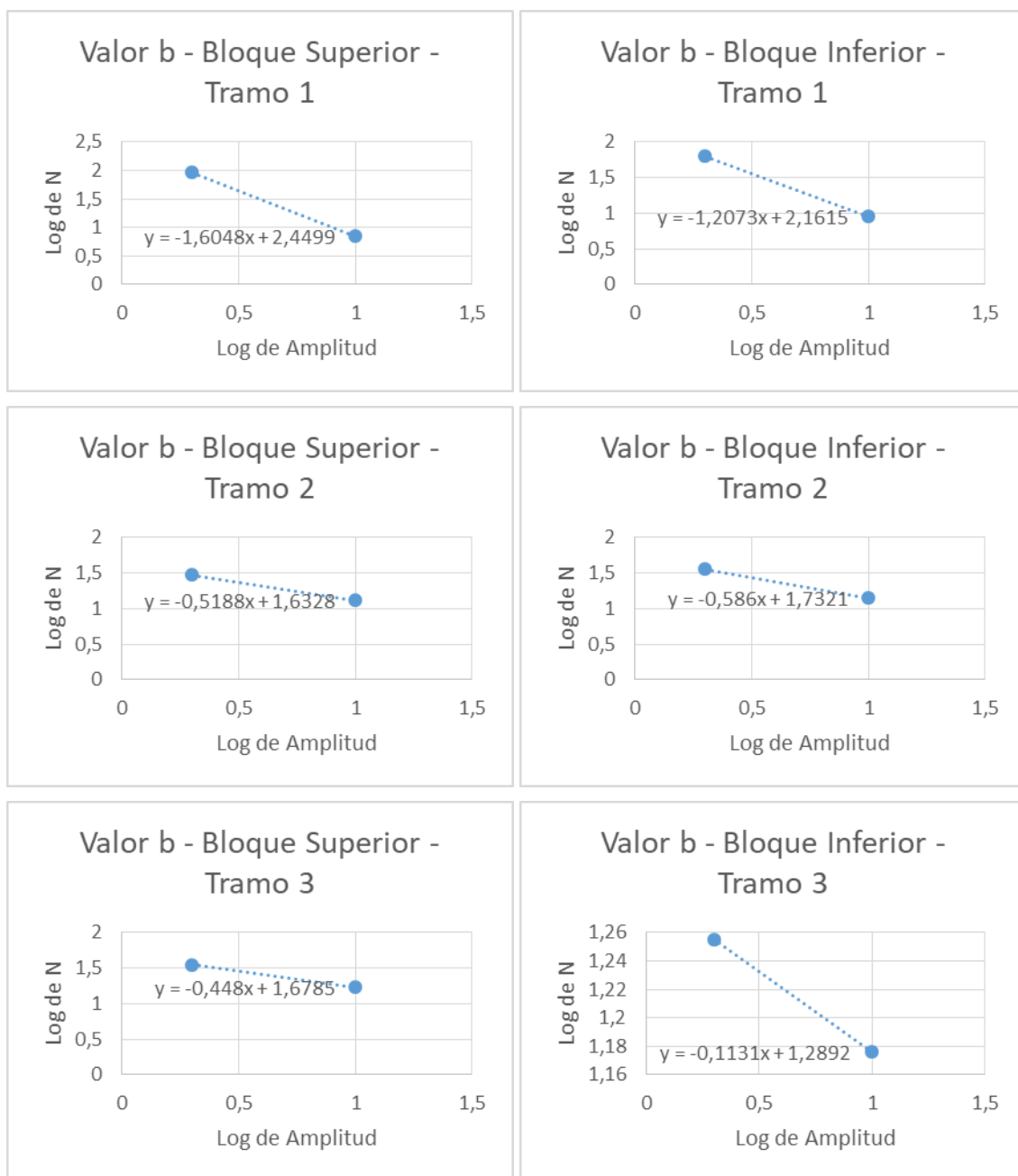


Figura 34. Valor b por intervalo $\theta = 30^\circ$.

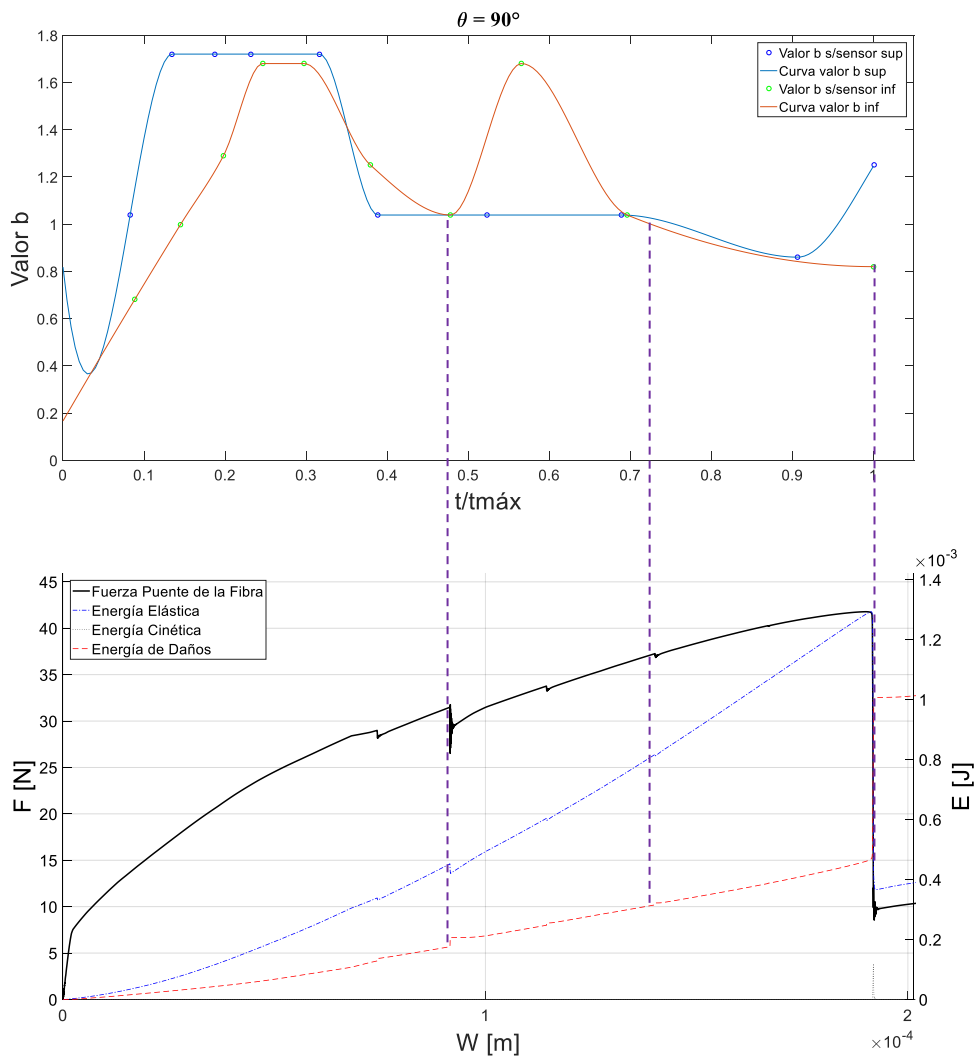


Figura 37. Variación del valor b durante el proceso de daño en el tiempo y gráficos de energías y fuerza puente vs apertura de la fisura para $\theta = 90^\circ$.

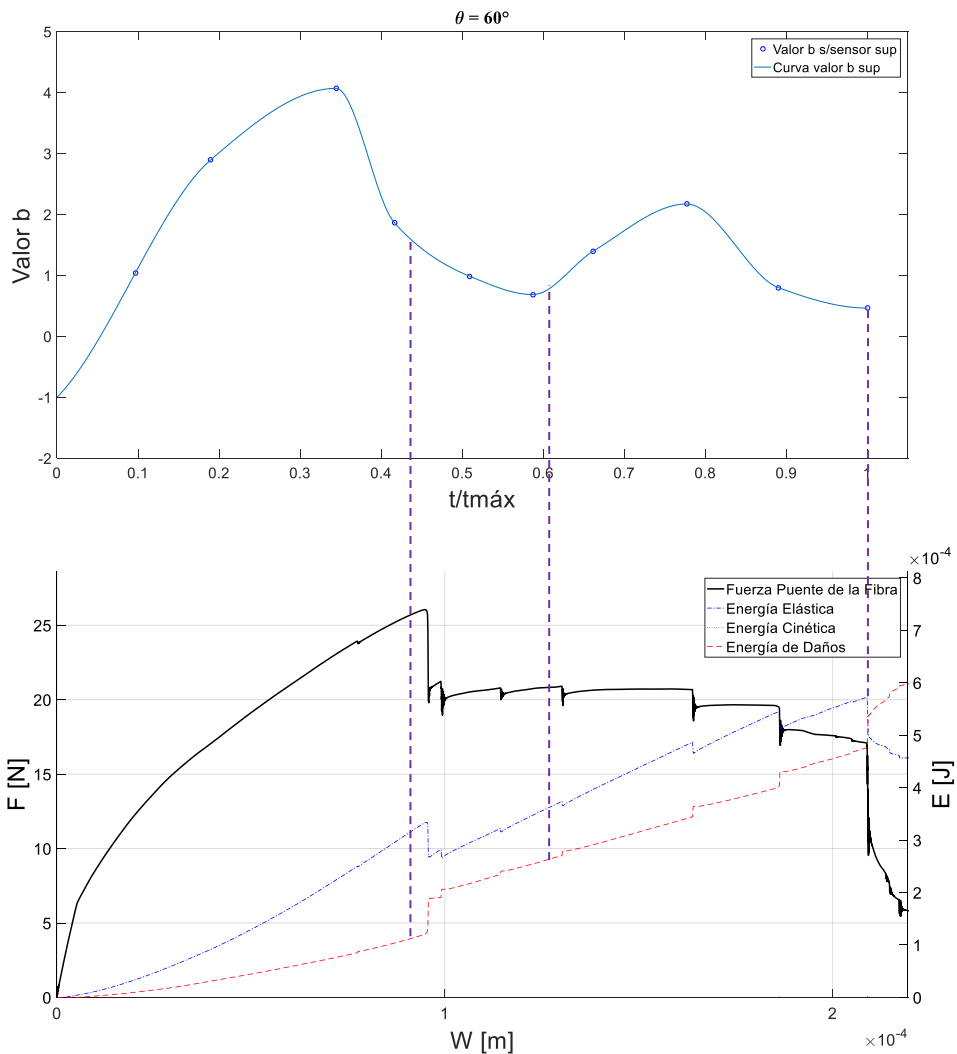
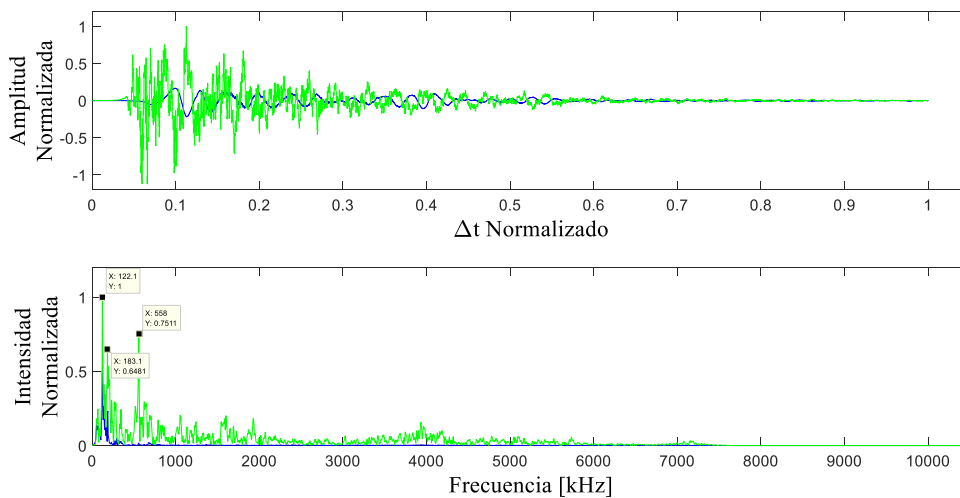
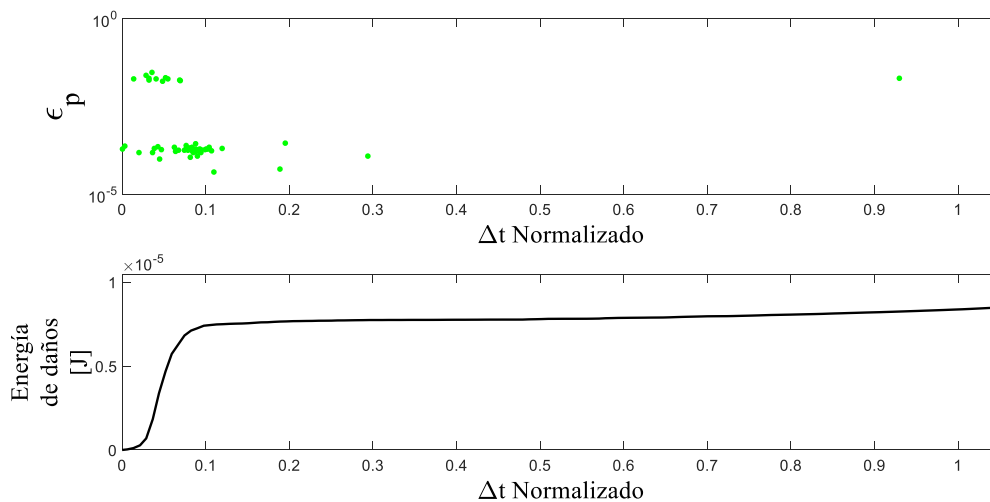


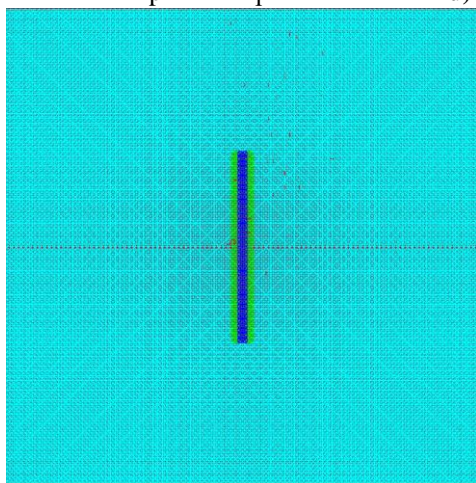
Figura 38. Variación del valor b durante el proceso de daño en el tiempo y gráficos de energías y fuerza puente vs apertura de la fisura para $\theta = 60^\circ$.



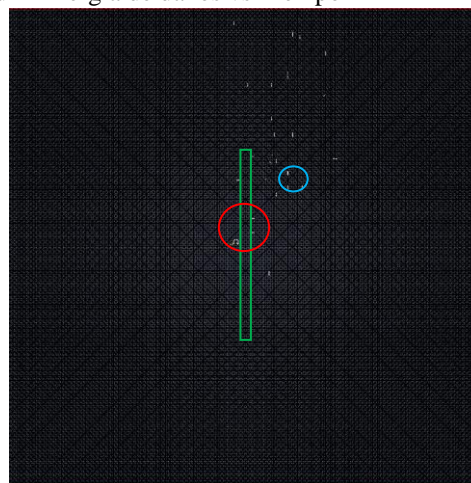
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ $\dot{\epsilon}_p$ vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

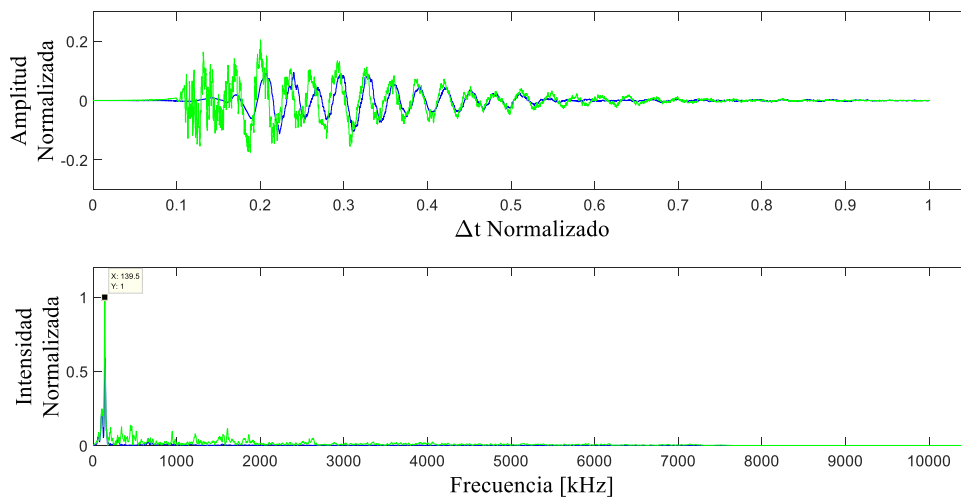


e) Discretización en el MED.

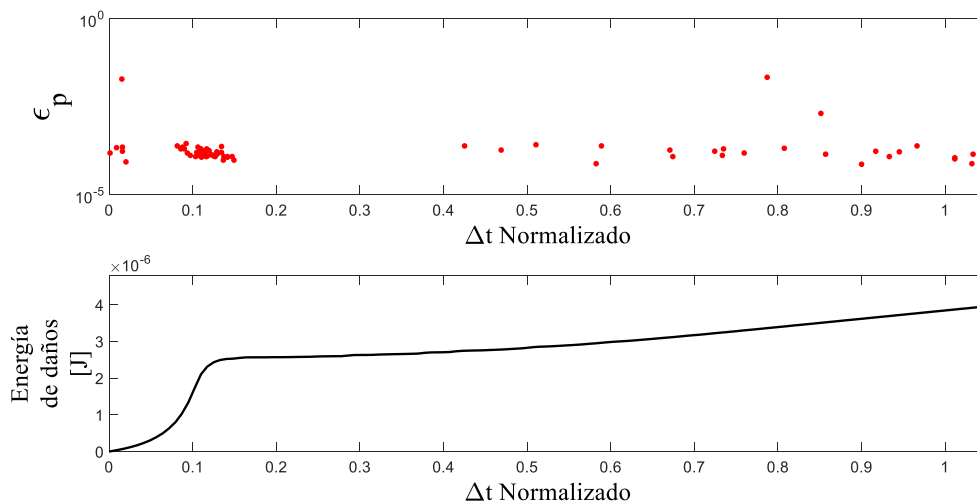


f) Daños en el MED.

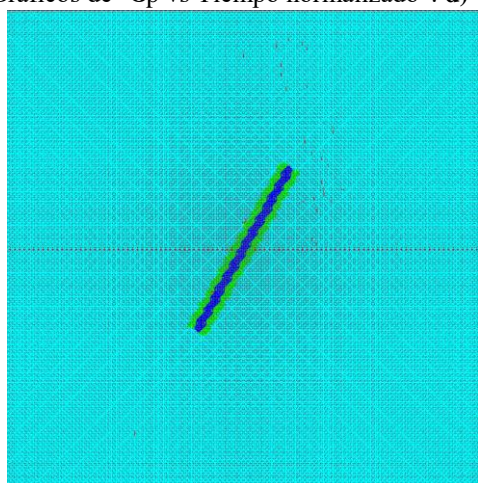
Figura 47. Gráficos de resultados del *Evento 4* de $\theta = 90^\circ$.



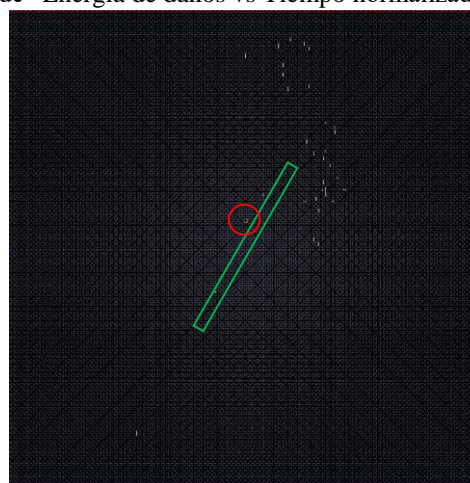
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

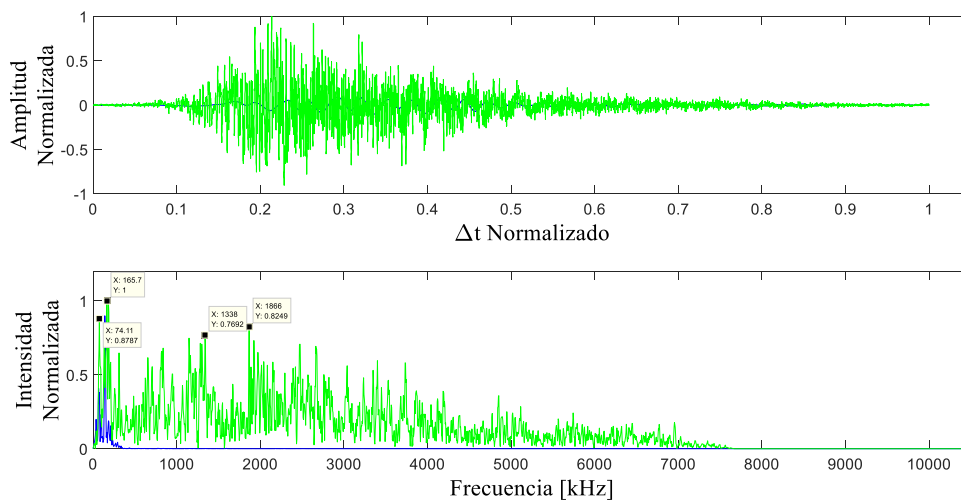


e) Discretización en el MED.

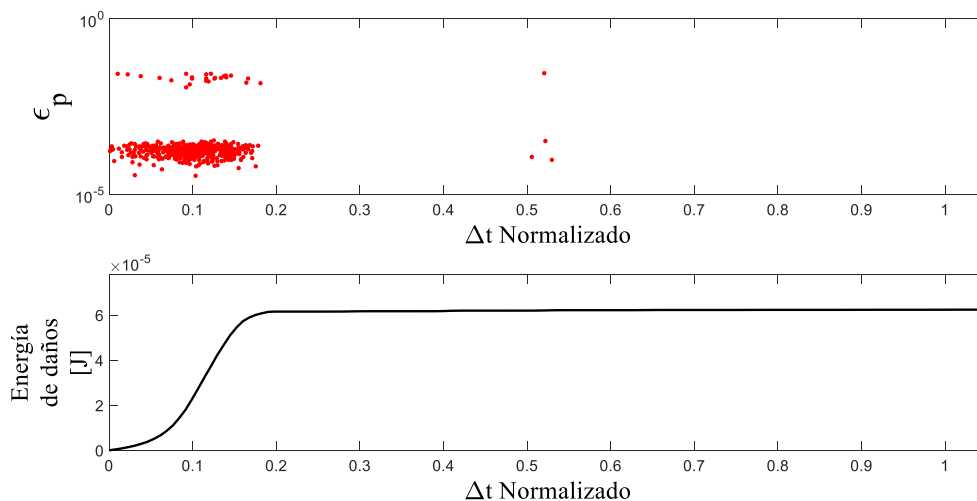


f) Daños en el MED.

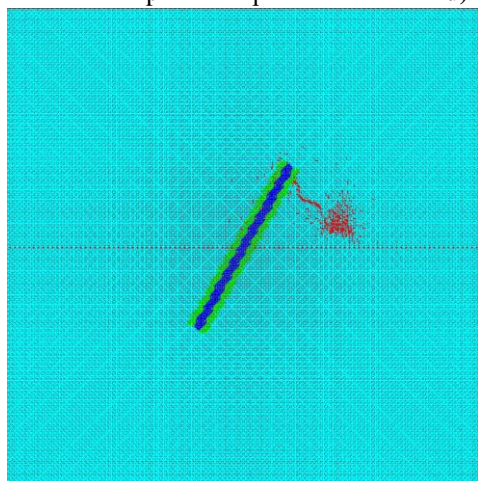
Figura 48. Gráficos de resultados del *Evento 2* de $\theta = 60^\circ$.



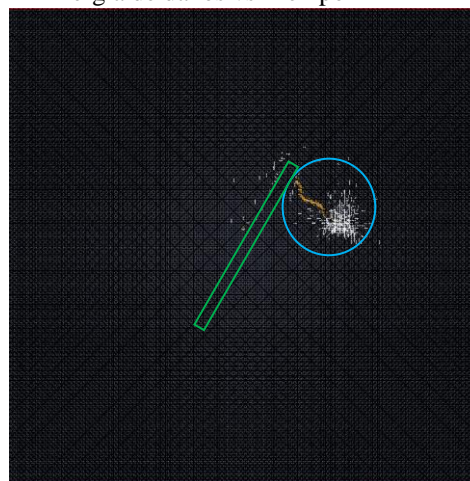
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizados”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

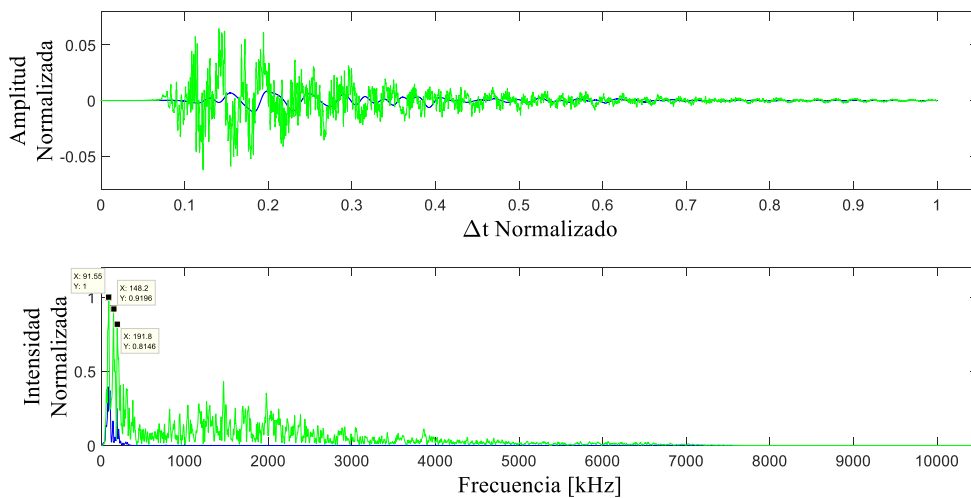


e) Discretización en el MED.

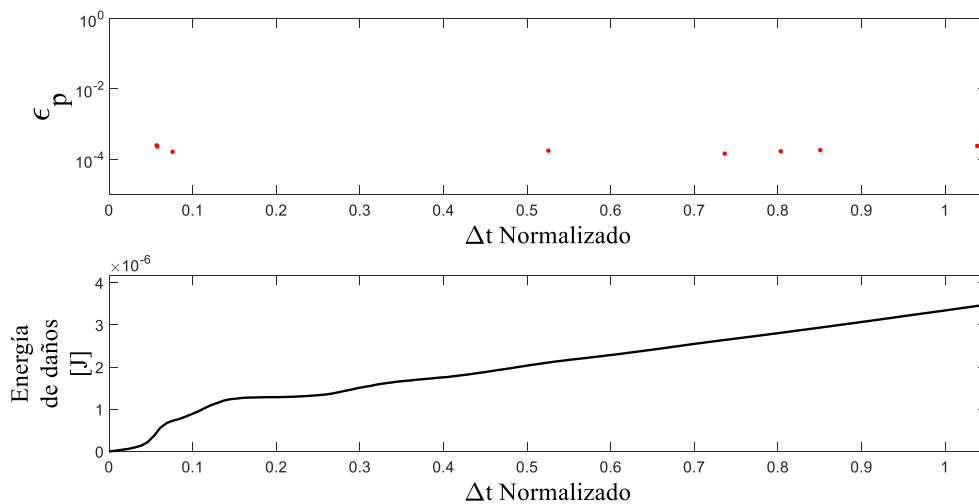


f) Daños en el MED.

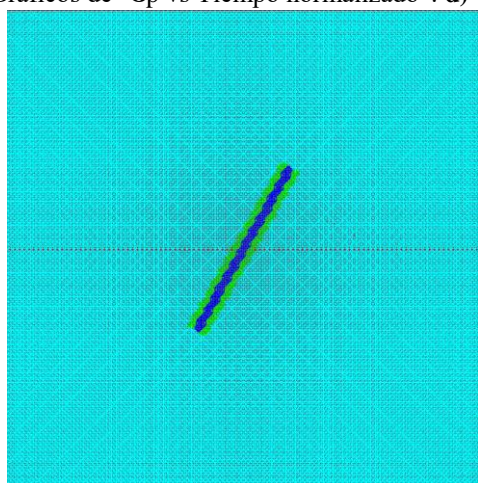
Figura 49. Gráficos de resultados del *Evento 3* de $\theta = 60^\circ$.



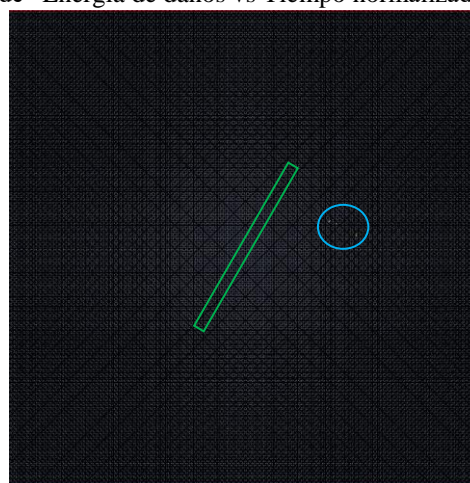
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

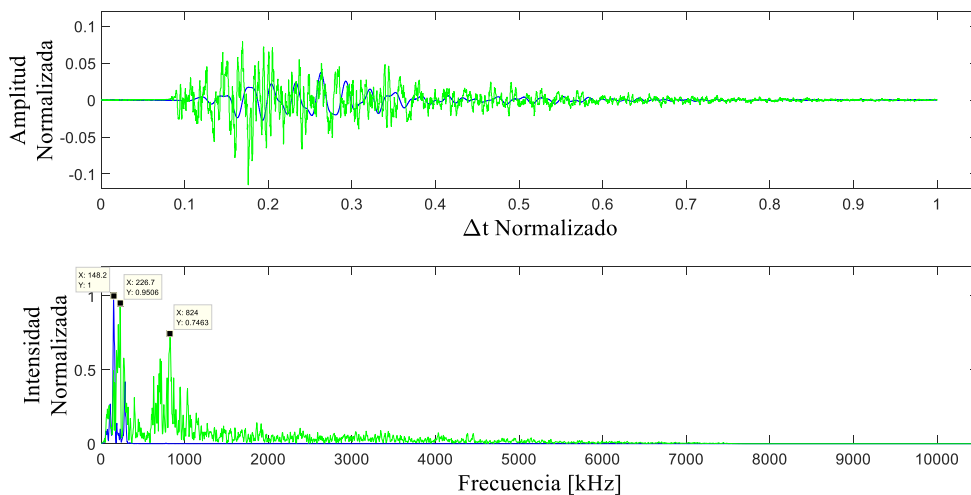


e) Discretización en el MED.

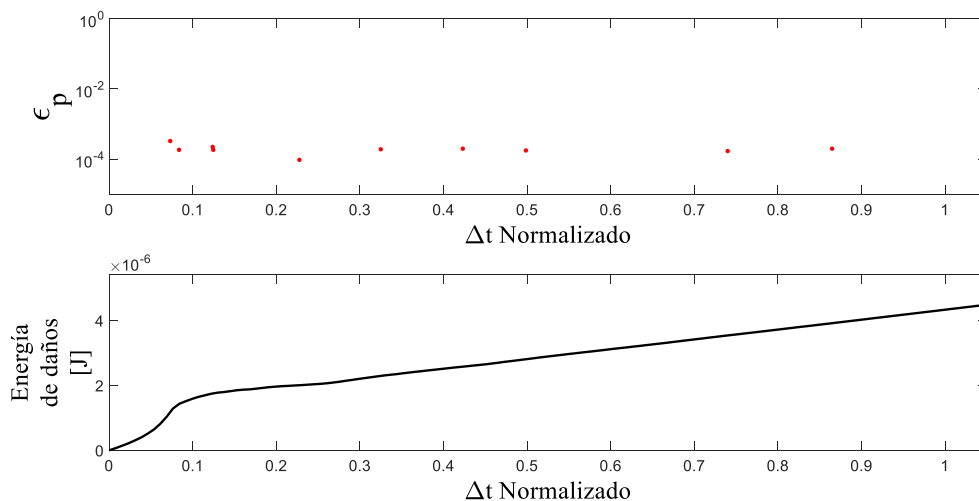


f) Daños en el MED.

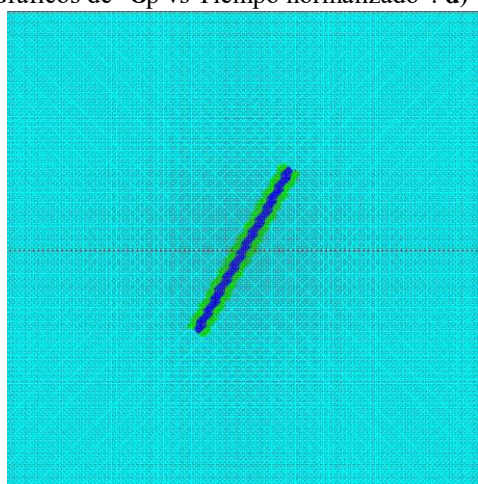
Figura 50. Gráficos de resultados del *Evento 9* de $\theta = 60^\circ$.



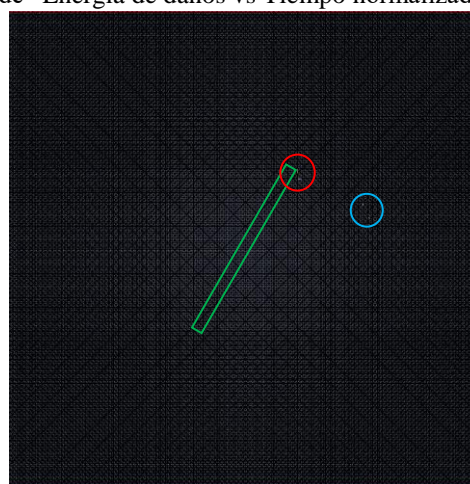
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizados”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

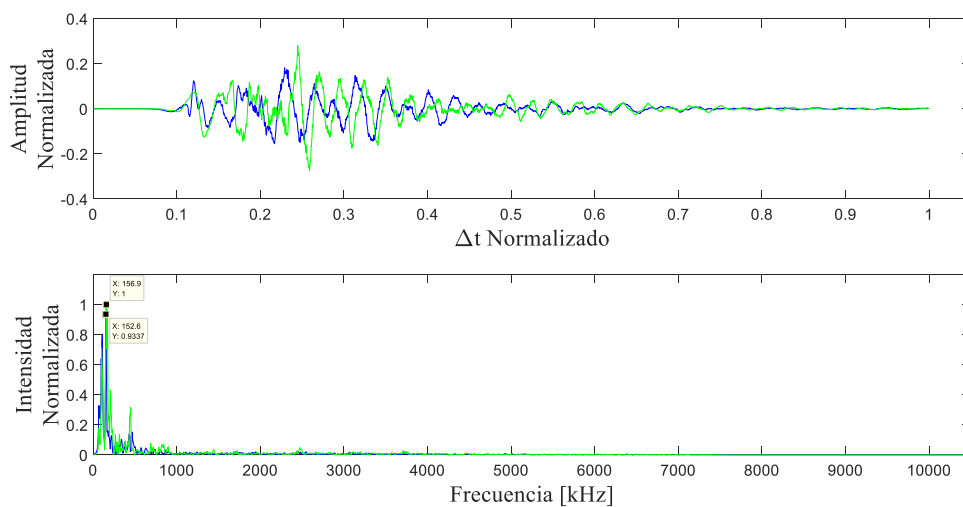


e) Discretización en el MED.

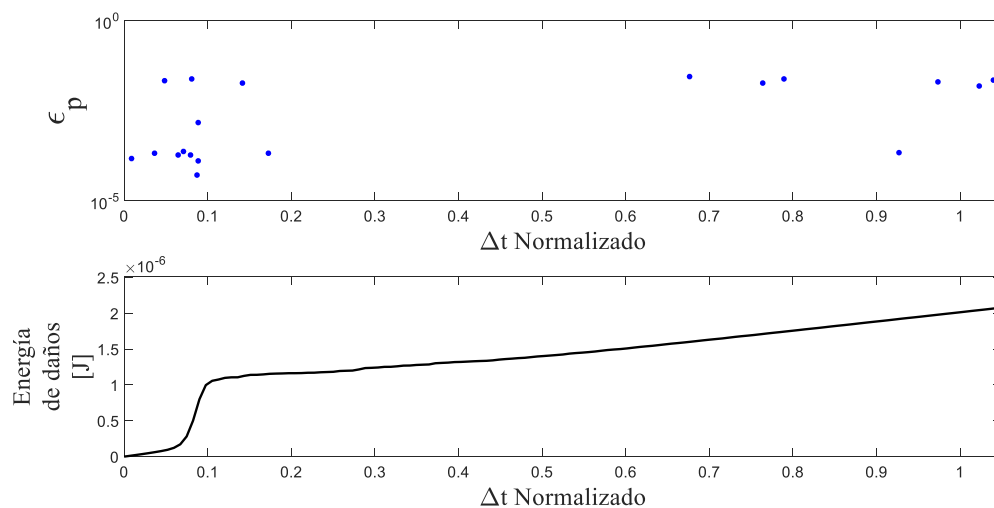


f) Daños en el MED.

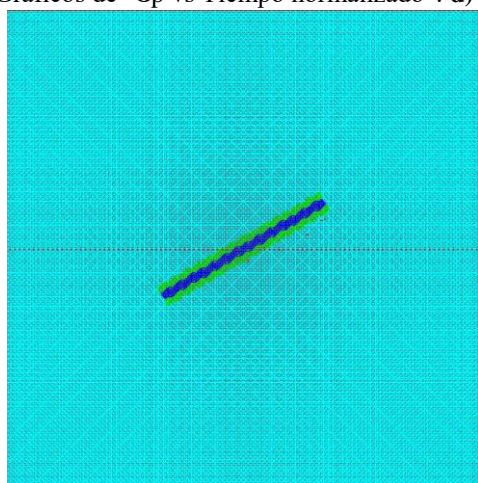
Figura 51. Gráficos de resultados del *Evento 10* de $\theta = 60^\circ$.



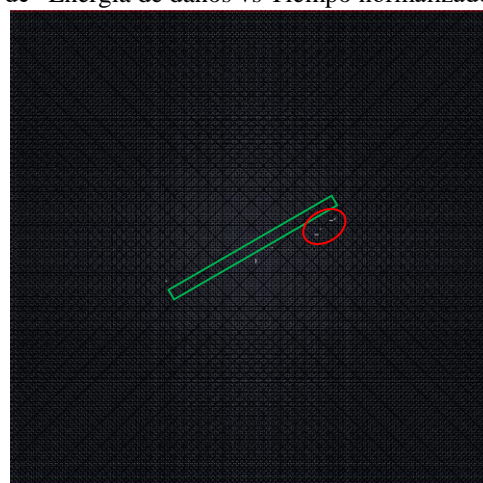
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

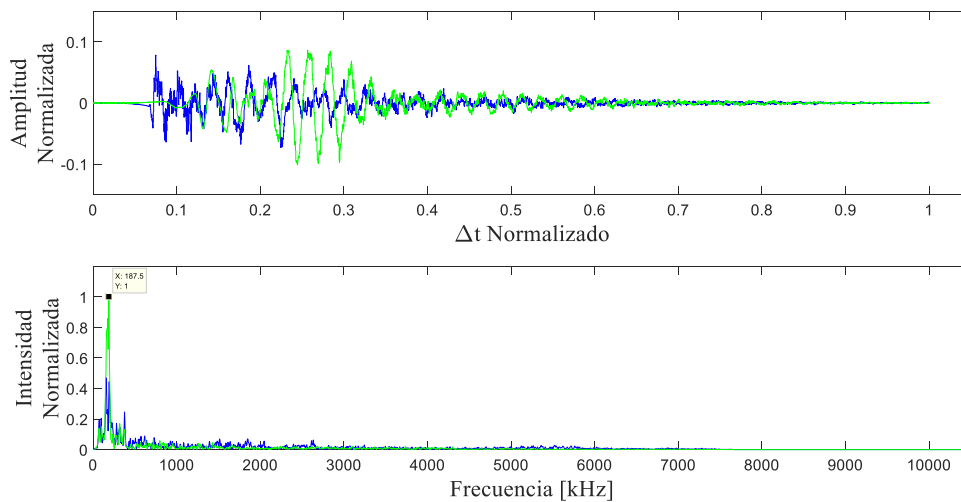


e) Discretización en el MED.

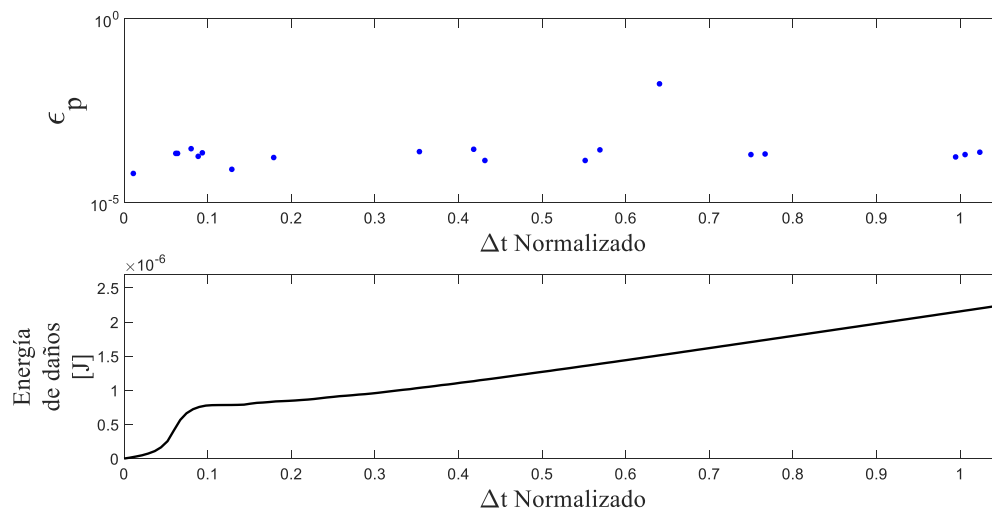


f) Daños en el MED.

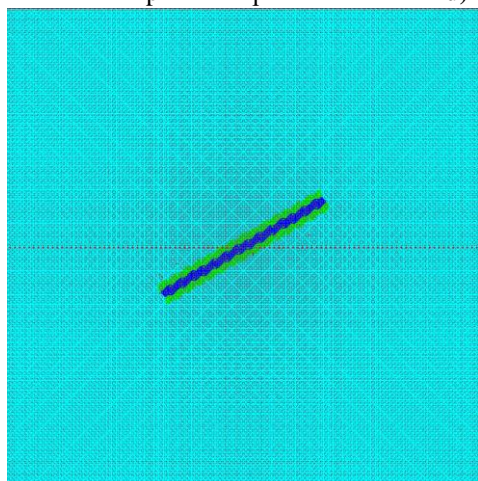
Figura 52. Gráficos de resultados del *Evento 2* de $\theta = 30^\circ$.



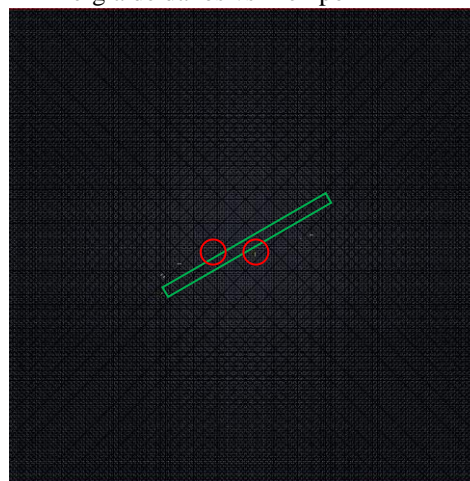
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizados”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

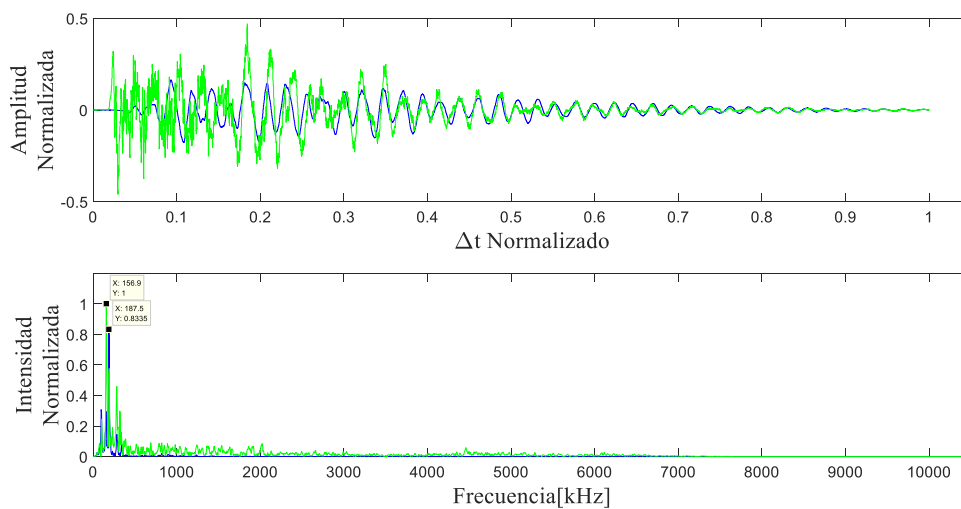


e) Discretización en el MED.

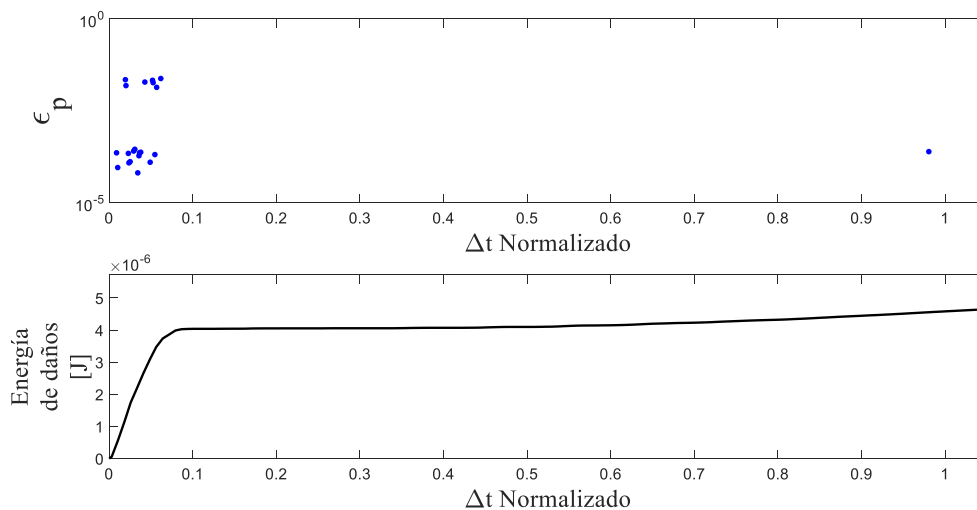


f) Daños en el MED.

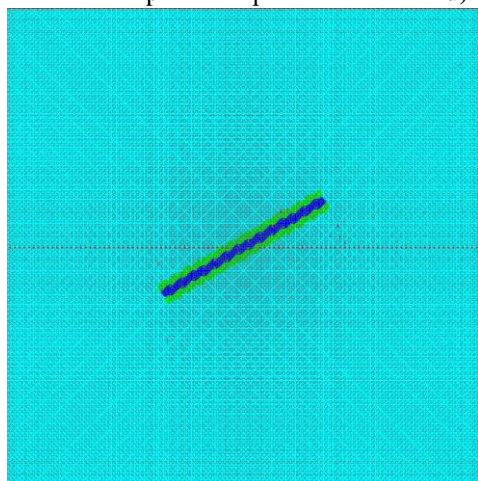
Figura 53. Gráficos de resultados del *Evento 3* de $\theta = 30^\circ$.



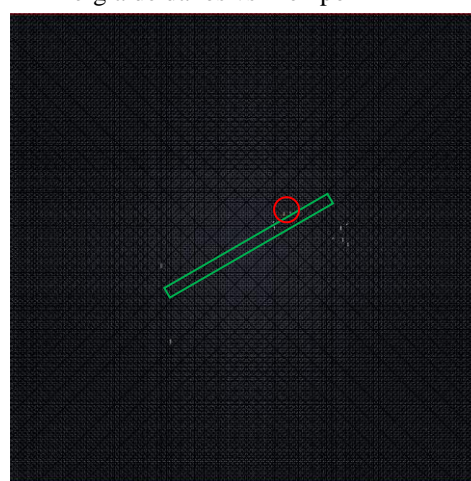
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizados”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

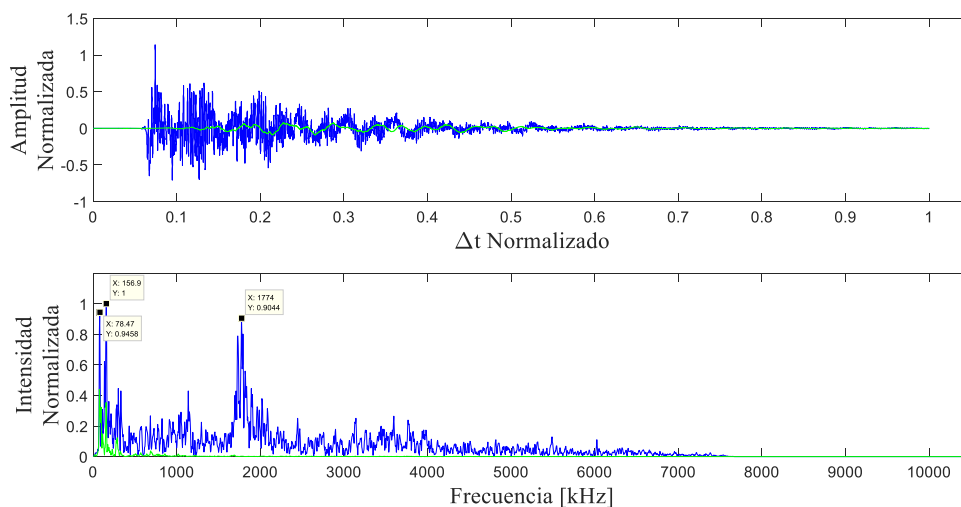


e) Discretización en el MED.

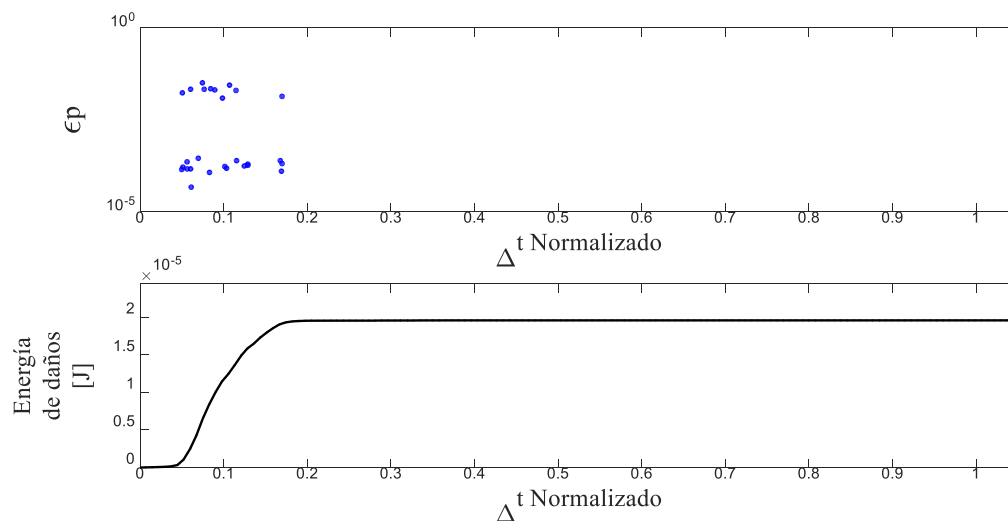


f) Daños en el MED.

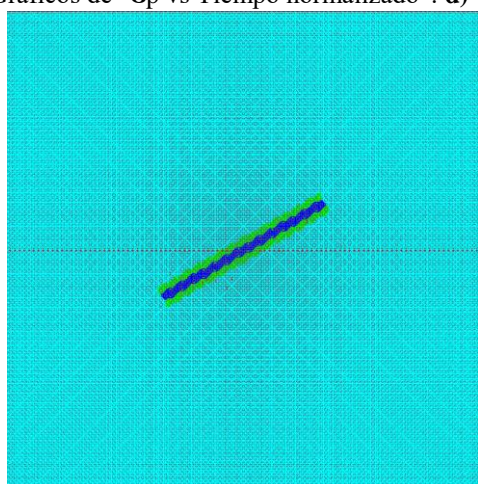
Figura 54. Gráficos de resultados del *Evento 7* de $\theta = 30^\circ$.



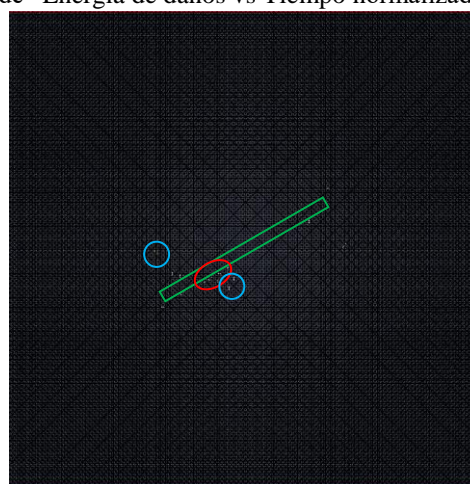
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

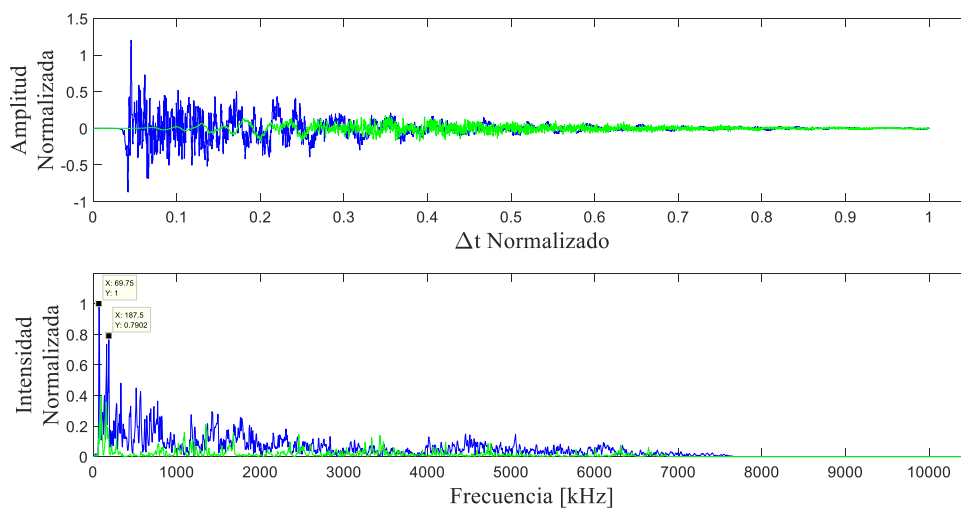


e) Discretización en el MED.

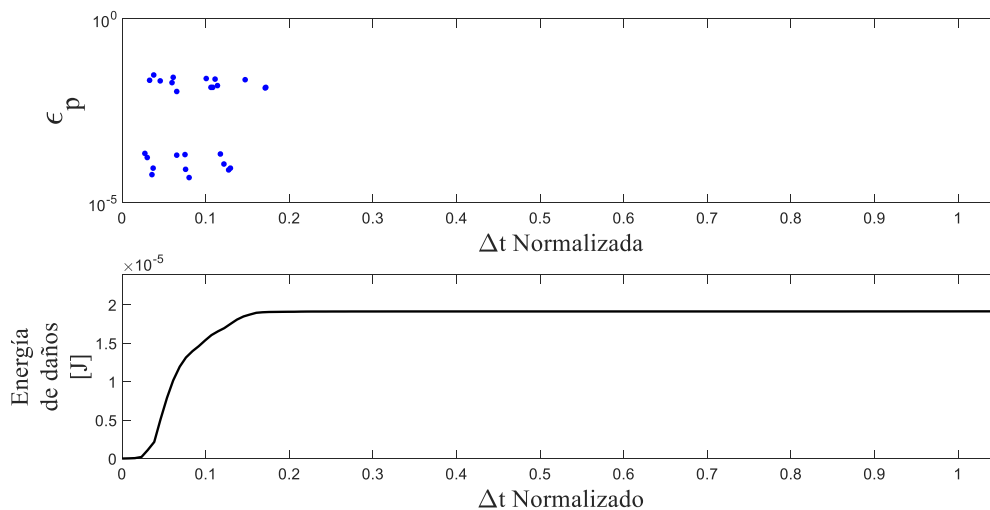


f) Daños en el MED.

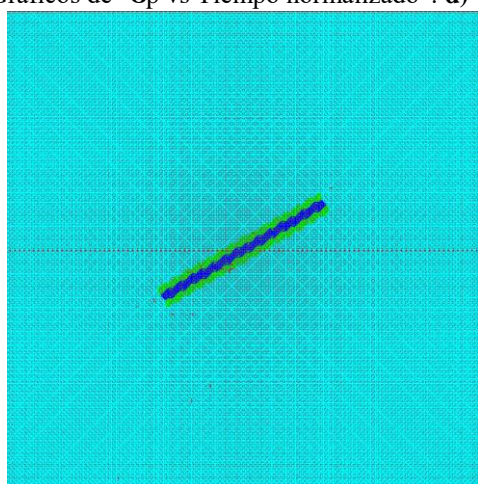
Figura 55. Gráficos de resultados del *Evento 12* de $\theta = 30^\circ$.



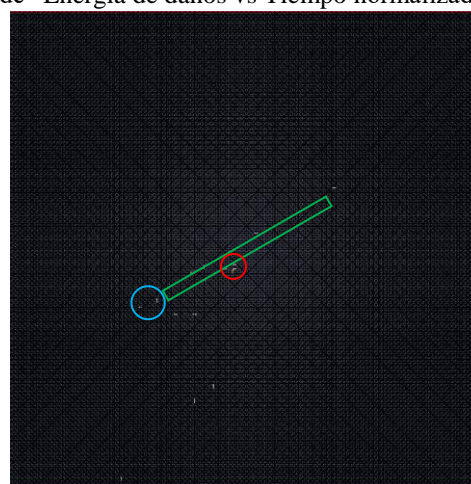
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizados”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.

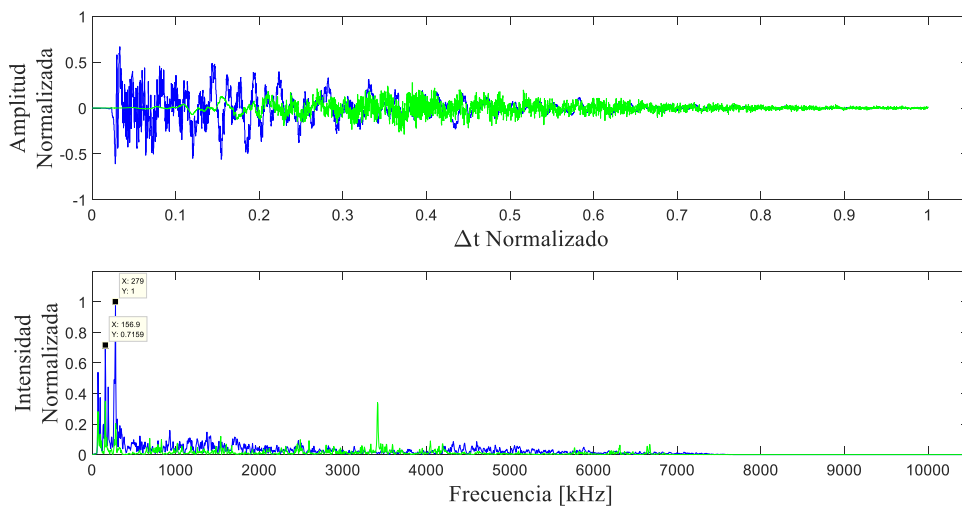


e) Discretización en el MED.

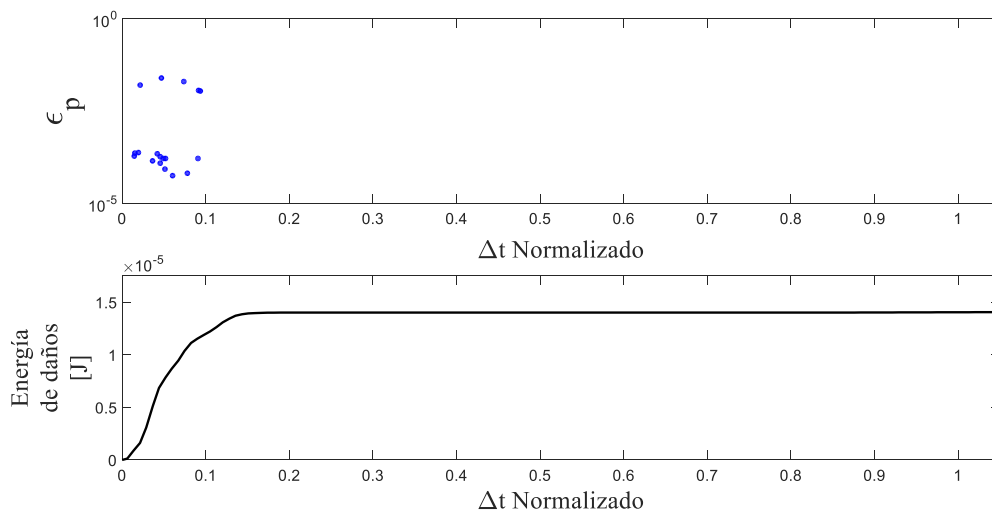


f) Daños en el MED.

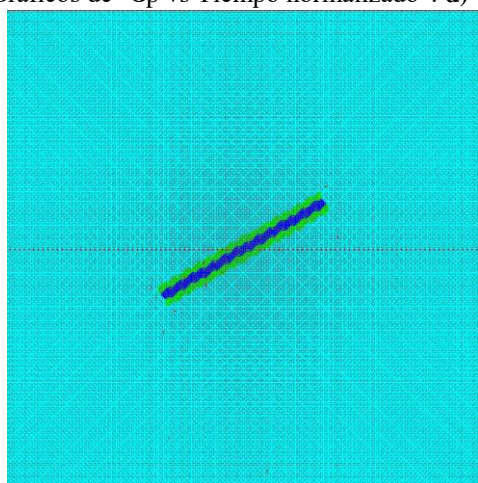
Figura 56. Gráficos de resultados del *Evento 14* de $\theta = 30^\circ$.



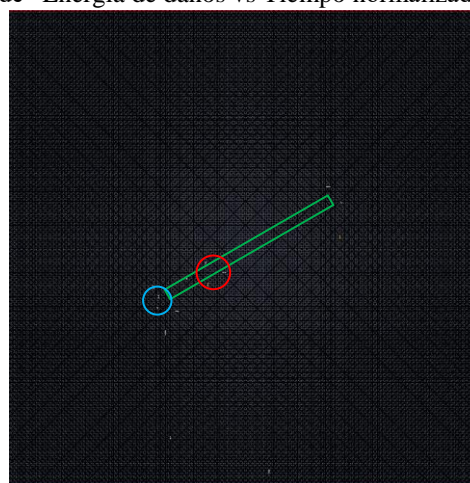
a) Gráfico de “Amplitud vs Tiempo normalizados”. b) Gráfico de “Intensidad normalizada vs Frecuencia”.



c) Gráficos de “ ϵ_p vs Tiempo normalizado”. d) Gráfico de “Energía de daños vs Tiempo normalizados”.



e) Discretización en el MED.



f) Daños en el MED.

Figura 57. Gráficos de resultados del *Evento 15* de $\theta = 30^\circ$.

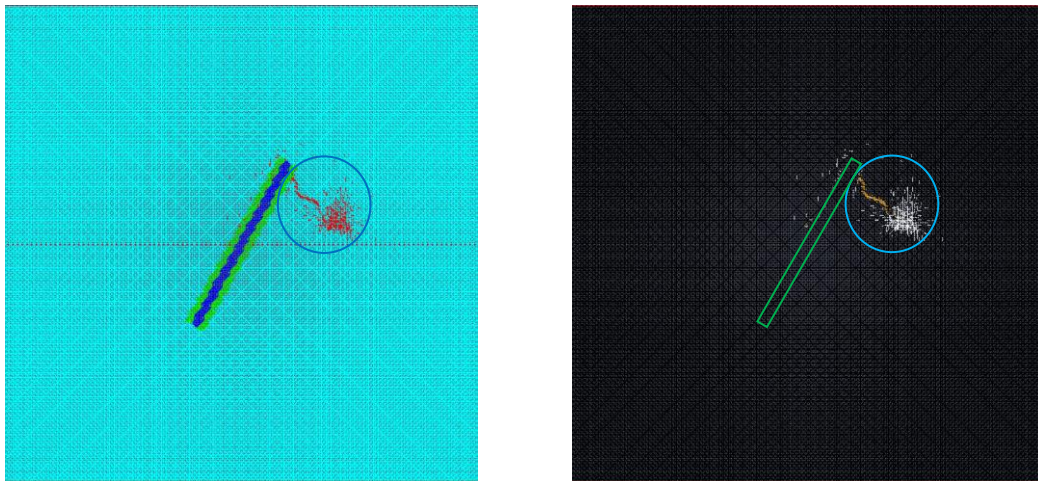
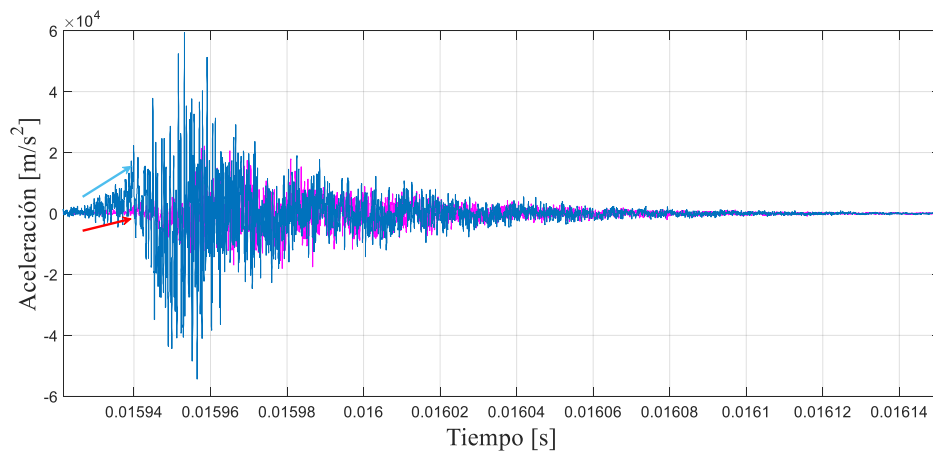


Figura 61. Técnica del primer movimiento del Evento 3 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de tracción (Modo I).

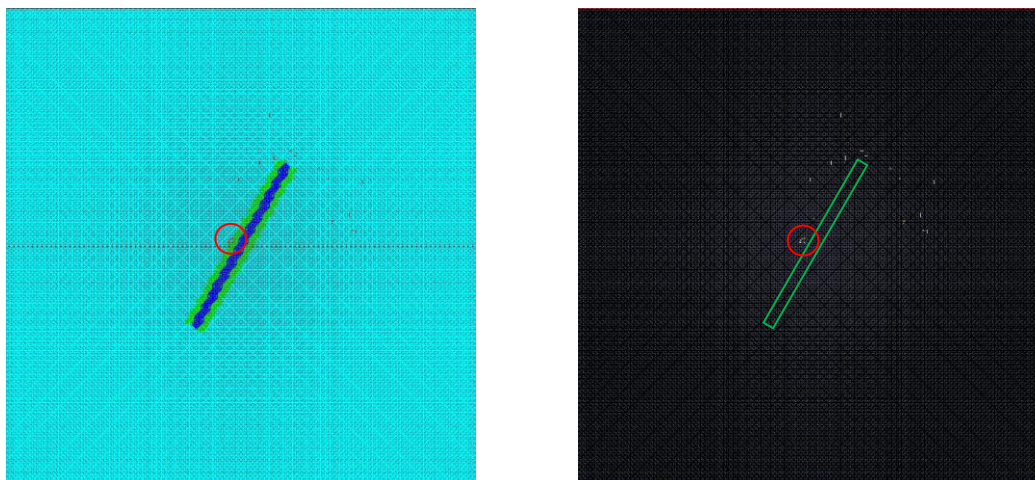
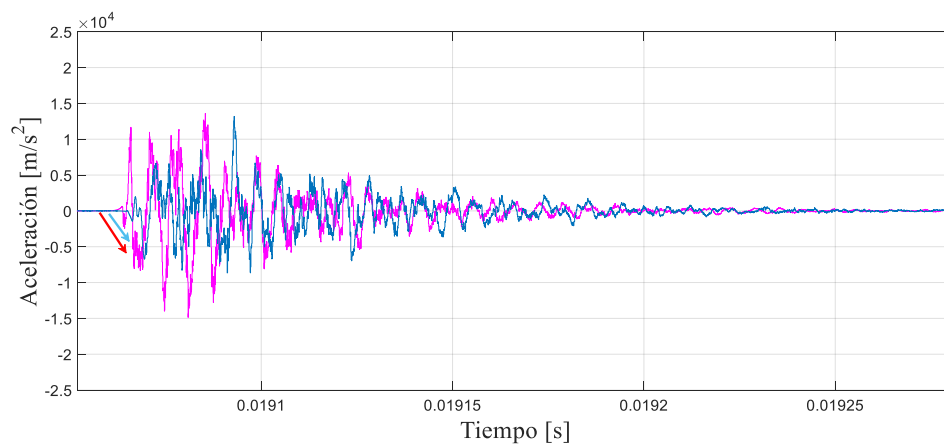


Figura 62. Técnica del primer movimiento del Evento 5 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de tracción (Modo I).

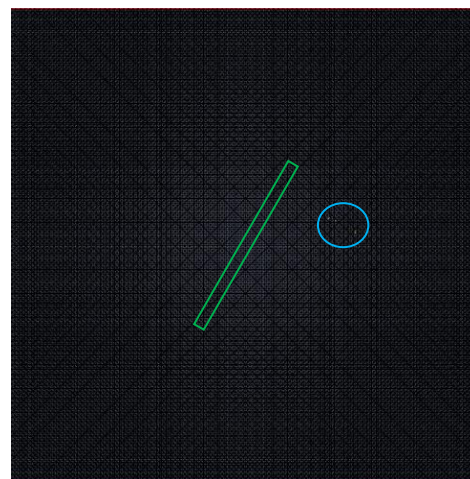
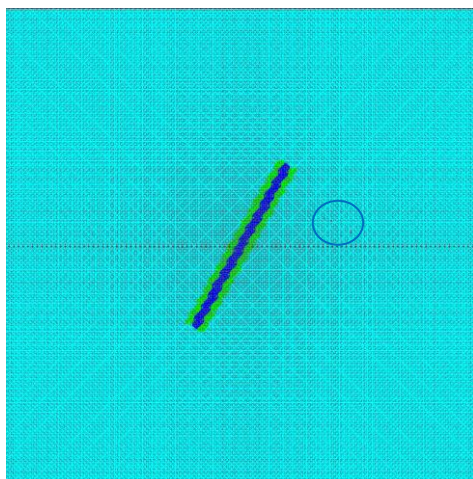
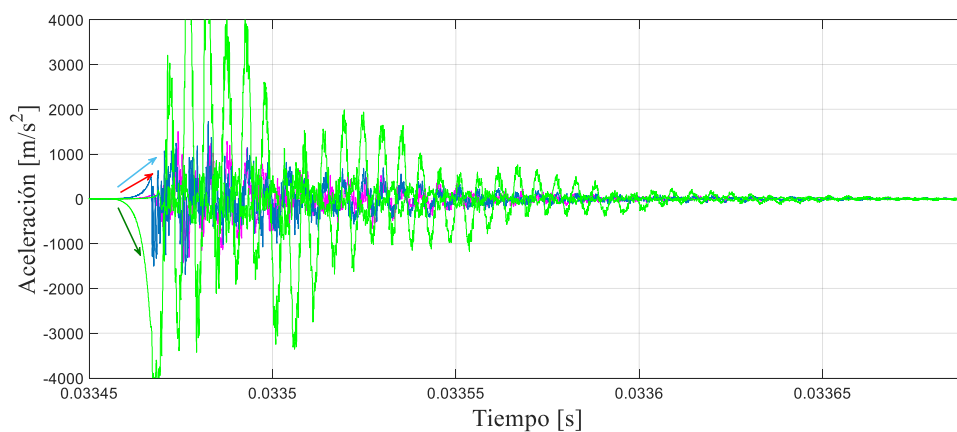
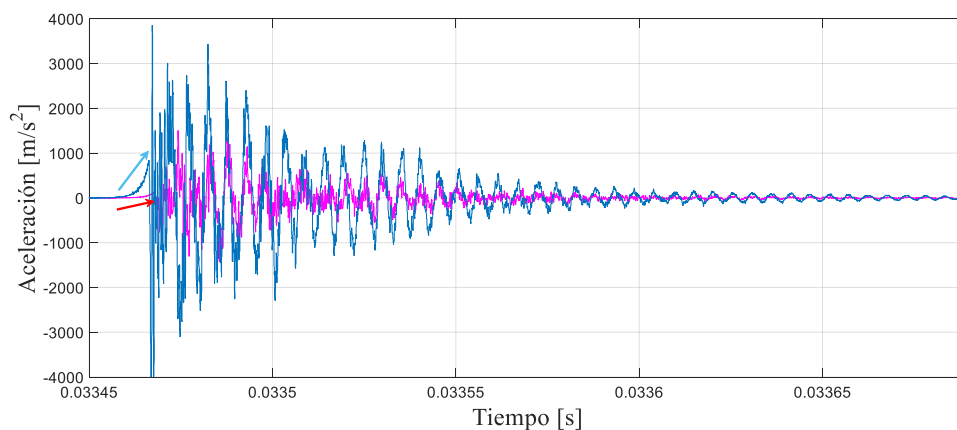


Figura 63. Técnica del primer movimiento del Evento 9 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de corte (Modo II).

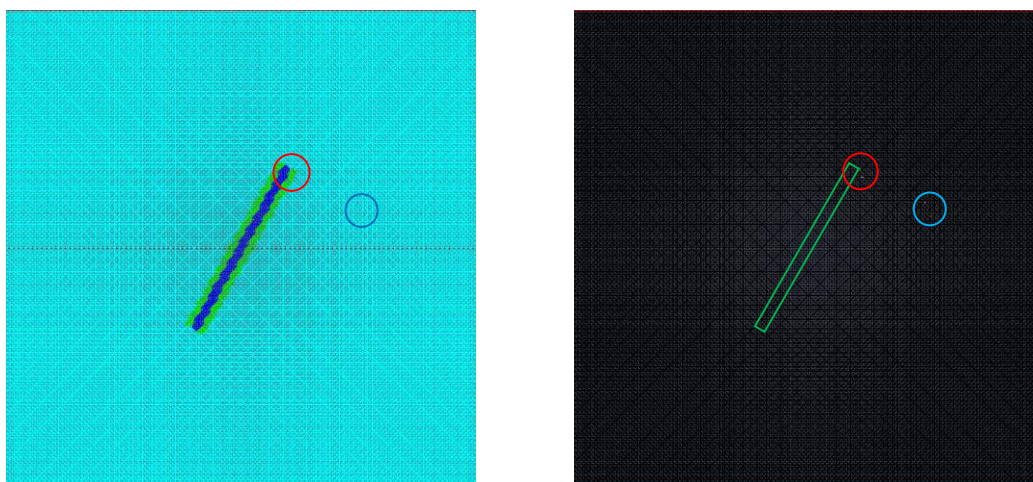
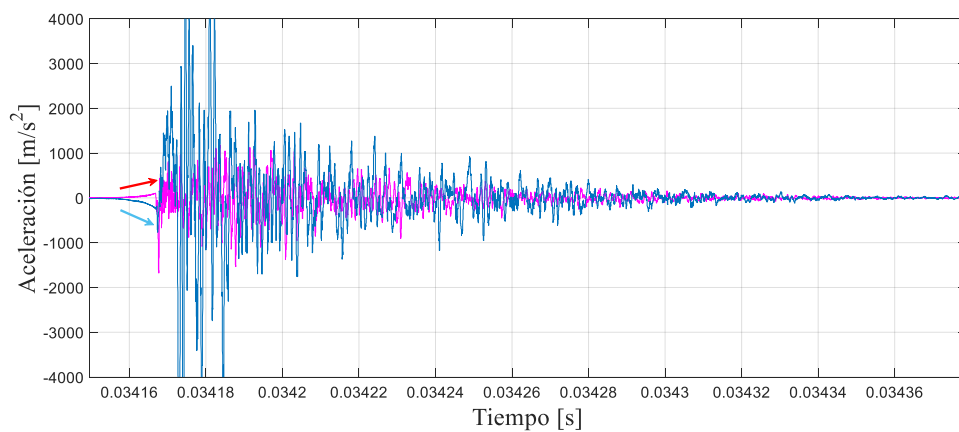


Figura 64. Técnica del primer movimiento del Evento 10 de $\theta = 60^\circ$, fractura por esfuerzo de corte (Modo II).