

Trabajo fin de grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Análisis de ensayos DCB mediante diferentes
técnicas de modelado

Autor: Manuel Cepero Mejías

Tutor: Luis Arístides Távara Mendoza

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras Grupo de Elasticidad y
Resistencia de Materiales Escuela Técnica**

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de ensayos DCB mediante diferentes técnicas de modelado

Autor:

Manuel Cepero Mejías

Tutor:

Luis Arístides Távara Mendoza

Profesor contratado doctor

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo fin de grado: Análisis de ensayos DCB mediante diferentes técnicas de modelado

Autor: Manuel Cepero Mejías

Tutor: Luís Arístides Távara Mendoza

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Dedico estas breves líneas a todas las personas que me han ayudado durante la elaboración de este trabajo.

A Luis por su atención y dedicación en este tiempo.

A mis padres por su apoyo incondicional y ayuda en los momentos más difíciles.

A Raquel por siempre estar a mi lado.

A mis compañeros por acompañarme en este duro camino.

En especial agradecer a mi hermano siempre estar dispuesto y con ganas de transmitirme todo su conocimiento. Fernando, sin ti no habría sido posible.

En el presente trabajo se realiza un análisis numérico de un típico ensayo usado para estudiar delaminaciones conocido como ensayo de doble viga en voladizo (DCB por sus siglas en inglés), mediante diferentes métodos (VCCT, XFEM, elementos cohesivos) usando el código comercial de elementos finitos Abaqus/CAE. Los resultados obtenidos son validados mediante los resultados experimentales consultados en la literatura.

La estructura del documento se basa en capítulos, dedicándose el capítulo dos a los materiales compuestos en general. En este capítulo se abordará una definición de material compuesto junto con sus aplicaciones en la actualidad y una breve clasificación de estos materiales. También se entrará a definir un poco más en detalle las propiedades mecánicas y de fractura del material compuesto simulado en este trabajo.

En el capítulo tres se procede a desglosar la metodología seguida en los artículos consultados, de los cuales se obtienen los resultados experimentales que se pasarán a validar posteriormente.

Una vez definido todo lo anterior, en el capítulo cuatro se podrán ver los diferentes métodos que se van a utilizar para las simulaciones, explicándose tanto el modelo teórico del método como su implementación en el software.

Para concluir se mostrarán los resultados obtenidos en el capítulo cinco y se hará una valoración de los mismos finalizando con unas líneas a modo de conclusión que compondrán el capítulo seis.

La novedad del presente trabajo reside en que a pesar de que los métodos numéricos empleados en el mismo han sido ampliamente estudiados, no existe un gran número de investigaciones comparando la eficacia de dichos métodos en la resolución de un problema real. Con la información obtenida de esta investigación se podrán extraer en un futuro interesantes conclusiones para el modelado de problemas más complejos.

Abstract

In this project a numerical analysis of a typical tests used to study delaminations, known as Double Cantilever Beam (DCB), is performed using various numerical approaches such as VCCT, XFEM or CZM, also using a commercial code like Abaqus/CAE which implement finite elements. The results are validated using the experimental results extracted from the literature.

The structure of the document is based on 6 chapters. The second chapter is about composite materials in general. In this chapter a definition of composite materials and a little classification of this materials are shown. Mechanical and fracture properties of the simulated composite material are collected in this section.

In the third chapter can be seen the methodology which follow the papers consulted. This information will be used to validate the numerical results comparing with the experimental results.

The diferent methods that will be used for the simulations are explained in the fourth chapter; the theoretical model and pre-processing tasks are dealt.

Subsequently, in the chapter five the numerical results are discussed. Finally, for the sake of conclusion final reflections about the work developed in this project are showcased in the sixth chapter.

This work is relatively novel due to there aren't a large number of investigations comparing the effectiveness of these methods with real problems. From the information obtained in this research, interesting conclusions might be employed in the future for the modelling of more sophisticated FE models.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Materiales compuestos	3
2.1. <i>Definición, clasificación y aplicación</i>	3
2.2. <i>Propiedades mecánicas</i>	4
2.3. <i>Delaminación</i>	5
2.4. <i>Uso de elementos finitos</i>	6
3 Datos de partida	9
4 Métodos de análisis numérico	13
4.1. <i>VCCT</i>	13
4.1.1. Modelo teórico	13
4.1.2. Implementación en Abaqus	15
4.2. <i>XFEM</i>	18
4.2.1. Modelo teórico	18
4.2.2. Implementación en Abaqus	20
4.3. <i>Elementos cohesivos</i>	22
4.3.1. Modelo teórico	22
4.3.2. Implementación en Abaqus	23
5 Resultados	27
5.1. <i>VCCT</i>	27
5.2. <i>XFEM</i>	30
5.3. <i>Elementos cohesivos</i>	33
6 Conclusión y valoración de resultados	37
Referencias	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Parámetros de configuración de diferentes ensayos. Información obtenida de [4,5]	10
Tabla 3-2: Propiedades del material AS4/PEEK. Información obtenida de [4,5]	10
Tabla 5-1: Avance de grieta usando una malla con tamaño de elemento 0,3 mm y VCCT.	29
Tabla 5-2: Avance de grieta usando una malla con tamaño de elemento 0,3 mm y XFEM.	32
Tabla 5-3: Avance de grieta usando una malla con tamaño de elemento 0,4 mm y CZM.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2-1 Modos de carga [21]	5
Ilustración 2-2 Esquema del ensayo DCB	6
Ilustración 2-3 Método de Newton-Raphson	7
Ilustración 3-1 Test MMB [5]	9
Ilustración 3-2 Condiciones de contorno test MMB	9
Ilustración 3-3 Desplazamiento mostrado en la gráfica de resultados	11
Ilustración 4-1 Representación gráfica del método VCCT	14
Ilustración 4-2 Unión de nodos de láminas formadas	15
Ilustración 4-3 Cuadro de propiedades de Abaqus VCCT	16
Ilustración 4-4 Orientación del material VCCT	16
Ilustración 4-5 Propiedades de la interacción VCCT	17
Ilustración 4-6 Condiciones de contorno utilizadas para la simulación. A la izquierda una representación esquemática y a la derecha la implementación en Abaqus	18
Ilustración 4-7 Nodos enriquecidos [11]	19
Ilustración 4-8 Probeta en XFEM	20
Ilustración 4-9 Propiedades de resina en XFEM	21
Ilustración 4-10 Malla usada en XFEM	21
Ilustración 4-11 Evolución de tensiones normales respecto, (a) evolución de la grieta, (b) deformación. [17]	22
Ilustración 4-12 Probeta con elementos cohesivos	23
Ilustración 4-13 Propiedades de resina en elementos cohesivos	24
Ilustración 4-14 Malla usada en elementos cohesivos	24
Ilustración 4-15 Opción del cuadro de ejecutables donde llevar a cabo la realización de la nueva malla	25
Ilustración 4-16 Propiedades de la malla de la interfase laminar en elementos cohesivos	25
Ilustración 5-1: Resultados obtenidos ensayo DCB usando VCCT para diferentes mallas	27

Ilustración 5-2: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando VCCT y malla de 0,3 mm	28
Ilustración 5-3: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando VCCT	29
Ilustración 5-4: Resultados obtenidos ensayo DCB usando XFEM para diferentes mallas	30
Ilustración 5-5: Parámetros de convergencia en XFEM	31
Ilustración 5-6: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando XFEM y malla de 0,3 mm	31
Ilustración 5-7: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando XFEM	32
Ilustración 5-8: Resultados obtenidos ensayo DCB usando CZM para diferentes mallas	33
Ilustración 5-9: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM, SDEG y malla de 0,3 mm	34
Ilustración 5-10: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM y SDEG	34
Ilustración 5-11: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM, S22 y malla de 0,3 mm	35
Ilustración 5-12: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM y S22	35

VCCT	Virtual crack closure technique
XFEM	eXtend Finite Elements Method
CZM	Cohesive zone method
G_{ij}	Módulo de cizalladura en la dirección ij
E_{ij}	Módulo de Young en la dirección ij
V	Fracción volumétrica
ν_{ij}	Coficiente de Poisson en la dirección ij
DCB	Double cantilever beam
ENF	End-notched flexure
MMB	Mixed mode bending
σ_{ii}	Tensión normal en la dirección i
τ_{ij}	Tensión en la dirección ij
ϵ_{ii}	Deformación normal en la dirección i
γ_{ij}	Deformación en la dirección ij
K	Factor intensidad de tensiones
Y	Constante geométrica
a	Longitud de la grieta
R	Error residual
P_c	Carga aplicada en el centro de la probeta
P_e	Carga aplicada en el extremo de la probeta
G	Tasa de liberación de energía

1 INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos reforzados con fibras son una clase de material compuesto, en los cuales una matriz, usualmente hecha de materiales poliméricos, esta reforzada con fibras orientadas en una dirección preferente para conseguir unas propiedades excelentes en relación resistencia-peso, resistencia a fatiga, resistencia a la corrosión [1]. Estas características son fundamentales para industrias donde la reducción de peso es vital como podría ser la aeronáutica.

Los defectos y daños en estos materiales incurren en la pérdida de sus propiedades mecánicas pudiendo producir serios daños en la integridad estructural de la pieza. Desafortunadamente, la predicción de los distintos daños en este material se hace una labor compleja y costosa debido a la heterogeneidad característica que se observa en estos materiales. Varios tipos de daños se pueden desarrollar en la fibra, matriz o interfase fibra/matriz cuyas causas deben ser estudiadas en detalle.

Un fallo característico en este tipo de materiales es la delaminación, que consiste en la aparición de grietas en las regiones de unión de las fibras de las distintas láminas que componen el laminado. El comportamiento mecánico en estas zonas esta mayormente gobernado por la matriz, creando una zona propicia para la nucleación y posterior propagación de grietas que debe ser tenida en cuenta en la fase de diseño. En la actualidad este tipo de materiales se utiliza cada vez más por ello es necesario comprender correctamente los efectos de la delaminación.

Los materiales compuestos tienen un gran inconveniente, su coste de fabricación, por tanto las pruebas sobre estos se hacen muy costosas. Para detectar grietas y efectos de la delaminación se requieren ensayos no destructivos, los cuales deben ser realizados por personal certificado y por aparatos complejos y caros.

En este contexto toma importancia el estudio de la propagación de grietas mediante software comerciales que implementen el método de los elementos finitos. La simulación de este tipo de daño no es trivial, ya que hay que hacer frente los problemas numéricos que conlleva la introducción de comportamientos no lineales y discontinuidades asociadas al crecimiento de la grieta.

En el presente trabajo se pretende hacer frente a estos problemas y simular de la manera más fiel a la realidad posible estos fenómenos en ensayos DCB (Double cantilever beam). El software elegido para llevar a cabo las simulaciones será Abaqus/CAE, por la versatilidad de métodos que permite y su cada vez más frecuente uso en el entorno comercial. Por último destacar que los métodos utilizados serán VCCT (Virtual crack closure

technique), XFEM (eXtend Finite Elements Method) y elementos cohesivos.

2 MATERIALES COMPUESTOS

Una simple definición de material compuesto podría ser que son la unión de dos o más materiales para poder tener propiedades que ninguno de los materiales que participan en la mezcla tienen por separado. Sin embargo, en este documento se aborda el estudio de los materiales compuestos de fibra con base polimérica.

En primer lugar, se debe saber que son un tipo de material que está en pleno desarrollo, los cuales tienen grandes propiedades pero son muy costosos debido a factores varios como puede ser la dificultad en su fabricación. Aún así su estudio es muy conveniente debido a las propiedades tan beneficiosas que pueden llegar a obtener.

Por esto, en este capítulo se profundizará un poco en el tema pudiendo verse una definición más precisa de material compuesto, clasificación y aplicaciones, además de lo más interesante desde el punto de vista técnico para este proyecto, las propiedades mecánicas y delaminación del composite.

2.1 Definición, clasificación y aplicación de los materiales compuestos

Según la bibliografía consultada [2] este tipo de material se define como la combinación de mínimo dos materiales entre los cuales existe una interfase de separación para formar un material nuevo. Como resultado de la combinación ambos de ellos consiguen propiedades que ninguno de ellos por separados tiene.

Existen diferentes maneras de clasificar estos materiales, sin embargo se seguirá de nuevo la manera de clasificarlos que se observa en [2].

La primera gran diferenciación ocurre entre los materiales compuestos es que pueden estar reforzados por fibras o por partículas. En el caso de los materiales reforzados por fibras una de sus dimensiones es mucho mayor que las otras dos dimensiones.

Con respecto a las propiedades que ofrecen cada uno de estos tipos de refuerzo, se puede observar que en el caso de los primeros ofrece un mayor interés desde el punto de vista de la mejora de propiedades mecánicas. Las fibras son capaces de absorber la carga soportada, mientras que la matriz tiene una función adherente de las fibras durante la puesta en servicio de las piezas.

En el caso de los materiales compuestos reforzados con partículas son usados esencialmente para mejorar conductividades térmicas y eléctricas, dureza o maquinabilidad. Por el contrario este tipo de materiales no

tiende a absorber gran parte de la carga lo que provoca que el material conformado por la matriz no solo no mejore su resistencia, sino que a veces llegue a disminuirla como resultado de la concentración de tensiones ocasionadas en el entorno de las partículas [3].

Las principales aplicaciones de estos materiales vienen de la mano del sector aeronáutico dado que consigue reducir el peso al 20% del peso con respecto a las tradicionales aleaciones del aluminio. Dentro de este sector hay aviones de todo tipo, desde el A-320 o el B-737, ambos los modelos estrellas de sus fabricantes, solo tienen un 10% en peso de materiales compuestos. Sin embargo en la actualidad aviones como el A-350 o el B-787 cuentan ya con más del 50% en peso de su total de este tipo de material.

La razón por la que los dos primeros modelos citados tengan tan bajo porcentaje de material compuesto incorporado es el año que entraron en servicio, a finales de los 80, cuando todavía no estaba tan desarrollado los materiales compuestos.

2.2 Propiedades mecánicas

Los materiales compuestos pueden llegar a tener varios planos de simetría, lo cual puede afectar a sus propiedades. Un tipo de material compuesto muy común para componentes estructurales son los materiales transversalmente isotrópicos, los cuales tienen unas propiedades mecánicas simétricas con respecto al eje normal a un plano de isotropía [20].

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix}$$

Donde E_{ii} es el módulo de la elasticidad en la dirección i , ν el coeficiente de Poisson y G_{ij} se corresponde con el módulo de cizalladura del plano ij . Los módulos E_{11} y E_{22} pueden obtenerse por varias vías, bien experimentalmente o haciendo uso de las ecuaciones regla de las mezclas para composites:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

Siendo E_f , E_m , V_f y V_m los módulos y las fracciones volumétricas de la fibra y matriz respectivamente.

2.3 Delaminación

Uno de los defectos más comunes en materiales compuestos es la delaminación. Este fenómeno ocurre debido a la separación de láminas. La baja resistencia a través del espesor de estos hace que la región interlaminar sea la más probable para que ocurra la propagación de grieta y aparezcan defectos, por ello la delaminación es uno de los defectos más comunes en este tipo de material.

En referencia a los tipos de delaminación, se pueden observar dos, interno y cercano a la superficie. En los dos casos de la delaminación ocurren dentro del material, sin embargo como su propio nombre indica la cercana a la superficie esta muy próxima a esta y en el caso de la interna ocurre lejos de la superficie (mitad del laminado). Debido a que la principal responsable de la degradación de las capacidades de carga de un material compuesto es la delaminación interna, este trabajo se centra en esta a la hora de modelar los ensayos.

La formación de grietas por delaminación puede ser debido a una multitud de causas como por ejemplo daños por impactos o defectos en la fabricación. Sin embargo en este documento se puede ver el estudio de grietas ya existentes bajo una determinada carga.

Para la aplicación de esta carga existen varias formas de hacerlo. Pueden ser cargas de tracción/compresión, las cuales corresponden al modo *I*, cargas de cizalladura en el plano, modo *II*, o cargas de cizalladura fuera del plano, modo *III*. Cualquier tipo de carga que se aplique puede ser descompuesta en combinaciones de estos tres tipos.

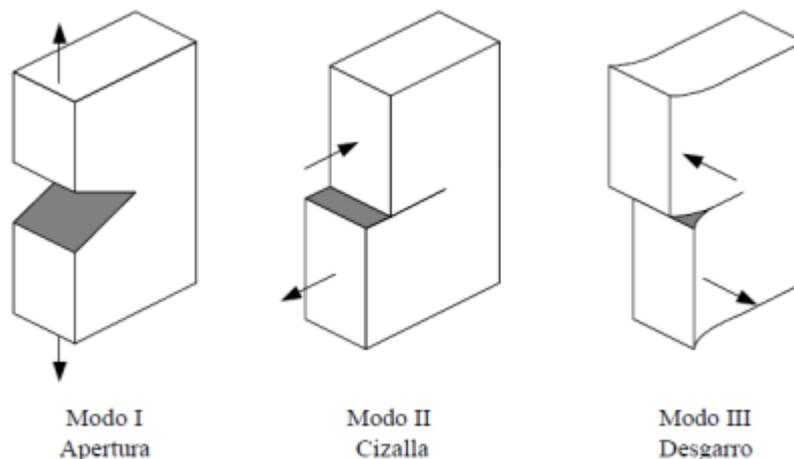


Ilustración 2-1: Modos de carga [21].

Existen diferentes ensayos para simular estos tipos de cargas. El ensayo DCB (Doble cantilever beam) es el tipo de ensayo más utilizado para medir la tenacidad a la fractura en el modo *I*. Al tratarse de un laminado, consiste de una prueba de doble viga en voladizo. Para medir la tenacidad a la fractura del modo *II* se usa el ensayo ENF (End-notched flexure) el cual es un ensayo de flexión puro. También existe el ensayo de modo mixto de fractura MMB (Mixed mode bending) el cual es una mezcla de los dos anteriores. Este trabajo se enfoca en el estudio de la fractura del modo *I*, por tanto solo se simulará el ensayo DCB.

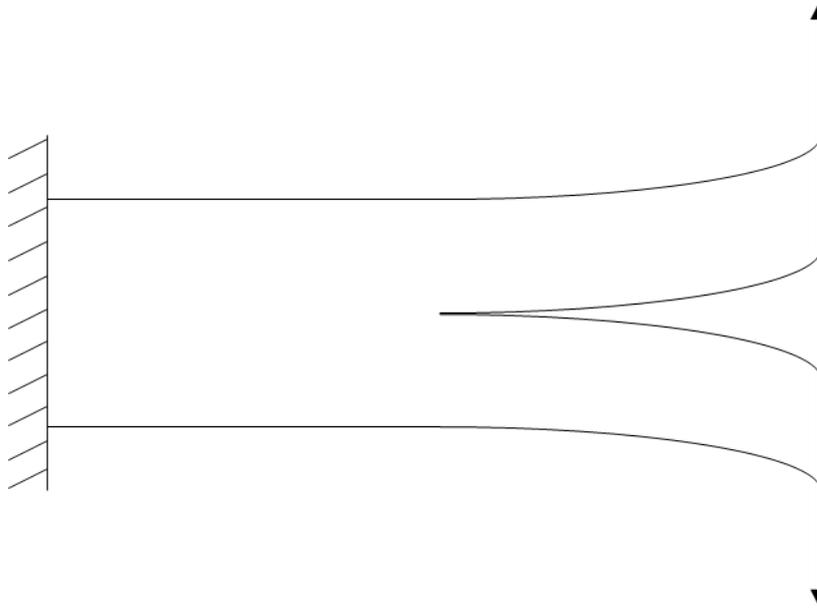


Ilustración 2-2: Esquema del ensayo DCB.

2.4 Uso de elementos finitos

La propagación de grietas depende del factor de intensidad de tensiones K , que puede calcularse como se muestra a continuación:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Siendo Y una constante que depende de la geometría, a es la longitud de la grieta y σ es la carga nominal aplicada. Sin embargo la relación entre el tamaño de grieta y la tensión necesaria para su propagación es no lineal, lo que hace muy complejo su estudio.

El método de los elementos finitos se basa en la desratización de un problema complejo en muchos problemas de simple solución. Al aplicar una fuerza externa, la discretización realizada por elementos finitos provoca que los nodos sufran fuerzas internas. Por tanto para garantizar el equilibrio en todo momento se debe cumplir:

$$F_{ext} = F_{int}$$

Por último reseñar que Abaqus utiliza el método de Newton-Raphson para resolver el problema no lineal lo que permite calcular la curva de fuerza respecto al desplazamiento. Este método es muy útil para la resolución de ecuaciones no lineales mediante la convergencia de la solución. En el caso de elementos finitos, el método funciona aplicando incrementos de tiempo. Dado que no es un método exacto se puede calcular el error residual de estas mediante la expresión:

$$R = F_{ext} - F_{int}$$

Donde R es el error residual. Se considera que la solución ha convergido si este error residual esta por debajo de una cota predefinida. La primera iteración se basa en una solución lineal considerando la rigidez inicial de la estructura K_0 . A partir de esa solución empiezan las iteraciones con el criterio del error residual antes mencionado, si no se cumple ese criterio se reduce el incremento de tiempo y la fuerza aplicada y se vuelve a llevar a cabo la iteración.

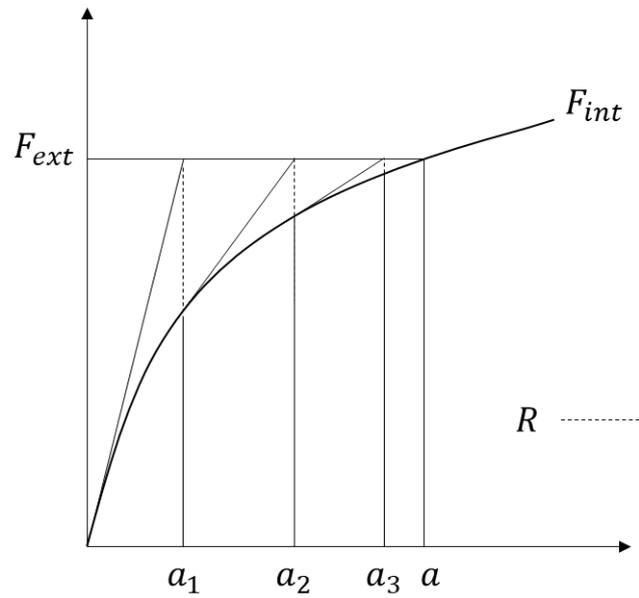


Ilustración 2-3: Método de Newton-Raphson.

3 DATOS DE PARTIDA

Esta sección describe brevemente la metodología seguida por Camanho et al. [4,5], los cuales han servido como referencia para la obtención de datos experimentales y de las condiciones del material que es usado en los ensayos. Se han realizado numerosas pruebas experimentales y computacionales en configuraciones de laminado unidireccional, en los artículos citados previamente se propone una prueba de delaminación del modo mixto, que es capaz de simular cualquier MMB entre los modos *I* y *II* ajustando solo la longitud de la palanca de carga y dejando el resto de parámetros estables.

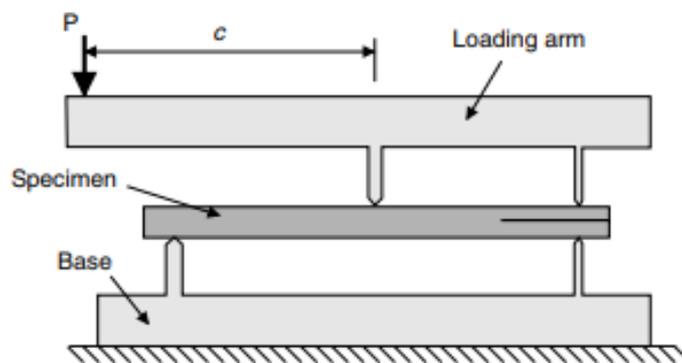


Ilustración 3-1: Test MMB [5].

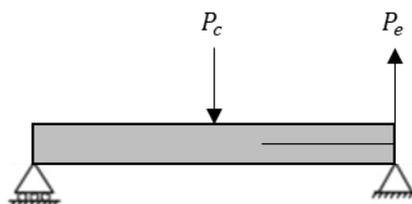


Ilustración 3-2: Condiciones de contorno test MMB

En la bibliografía consultada se hace referencia a tanto a DCB como a MMB y ENF, sin embargo este documento se centra en la validación de resultados en ensayos DCB. Solo se introducirá los conceptos de estos test y los datos obtenidos en los artículos mencionados para el resto de ensayos, quedando solo estudiados

diferentes métodos para ensayos DCB.

Turon y Camanho [5] se refirieron a los datos experimentales de Reeder y Crews [6] como validación de la exactitud de su modelo simulando los test lo más fielmente posible con las especificaciones dadas en la documentación de origen utilizando elementos cohesivos.

Una vez consultada la bibliografía, se toman los datos de la prueba de DCB, sabiendo que P_c y que P_e son las cargas aplicadas en el centro y en el extremo de la probeta respectivamente. Para DCB dada su naturaleza resulta obvio deducir que solo habrá carga en el extremo, sin embargo este análisis cobra importancia si se quisieran estudiar los ensayos MMB y ENF, siendo el 80% y el 100% del cociente $\frac{G_{II}}{G_T}$.

$\frac{G_{II}}{G_T}$	0% (DCB)	80% (MMB)	100% (ENF)
$a_0(mm)$	32,9	31,4	39,3
$G_c(\frac{Kj}{m^3})$	0,969	1,367	1,719
P_c	0	1,557P	P
P_e	P	0,558P	$\frac{P}{4}$

Tabla 3-1: Parámetros de configuración de diferentes ensayos.

Con el afán de obtener los resultados más precisos posibles, se pretende eliminar toda aquella variable que pueda influir en el mismo al realizar el ensayo de propagación de grietas. De esta forma el resultado que se obtendrá solo dependerá del método elegido para la simulación pudiendo sacarse conclusiones fiables.

Para conseguir esto se ha mantenido la geometría y las condiciones de contorno iguales para las tres simulaciones, además de utilizar las mismas propiedades del material. Se ha optado por elegir un material del tipo AS4 / PEEK, dado que en los artículos de referencia es el que se usa, pudiendo verse sus propiedades en la siguiente tabla [6].

E_{11} 122.7 GPa	$E_{22}=E_{33}$ 10.1 GPa	$G_{12}=G_{13}$ 5.5 GPa	G_{23} 3.7 GPa	$\nu_{12}=\nu_{13}$ 0.25	ν_{23} 0.45
G_I^C 0.969 N/mm	G_{II}^C 1.719 N/mm	G_{III}^C 1.719 N/mm	N 80 MPa	S_1 100 MPa	S_2 100 MPa

Tabla 3-2: Propiedades del material AS4/PEEK.

En el capítulo 5 se mostrarán los resultados mediante gráficas compuestas por fuerza en el eje de abscisas y desplazamiento en el eje de coordenadas. Este desplazamiento se refiere a la apertura del extremo donde la carga es aplicada, como se puede observar en la ilustración 3-3.

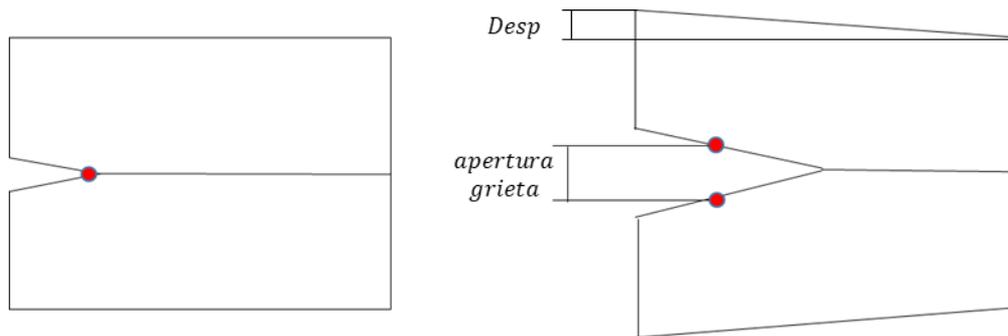


Ilustración 3-3: Desplazamiento mostrado en la gráfica de resultados.

A la hora de introducir datos en Abaqus y que el resultado sea el deseado se le aplicarán desplazamientos en lugar de cargas al espécimen. Así el software calcula la fuerza de reacción requerida en el apoyo para lograr el desplazamiento predefinido.

Cabe destacar que el espécimen será 3D en realidad, sin embargo se puede hacer una simplificación a 2D que reduce de forma notable el coste computacional y se obtendrán resultados muy precisos. Esta aproximación consiste en asumir la condición de deformación plana. Una vez obtenidas las cargas para el caso 2D, bastaría con multiplicar por su espesor, en este caso $25,4 \text{ mm}$, y ya se tienen los resultados para la muestra 3D.

Por ultimo reseñar que el espécimen consta de una altura de $3,12 \text{ mm}$, longitud de 102 mm y el espesor antes destacado.

4 MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO

Este documento se centra en la predicción de la propagación de grietas en probetas de materiales compuestos, haciendo un análisis de los diferentes resultados dependiendo del método utilizado, por eso es importante elegir un programa que permita estudiar el comportamiento de la manera más certera posible.

Para el análisis de la propagación de grietas en la delaminación de materiales compuestos se utilizará el conocido software numérico Abaqus/CAE, uno de los referentes del mercado en el análisis mediante elementos finitos. En él se encuentran implementados los métodos VCCT, XFEM y elementos cohesivos entre otros métodos de resolución numérica, siendo los tres primeros mencionados los que se usarán para la predicción de la propagación de grietas en la probeta ensayada.

Debido a la popularidad de Abaqus/CAE, es importante conocer la certeza de estos métodos, así como su funcionamiento. Por esto, en el presente trabajo se ofrece una descripción del modelo teórico así como de la implementación en Abaqus de los diferentes métodos seguidos.

4.1 VCCT

El método VCCT (Virtual crack closure technique) se basa en la mecánica de la fractura elástico lineal, principalmente en el principio de que la energía que se necesita para separar dos elementos a una distancia Δ_a es la misma que la necesaria para unirlos a su posición original.

Consta de algunas ventajas como que es un método simple y de buena precisión para la simulación. Aunque también tiene limitaciones debido a su simpleza ya que resulta complicado implementar el método para estructuras y cargas complejas.

4.1.1 Modelo teórico

Como anteriormente se ha indicado, VCCT adopta el criterio de la mecánica de la fractura elástico lineal, por lo que se supondrá un material puramente elástico. Además se asumirá que no habrá plasticidad en la punta de la grieta cuando esta esté sometida a tensiones.

La tasa de liberación de energía está calculada basándose en el criterio de Irwin [7], cuya fórmula se reduce a:

$$G = \frac{(1 - \nu^2) \cdot K_I^2}{E} + \frac{(1 - \nu^2) \cdot K_{II}^2}{E}$$

Siendo K_I y K_{II} factores de intensidad de tensión plana para cargas de modo I y de modo II antes descritas y E el módulo de Young o también denominado módulo de la elasticidad.

Rybicki y Kanninen [8] estudiaron el caso para aplicar este supuesto a elementos finitos, llegando a ecuaciones del tipo:

$$G_I = \lim_{\Delta_a \rightarrow 0} \frac{1}{2b\Delta_a} F_y(v_k - v_z)$$

$$G_{II} = \lim_{\Delta_a \rightarrow 0} \frac{1}{2b\Delta_a} F_x(u_k - u_z)$$

F_x y F_y corresponden a la fuerza necesaria tanto en el eje x como en el eje y para mantener los nodos p y q unidos, siendo b el espesor. Las distancias verticales y horizontales de los nodos están denotadas por las letras v y u respectivamente, determinando los subíndices a que nodo corresponde ese desplazamiento. Estas ecuaciones son válidas para elementos de 4 nodos, por ello Raju [9] descubrió la posibilidad de ampliar estos a 8 o incluso 12 nodos.

En este método, la mínima distancia de propagación de una grieta será siempre la longitud del elemento o la distancia entre nodos consecutivos, por lo que es fácil intuir que conforme la malla de la probeta sea más pequeña, más precisos serán los resultados obtenidos. Siempre es conveniente para el caso del análisis práctico determinar cuanta imprecisión se está dispuesto a asumir ya que con tamaños menores de malla aumenta la precisión al mismo tiempo que el tiempo computacional.

También basándose en las ecuaciones se puede observar que cuanto menor sea el tamaño del elemento más parecido será al valor de la tasa de deformación de energía, debido a que Δ_a tiende a 0. Teniendo en cuenta que G solo depende de la distancia entre el nodo de la punta de la grieta y el anterior a este.

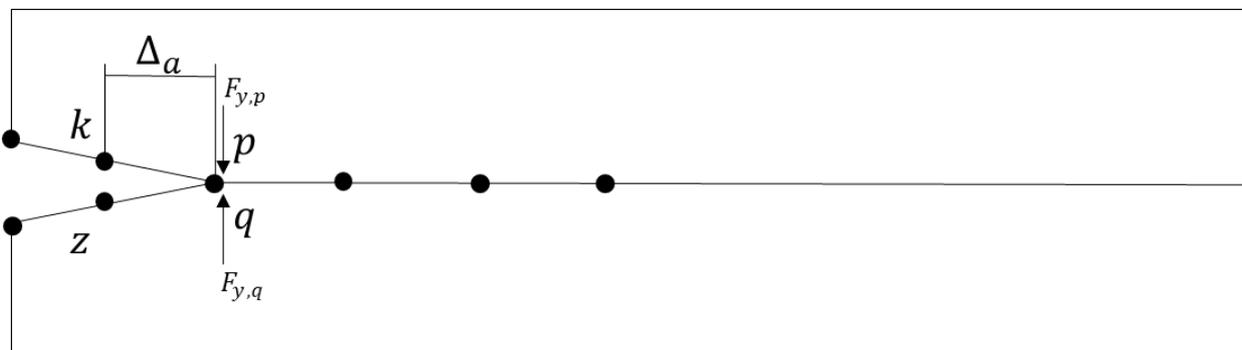


Ilustración 4-1: Representación gráfica del método VCCT.

4.1.2 Implementación en Abaqus

Este método necesita una dirección de grieta ya establecida al realizar el modelo ya que la misma se propagará de nodo en nodo siguiendo la dirección estipulada. Para ello se crea el modelo de la probeta ensayada en dos láminas diferentes, estando una sobre la otra, de las cuales los nodos de ambas tendrán coordenadas idénticas.

Una vez se ha creado las superficies de la probeta, se unen los nodos de la superficie superior con la inferior, dejando libres los correspondientes a la longitud de grieta deseada y quedando así esta preestablecida con una dirección definida.

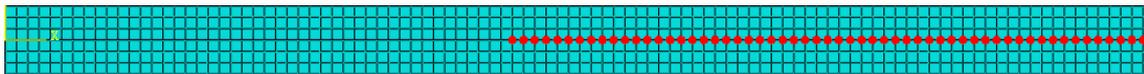


Ilustración 4-2: Unión de nodos de láminas formadas.

A su vez la propagación de la grieta ocurre acorde a algún criterio de fractura. Abaqus/CAE incorpora para este método un criterio de fractura elástico-lineal. Su elección se debe tanto a su simpleza como a su relación lineal entre el criterio de fractura f con las tasas de liberación de energía para los modos I y II .

$$f = \frac{G_I}{G_I^*} + \frac{G_{II}}{G_{II}^*}$$

Siendo G_I^* y G_{II}^* las tasas de liberación de energía críticas para los modos de fractura I y II . Si se estudia el caso en el cual solo afecte el modo I , se asume la tasa de liberación $G_{II} \cong 0$, separándose los nodos y por tanto propagándose la grieta cuando $f = 1$. A efectos prácticos la ecuación quedaría de la forma:

$$f = \frac{G_I}{G_I^*}$$

Para la implementación en Abaqus/CAE del modelo al cual se le va a aplicar el ensayo mediante VCCT se han seguido una serie de pasos determinados. En primer lugar como se comentó anteriormente se han creado dos láminas, una sobre otra, uniéndose posteriormente los nodos y dejando libres los necesarios para que la probeta tenga la longitud de grieta inicial deseada.

Ambas láminas deben de tener propiedades, por tanto es importante definir las adecuadamente. Para ello se le asigna tanto en la lámina superior como en la inferior propiedades elásticas del tipo lámina, ya definido en Abaqus/CAE. Para esto se ha creado un material que tiene las especificaciones comentadas y que además cumpla con los valores de E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} y G_{23} que se definieron en el capítulo anterior.

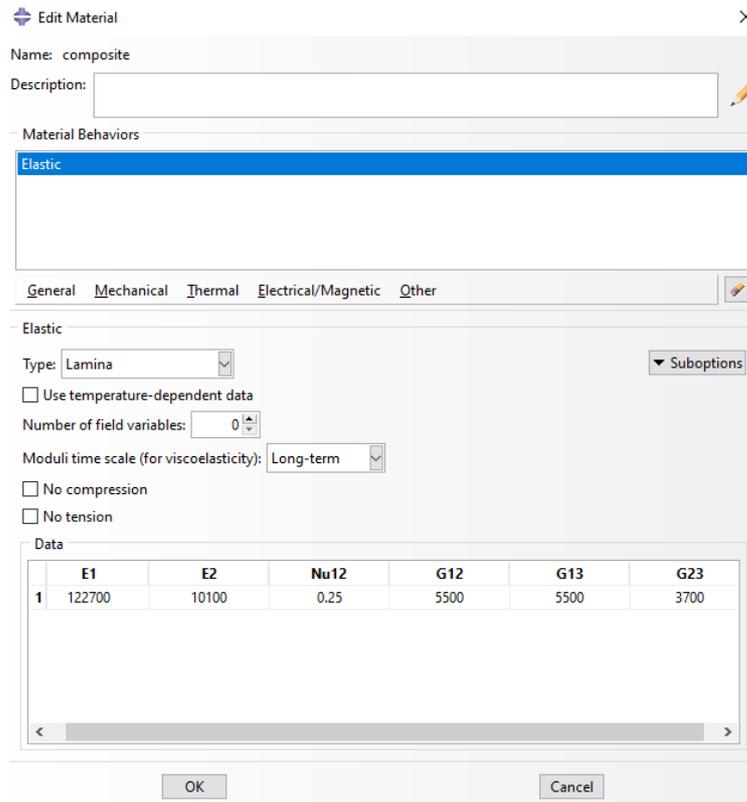


Ilustración 4-3: Cuadro de propiedades de Abaqus VCCT.

Además de las propiedades del material, se ha creado una sección con categoría de sólido y de tipo homogénea, creada para el material recién determinado. Una vez creada se ha asignado a cada una de las dos láminas esta sección y la orientación del material, que tratándose de un ensayo 2D resulta intuitivo que la orientación sea en el sentido de los ejes coordenados.



Ilustración 4-4: Orientación del material VCCT.

Debido a que para la utilización de VCCT hemos creado dos sólidos distintos, es necesario ensamblarlos y ejercer una interacción entre ellos. Para ejercer la interacción una vez se ha ensamblado hay que decidir una superficie como maestra y otra como esclava. En este caso se ha optado por elegir como maestra la lámina superior y esclava la inferior, utilizando un método de discretización de nodo a superficie.

Para dejar bien definido este contacto no basta con especificar los campos mencionados, hay que dar una propiedad a esa interacción, en la cual se especifica el criterio que de fractura con el que se va a ensayar. En el caso que atañe a este trabajo se selecciona VCCT y se introducen los datos de la tasa de liberación de energía crítica y el exponente n que se han extraído de los artículos antes citados.

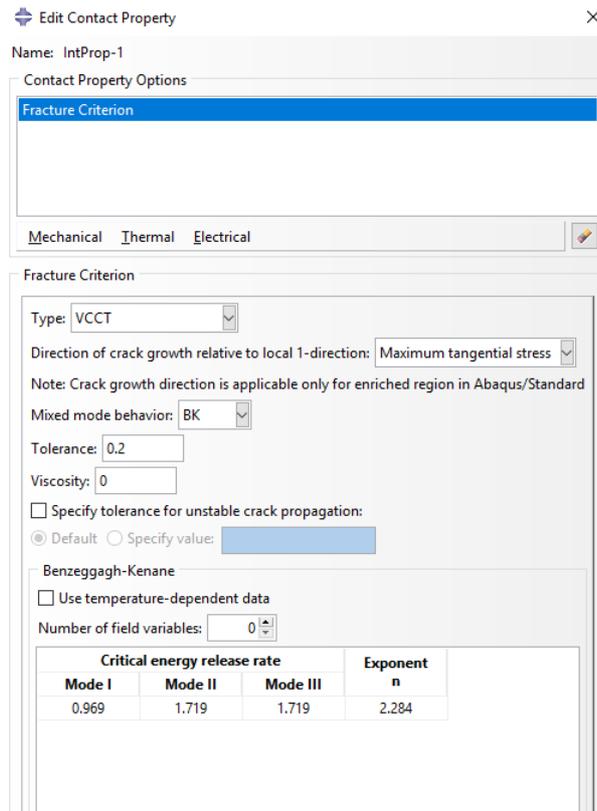


Ilustración 4-5: Propiedades de la interacción VCCT.

En la ilustración 4-5 se aprecia que se usa un valor de tolerancia de 0,2, el cual viene dado por defecto. Este valor corresponde a la tolerancia permitida para cumplir el criterio de fractura. Si se define un valor cualquiera de tolerancia f_{tol} y en el instante estudiado en Abaqus/CAE el criterio de fractura f es mayor que $1 + f_{tol}$, el intervalo de tiempo se reduce hasta que f este dentro de los valores de tolerancia definidos. Este valor es importante para problemas de grieta inestables ya que tienden a sobrepasarlo con facilidad, para el problema estático el cual atañe a este trabajo no tiene demasiada influencia este valor al no producirse grandes variaciones en el criterio de fallo entre los distintos pasos de las simulaciones.

Con respecto a la evolución del crecimiento de grieta en la ilustración se percibe que se propaga en la dirección normal a la dirección de las máximas tensiones tangenciales. Esta opción es la que viene prefijada por defecto, sin embargo se podría haber elegido que se propagara en la dirección paralela o normal al eje de referencia que en este caso es el 1. Para este trabajo se podría haber utilizado en dirección paralela al eje local 1, dando problemas si se elige que se propague en la dirección normal al mismo eje.

Además, se puede observar en la ilustración como se utiliza para el comportamiento del modo mixto la ley BK, sin embargo los valores de *Mode II*, *Mode III* y *Exponent n* no tienen influencia en los ensayos DCB al ser este un modelo de Modo I puro de fractura. Esta ley consiste esencialmente en una mejora del criterio de fractura antes detallado. Benzeggagh y Kenane [10] propusieron que el criterio se basara en la tasa de liberación de energía total:

$$f = \frac{G_T}{G_T^*}$$

$$G_T = G_I + G_{II}$$

$$G_T^* = G_I^C + (G_{II}^* - G_I^*) \cdot \left(\frac{G_{II}^*}{G_I^* + G_{II}^*} \right)^\eta$$

Con respecto a la malla que se ha utilizado en el trabajo cabe decir que se ha decidido usar 5 tipos de mallas diferentes para cada una de los métodos. De esta forma se puede comparar tanto la certeza de cada una de ellas como si compensa soportar el tiempo computacional frente a la mejora que irán introduciendo mallas más finas. Estas están comprendidas entre 0,1 y 0,5 mm con incrementos entre ellas de 0,1 mm para todos los métodos estudiados.

Por último reseñar las condiciones de contorno que se han utilizado. Se basan en un apoyo fijo tanto horizontal como vertical en el extremo inferior izquierdo de la probeta y la aplicación de la fuerza en el extremo superior izquierdo de la misma. Se ha optado por esta configuración por su simpleza y por ser la que ofrece resultados más certeros. Se usará el mismo tipo de apoyos para todos los métodos estudiados en este documento con visos de que la comparación posterior entre los diferentes métodos sea lo más precisa posible.

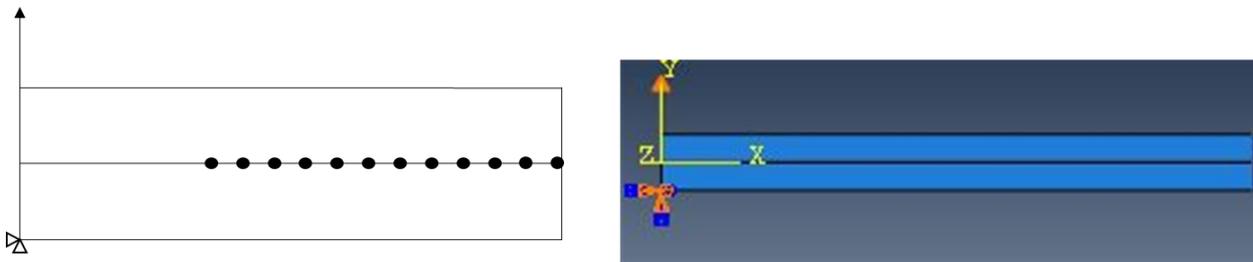


Ilustración 4-6: Condiciones de contorno utilizadas para la simulación. A la izquierda una representación esquemática y a la derecha la implementación en Abaqus.

4.2 XFEM

El método extendido de los elementos finitos (eXtended Finite Elements Method) tiene una gran ventaja respecto al VCCT y elementos cohesivos, la grieta no solo se propaga a través de una dirección ya predefinida.

Este método se basa en una versión extendida del método tradicional de elementos finitos al cual agrega una serie de funciones de enriquecimiento a las funciones de forma, consiguiendo insertar discontinuidades a través del elemento para predecir posibles desviaciones en la grieta. Para esto, se le añaden en la malla ciertos grados de libertad a un conjunto de nodos apropiados para así conseguir más precisión en el modelado de las discontinuidades que introduce la grieta [11].

4.2.1 Modelo teórico

En la actualidad se está dedicando un gran esfuerzo para aplicar este método a materiales compuestos. Se basa principalmente en la proposición que hizo Belytschko y Black [12] y que posteriormente fue mejorada por Belytschko, Möes y Dolbow [13].

Considerando un dominio con una grieta, el cual se discretiza en un número de elementos que les

corresponden un número N de nodos, se puede determinar el desplazamiento de cualquiera de sus puntos como:

$$u = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[u_i + H(x)a_i + \sum_{\alpha=1} F_{\alpha}(r, \theta)b_i^{\alpha} \right]$$

Donde $N_i(x)$ es la función de forma de elementos finitos asociada al nodo i , a_i y b_i^{α} son los grados de libertad nodales enriquecidos que contienen la grieta y α que varía dependiendo de $F_{\alpha}(r, \theta)$ que corresponden con las funciones de enriquecimiento nodales en el vértice de la grieta.

$$F_{\alpha}(r, \theta) = \left\{ \sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\}$$

La función $H(x)$ es la función de Heaviside, se fórmula como:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & (x - x^*) \cdot n < 0 \end{cases}$$

En la cual x es el punto de interés, x^* es su proyección en la grieta y n el vector normal en el punto x . Como se puede observar, la función $H(x)$ asignará valores de 1 a los nodos que queden por encima de la superficie de la grieta y valores de -1 a los que queden debajo. Esta información es la que determina la posición de la grieta en el elemento, sin embargo XFEM a diferencia de los otros dos métodos vistos en este documento sí propaga grietas a través de los elementos, por tanto lo que realmente revela la posición es el desplazamiento que seguirá cada uno de los nodos, positivo en un caso y negativo en el otro, dividiendo así el elemento en dos.

En la ilustración 4-7 se puede observar un pequeño croquis sobre los nodos enriquecidos. Los elementos que aparecen representados con un cuadrado se refieren a funciones de enriquecimiento en el vértice de la grieta, siendo los marcados con un círculo los enriquecidos con la función $H(x)$.

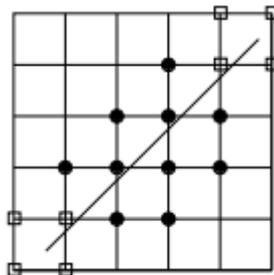


Ilustración 4-7: Nodos enriquecidos [11].

4.2.2 Implementación en Abaqus

En XFEM se pueden observar algunas diferencias con respecto al método anterior. El modelado de daño de la propagación de grietas que se ha implementado para este método difiere del de VCCT ya que XFEM solo sigue el modelo elástico lineal hasta la propagación de la grieta, después de este momento se produce una región de daño en lugar de la desvinculación, como ocurre con VCCT.

En Abaqus/CAE existen varios criterios de fractura que pueden usarse para XFEM, sin embargo el presente documento se va a centrar en el criterio de tracción cuadrática o QUADS [14].

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1$$

Siendo t_n^0 , t_s^0 y t_t^0 los valores máximos para tensión normal, primer y segundo cizallamiento. El término $\langle t_n \rangle$ indica que la propagación de la grieta solo se llevara a cabo para tensiones normales positivas.

Para su implementación en Abaqus se introduce en principio solo un elemento en este caso, sin embargo se le crea una partición al mismo quedando dividida la probeta en 3.

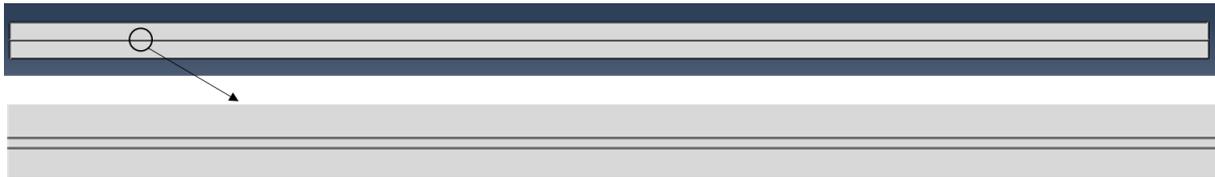


Ilustración 4-8: Probeta en XFEM.

Con la probeta ya definida se pasa a crear un nuevo *part*, en este caso del tipo *wire* (cable). Por simplificar, será una línea que estará en medio de la probeta y servirá para definir la grieta inicial.

Debido a que ahora cada una de las particiones realizadas anteriormente en el primer elemento se compondrá de unas propiedades diferentes hay que definir dos tipos diferentes. El primer tipo será el ya anteriormente explicado de tipo lámina y comportamiento elástico. Los valores de E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} y G_{23} siguen siendo los definidos en el capítulo anterior.

Sin embargo la segunda propiedad, la cual se le asignará a la parte central de la partición creada previamente en el primer elemento, se le ha puesto el nombre de “resina”. En esta se le introduce el criterio de tracción cuadrática con las tensiones nominales definidas por los artículos consultados. Además se ha introducido una evolución del daño del tipo energía, con la ley BK para el comportamiento en modo mixto y las tasas de liberación de energía críticas.

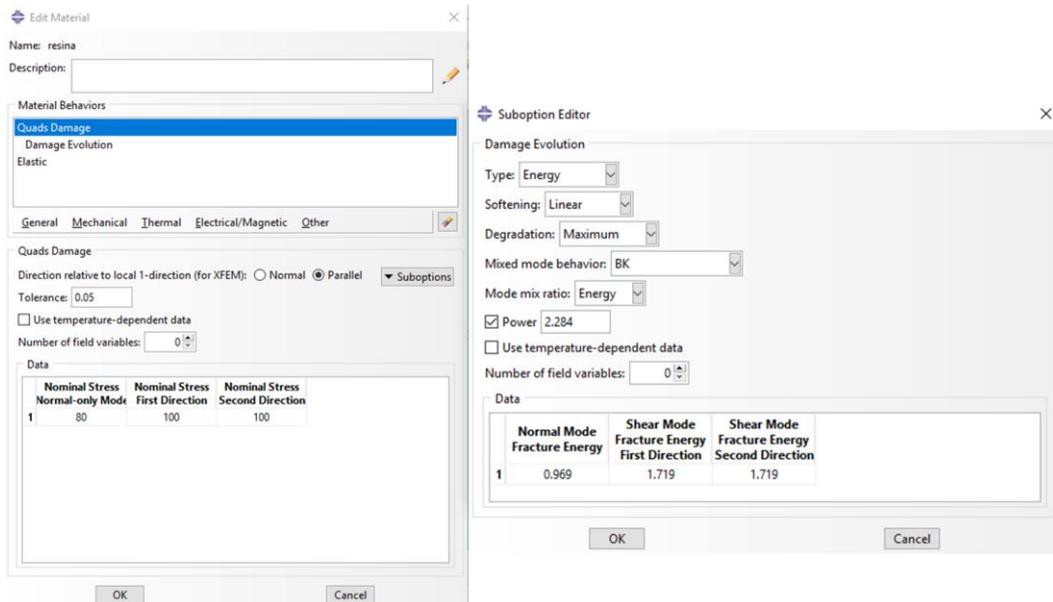


Ilustración 4-9: Propiedades de resina en XFEM.

Con el objetivo de no hacer repetitivo este documento no se volverá a detallar como se le asigna sección y orientación a cada parte, siendo de la misma manera que se detalló para VCCT.

Con respecto a los pasos utilizados siguen siendo el inicial y el primer step, sin embargo en el primer paso se ha declarado el apartado de estabilización automática, definiendo la energía de fracción disipada como un valor de 0,0002. Este valor se usa para facilitar la convergencia del modelo ya que si no se introducen coeficientes de amortiguamiento el cambio de las tensiones a nivel local en los elementos es drástico, lo que introduce errores numéricos que provocan problemas como la distorsión de elementos en Abaqus explicit o la no consecución de la convergencia en Abaqus standard.

Para la definición completa del espécimen que se va a ensayar ya solo queda determinar una malla apropiada y elegir las condiciones de contorno adecuadas. En los dos casos serán las mismas que las usadas para los otros dos métodos por lo que no se volverán a detallar en este apartado. Existe una pequeña variación en la malla con respecto a VCCT, cuando se creó la partición se hizo con visos de que en la parte central de esta se pudiera poner una malla con 3 elementos, lo cual es adecuado para la conveniente propagación de la grieta.

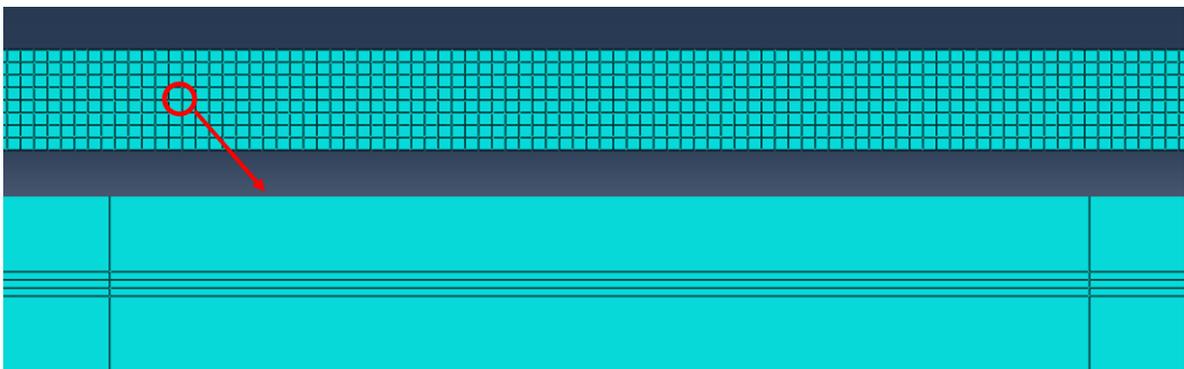


Ilustración 4-10: Malla usada en XFEM.

4.3 Elementos cohesivos (CZM)

En el análisis de ensayos mediante elementos finitos, el modelo de elementos cohesivos (cohesive zone model) es uno de los más frecuentados para simular la propagación de grieta y la delaminación.

A diferencia de VCCT, este método no utilizará restricciones y acoplamientos entre nodos considerando elementos cohesivos para la simulación de la propagación de la grieta. Uno de sus grandes valores es la simpleza del método y fácil implementación en el software, sin embargo la grieta solo se puede propagar por el camino de elementos cohesivos ya definido, lo que puede limitar las capacidades de predicción del modelo.

4.3.1 Modelo teórico

Los elementos cohesivos son elementos específicos que se insertan entre las diferentes láminas y actúan como una capa interlaminar. Su inicio se remonta a los estudios realizados por Dugdale [15] y Barenblatt [16]. La principal utilización de este modelo es para la modelación de daños en hormigón, pero en la actualidad cada vez más se aplica a problemas de delaminación en materiales compuestos.

CZM parte de la hipótesis de la existencia de una zona cohesiva tras la rotura de la grieta, siendo las tensiones diferentes de cero aunque el material ya esté dañado. Existen varios modelos de zona cohesiva utilizados en la actualidad, en este trabajo se usará el modelo lineal con respecto a tensión-deformación. En la siguiente figura se puede ver como es la evolución de tensiones a partir de la grieta ya dañada y la gráfica antes mencionada. Cabe reseñar que todo esto es para el modo *I* de delaminación, objeto de este trabajo [17].

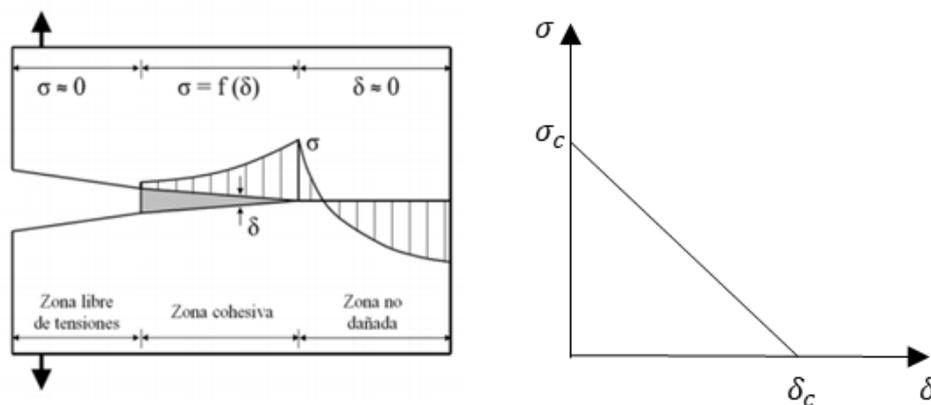


Ilustración 4-11: Evolución de tensiones normales respecto, (a) evolución de la grieta, (b) deformación [17].

Si se supone que la energía de fractura requerida para formar un área unitaria de la superficie de la grieta en el modo *I*, G_I^* , siendo esta una propiedad del material que puede ser calculada experimentalmente. Para saber si la grieta propaga o no hay que determinar si la energía de fractura acumulada, G_I , supera el valor crítico, lo cual se puede hacer con la siguiente relación [18].

$$G_I = \int \sigma_t \cdot du_n$$

Donde σ_t representa la tracción total del modo *I* y du_n el diferencial de desplazamiento necesario para la

integración numérica.

4.2.2 Implementación en Abaqus

Para su implementación en Abaqus se sigue la misma hoja de ruta que para el modelo predecesor a este. Hay que tener en cuenta que para una correcta simulación con este método es importante seleccionar bien el elemento cohesivo a utilizar, definir comportamiento mecánico y geometría convenientemente y que la unión con los otros elementos de la simulación sea la correcta.

Para satisfacer estos requerimientos se ha llevado a cabo en primer lugar la definición de la geometría de la probeta y la grieta inicia. En este caso se creará solo un elemento en la categoría de "part" con las dimensiones especificadas en el apartado anterior.

Además, después de la creación del elemento que corresponde a la probeta se ha hecho una partición de $10 \mu m$ de espesor, de la misma forma que se hace para XFEM, en la que después se mallará de forma más fina para el correcto desarrollo de la simulación. Por claridad se representa las partes en una ilustración simplificada.

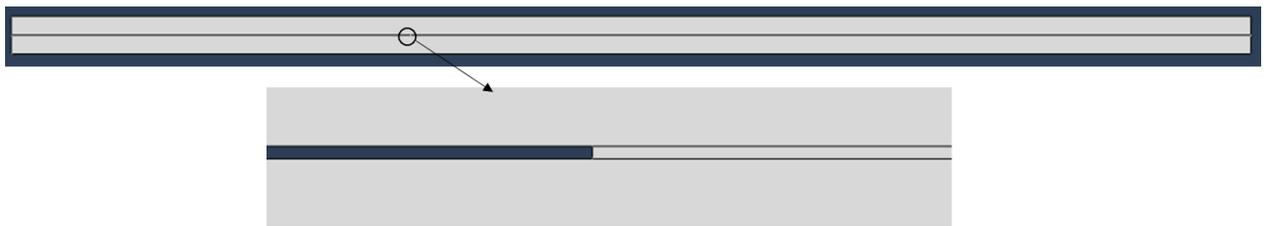


Ilustración 4-12: Probeta con elementos cohesivos.

Con respecto a los materiales a utilizar siguen las mismas pautas que XFEM, se creará uno de la forma lámina igual que se ha hecho para VCCT y otro para la partición creada que se llamará resina con las propiedades de los elementos cohesivos utilizados para el ensayo.

Es importante saber que para resina se ha utilizado de nuevo el daño de tracción cuadrática o QUADS, añadiendo en este caso un daño de estabilización cohesiva. Además en resina las propiedades elásticas se han calculado siguiendo el procedimiento explicado en [5,19].

$$K = \alpha \cdot \frac{E_{33}}{t}$$

Siendo K la rigidez que se intrduce en Abaqus/CAE (E_{nn}, E_{ss}, E_{tt}), α un valor que debe ser mayor que el 50% , estimándose en este caso el 55% y t el espesor. La rigidez en el espesor (E_{33}) al ser gobernada por la matriz es una buena hipótesis asignarle el mismo valor que a la rigidez en dirección transversal a la fibra dentro de la lámina o la dirección 2.

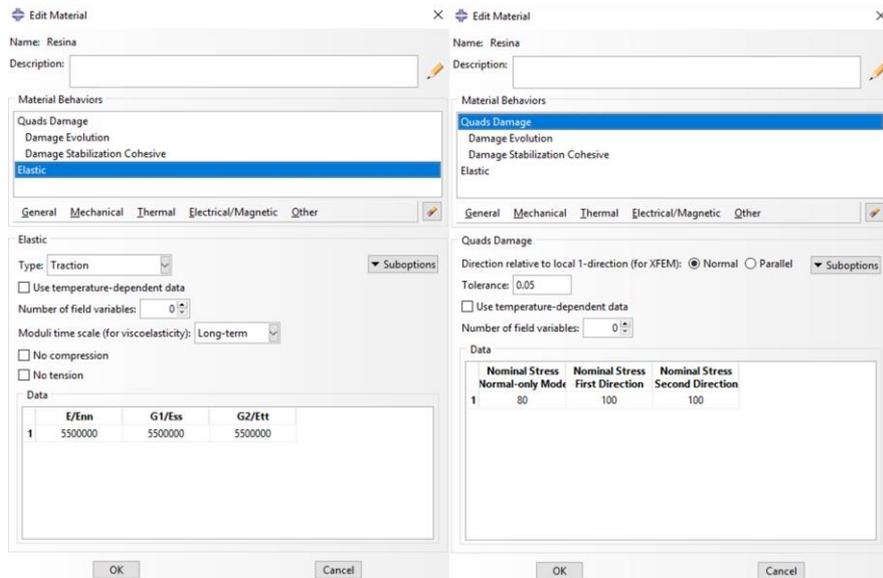


Ilustración 4-13: Propiedades de resina en elementos cohesivos.

Para este tipo de ensayo se hace el mismo procedimiento que en XFEM, en el step 1 se activa el apartado de estabilización automática, definiendo la energía de fracción disipada como un valor de 0,0002 por el mismo motivo que fue explicado anteriormente.

Con respecto a la malla utilizada será del mismo tipo que las anteriores. Por utilizar el caso más similar, se pondrá de ejemplo la de XFEM, sin embargo en este caso en la partición no se pondrá una malla de 3 elementos sino de solo 1.

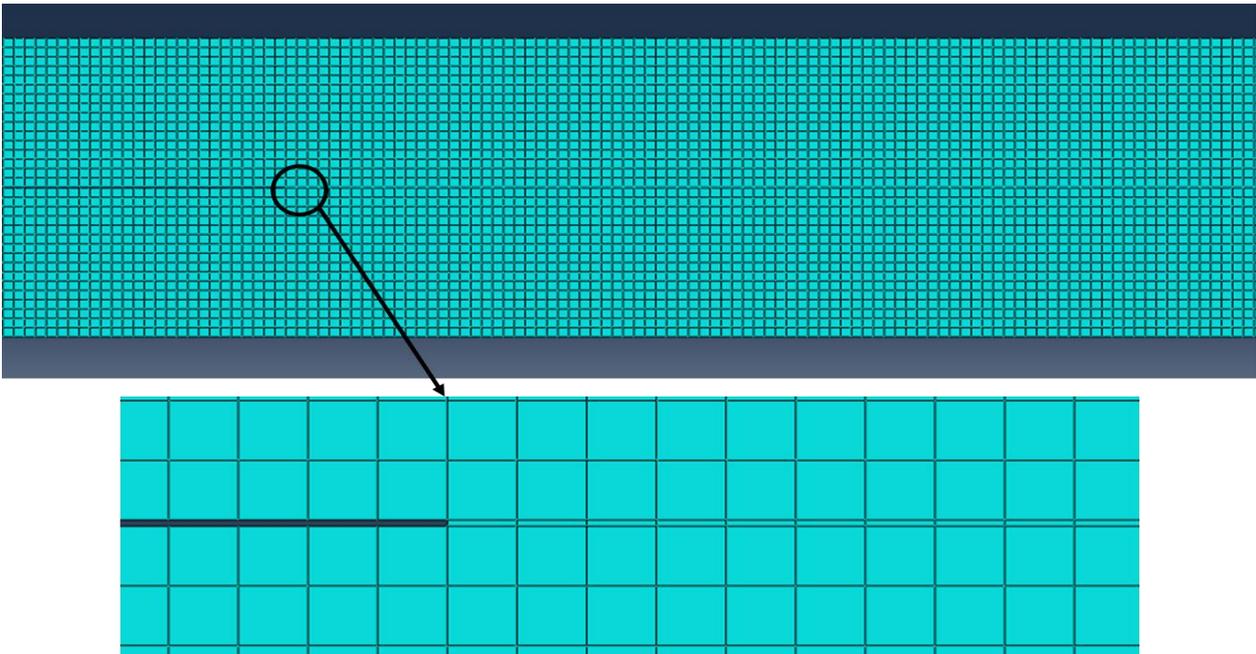


Ilustración 4-14: Malla usada en elementos cohesivos.

Todavía la malla no estaría completa del todo, en este caso al usar elementos cohesivos se debe indicar en la malla que la partición realizada es el elemento cohesivo, para ello se elimina la malla recién hecha de la parte central del espécimen y se vuelve a mallar solo está indicando que es el elemento cohesivo y obligando que utilice el criterio de QUADS. En la ilustración 4-15 y 4-16 se puede ver donde poder realizar esta acción.

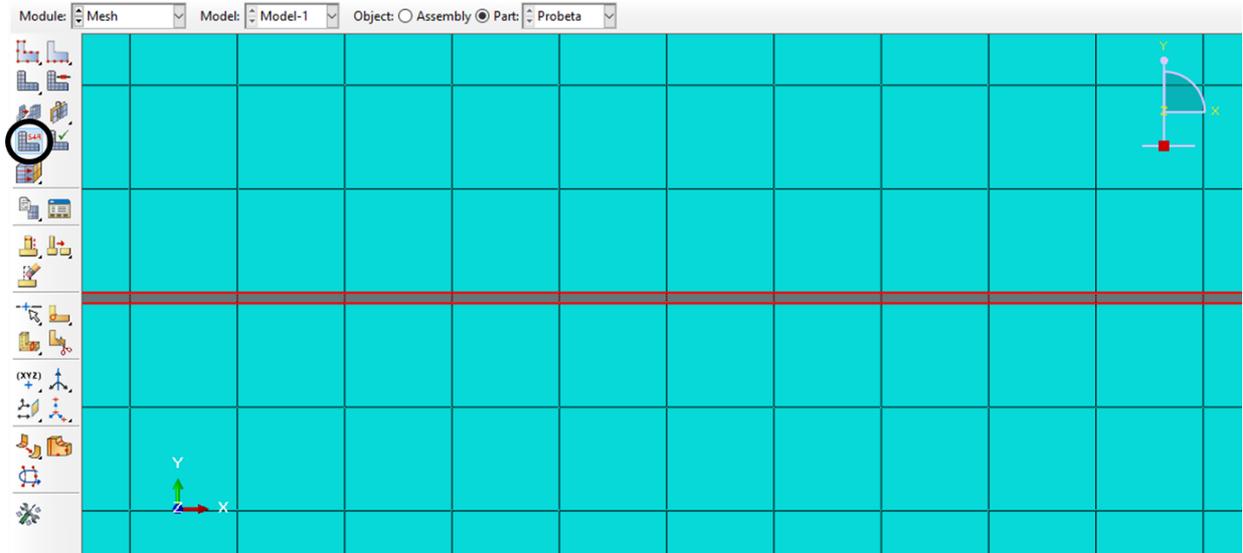


Ilustración 4-15: Opción del cuadro de ejecutables donde llevar a cabo la realización de la nueva malla.

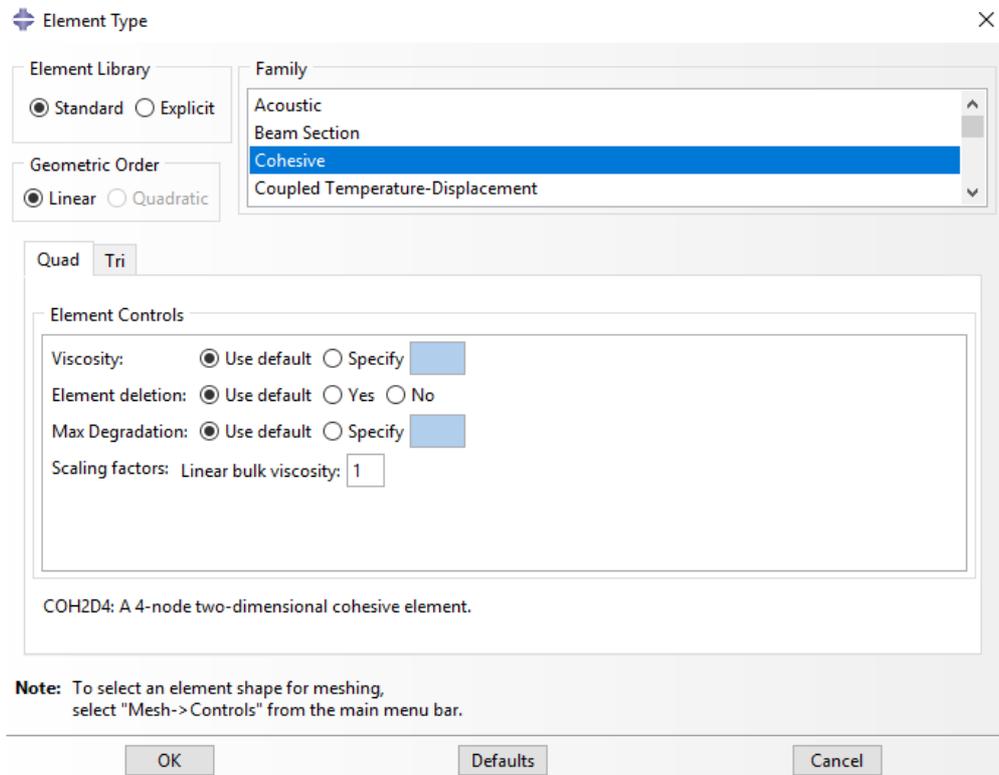


Ilustración 4-16: Propiedades de la malla de la interfase laminar en elementos cohesivos.

5 RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas para posteriormente realizar un análisis de los mismos. También se puede observar en este apartado un breve repaso de la evolución de la grieta en cada método. Como observación general de todas las simulaciones efectuadas en este trabajo se observa que la malla que necesita menor número de incrementos para finalizar la simulación ha sido la de 0,3 mm. Varias particularidades han sido encontradas en las distintas técnicas de modelado analizadas en este trabajo para distintos tamaños de elementos, las cuales serán detalladas en las siguientes líneas.

5.1 VCCT

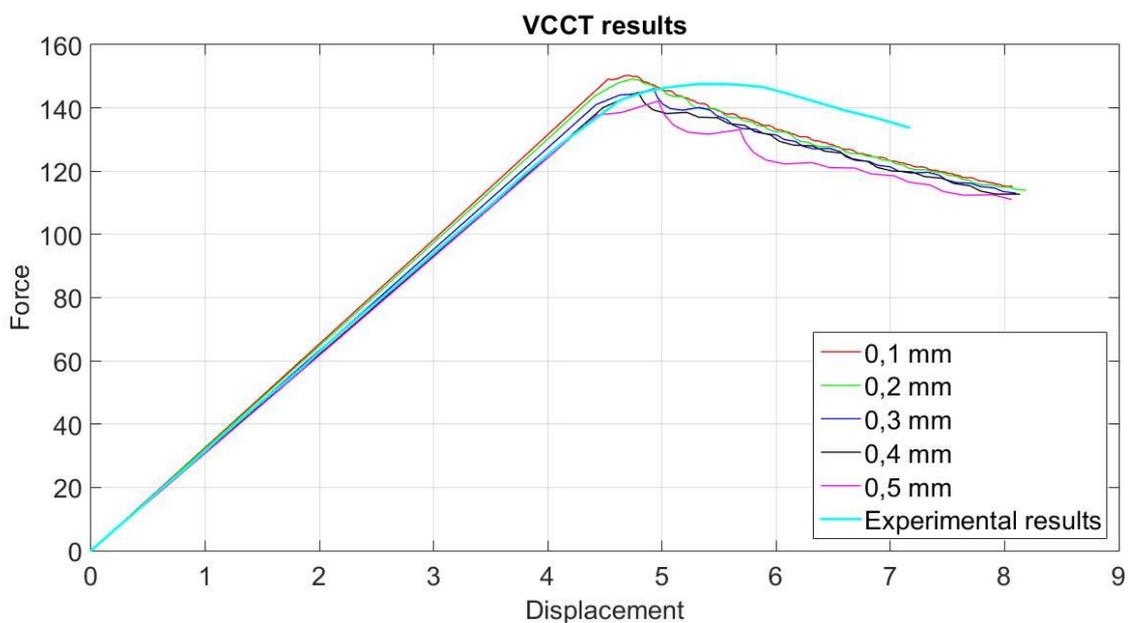


Ilustración 5-1: Resultados obtenidos en el ensayo DCB usando VCCT para diferentes mallas.

En este tipo de ensayo se observa como la rigidez es prácticamente la misma tanto para los resultados experimentales como para la simulación numérica. Con respecto a la propagación de grieta también se aprecia como empieza para el mismo desplazamiento de aproximadamente $4,6\text{ mm}$, sin embargo el máximo pico de fuerza del ensayo experimental no se encuentra hasta casi 1 mm después del punto de comienzo de propagación de grieta, no siendo así en el caso de la simulación numérica. Este hecho se explica debido a que en la simulación se hace una simplificación de la realidad, por tanto se puede observar el cambio de pendiente de manera más brusca. La rigidez en el caso experimental disminuye más lentamente que en la simulación debido a esta simplificación.

Dentro de la simulación computacional se puede ver una clara tendencia hacia resultados más precisos conforme se va afinando la malla aunque cabe decir que se obtienen resultados muy certeros con la malla más basta ensayada. Conforme la malla se va haciendo más fina va incrementando la rigidez del modelo. El máximo pico de fuerza es prácticamente igual para resultados experimentales y el resultado obtenido en mallas de $0,1\text{ mm}$ y $0,2\text{ mm}$, siendo unos 5 N inferior en el resto de mallas.

El coste computacional de este ensayo ha sido pequeño logrando conseguirse un ahorro de tiempo y de espacio de memoria notable en comparación con los otros métodos que posteriormente se van a comentar. Como es obvio las mallas más grandes obtienen menor número de puntos como resultado, siendo más imprecisas como se intuyó en la definición del método y como ha quedado demostrado tras la simulación del mismo.

Observando con más detenimiento la parte de propagación de grieta es conveniente aclarar un método eficaz de ver en VCCT cuál es el último elemento unido de la probeta. Dentro de la interfaz de Abaqus/CAE existe la opción en “*visualisation*” de ver las tensiones en la dirección 2. Esta visualización resulta clara e intuitiva ya que puede acotarse la zona donde se están experimentando tensiones con un simple vistazo.

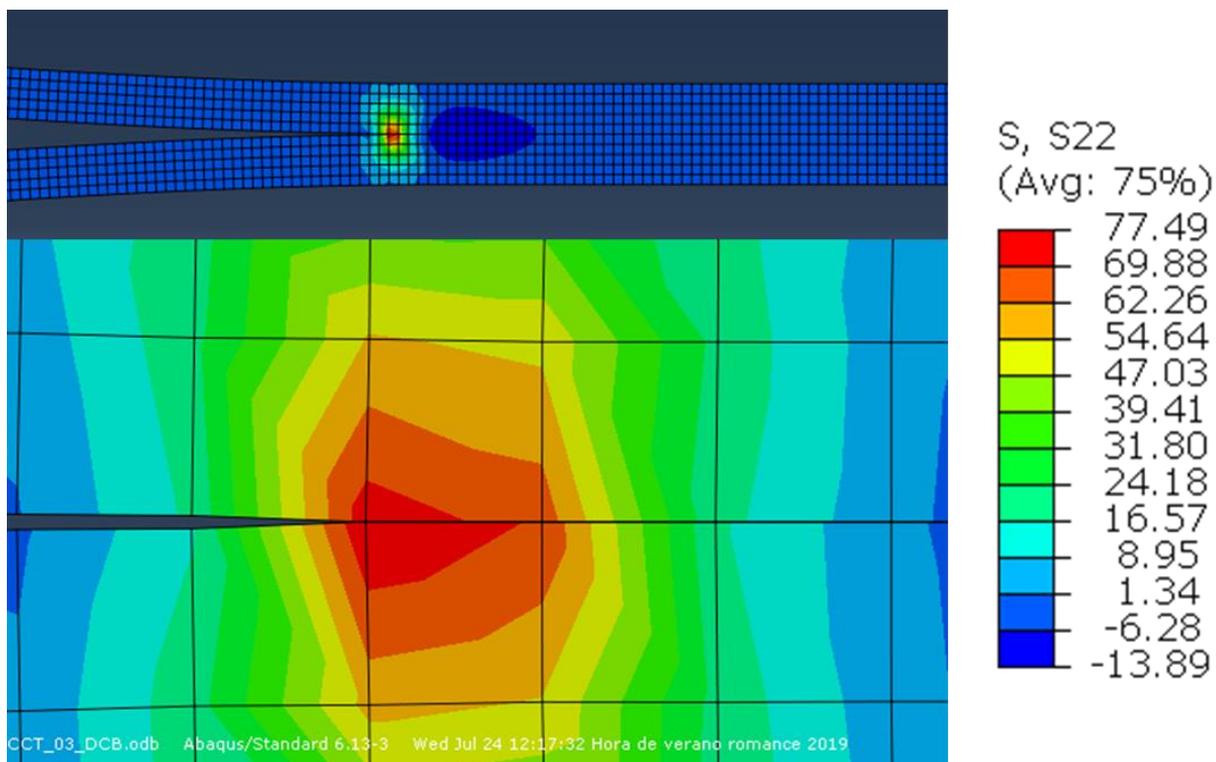


Ilustración 5-2: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando VCCT y malla de $0,3\text{ mm}$.

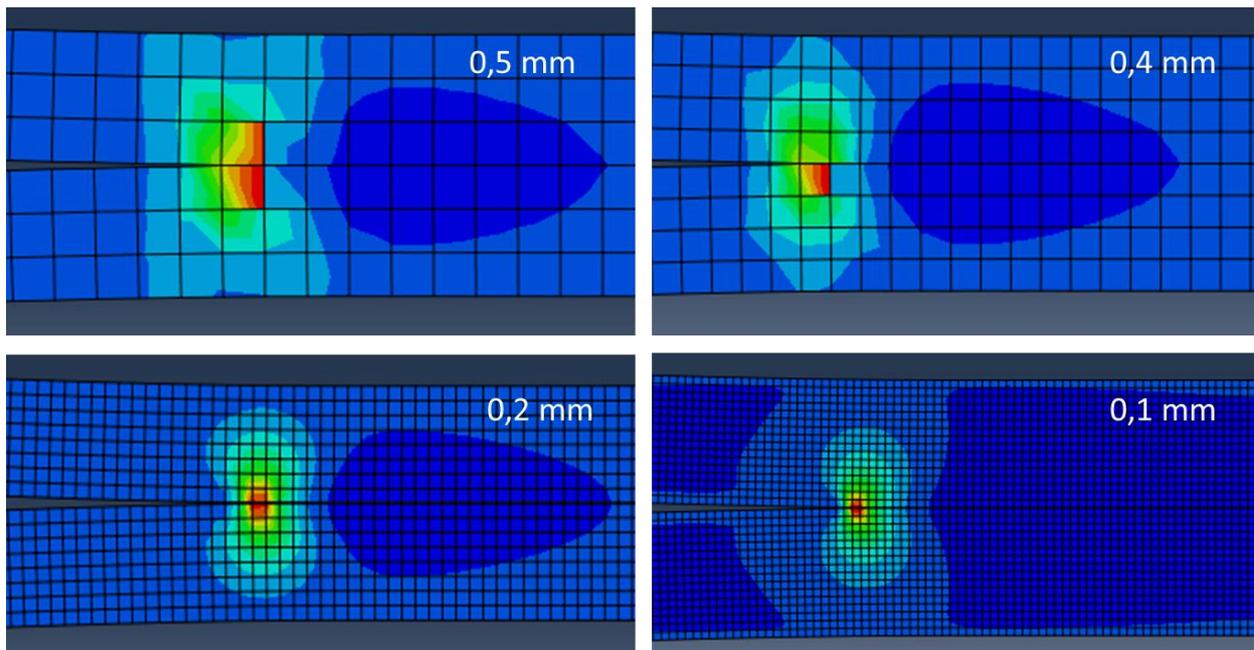


Ilustración 5-3: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando VCCT. Nota: los valores de las tensiones mostradas se asemejan a la leyenda de la ilustración 5-2.

Las tensiones se representan mediante colores que van desde el azul correspondiente a las menores tensiones al rojo de las tensiones mayores. Se puede ver como la tensión en la dirección normal a la grieta que experimenta el ensayo en el momento representado es junto al último elemento de unión, el mismo que una vez se separe empezará a dejar de sentirla y disminuirá como se puede ver en la ilustración 5-2 en el elemento recién despegado.

En este trabajo también se estudiará cual es el avance de grieta para 3 momentos determinados. Se ha elegido la malla de $0,3\text{ mm}$ ya que es la central, además los instantes estudiados serán el avance de grieta para un desplazamiento de 5 mm , 6 mm y 7 mm . En VCCT los resultados obtenidos son los que se pueden observar en la tabla 5-1.

Desplazamiento	5 mm	6 mm	7 mm
Fuerza	$141,25\text{ N}$	$130,05\text{ N}$	$121,35\text{ N}$
Apertura grieta	$1,5\text{ mm}$	$4,8\text{ mm}$	$8,1\text{ mm}$
Longitud de grieta	$34,4\text{ mm}$	$37,7\text{ mm}$	41 mm

Tabla 5-1: Avance de grieta usando malla con tamaño de elemento $0,3\text{ mm}$ y VCCT.

5.2 XFEM

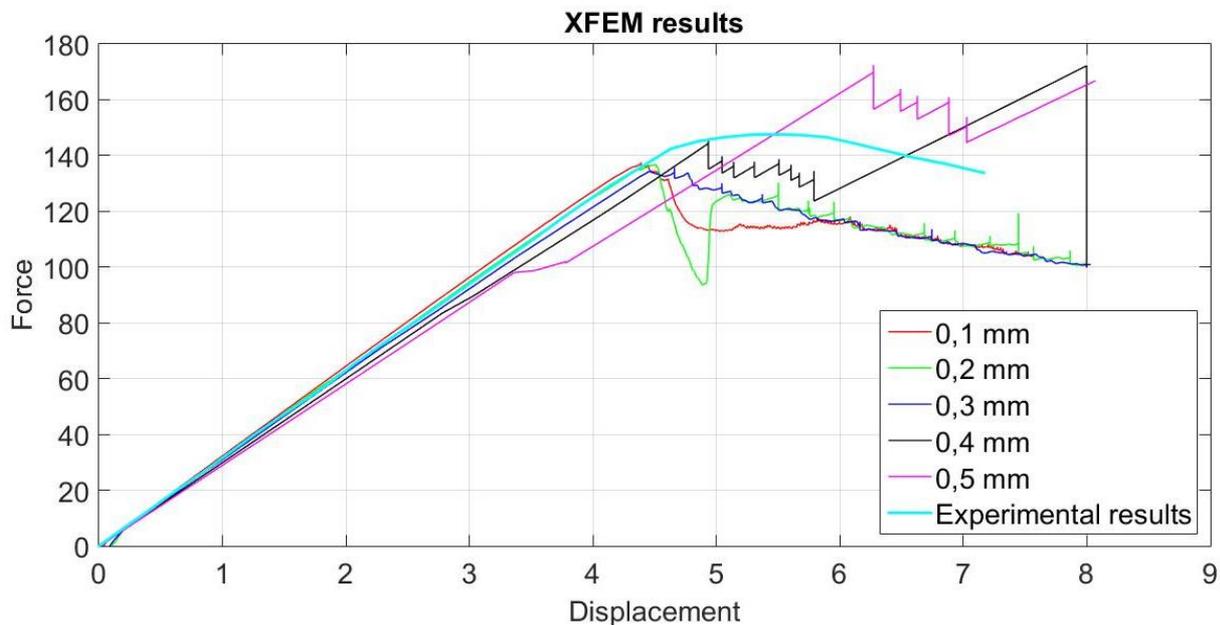


Ilustración 5-4: Resultados obtenidos en el ensayo DCB usando XFEM para diferentes mallas.

En XFEM se observa de nuevo similar rigidez en las simulaciones numéricas y en los ensayos experimentales, sin embargo se comprueba que la grieta empieza a propagar un poco antes en el caso de las simulaciones. Este hecho puede ser debido a que XFEM es un método más complejo y requiere que todos los parámetros introducidos sean muy precisos, por lo que cualquier pequeño cambio en las propiedades del material o en algún criterio seguido puede generar esta divergencia. Aun así la diferencia entre el pico máximo de los resultados experimentales con el pico máximo de los resultados extraídos de las simulaciones no varía en exceso (unos 8 N en el mayor de los casos) para las mallas inferiores a 0,3 mm.

Con respecto a la tendencia que siguen conforme se va disminuyendo la malla, se comprueba como para mallas grandes es un método muy inexacto y sufre grandes saltos, por lo cual no se puede extraer resultados concluyentes, sin embargo las mallas pequeñas empiezan a converger en una solución única.

El coste computacional para XFEM ha sido sin duda el que más tiempo tarda en resolver llegando a durar la malla de 0,1 mm hasta 2 horas en hacer la simulación y ocupando mucho tamaño en la memoria. En términos estrictamente de rapidez la malla de 0,5 mm también ofrece resultados rápidos aunque como se ha demostrado muy poco precisos.

Para hablar de la propagación de grieta es necesario primero aclarar que en este método se ha llevado a cabo un incremento en los parámetros de convergencia de Abaqus/CAE. Esto se ha realizado debido a varios factores como son la complejidad del método o el tiempo que tarda en encontrar convergencia con parámetros muy estrictos. Pero el motivo fundamental por el cual se han incrementado estos parámetros ha sido la necesidad de la obtención de resultados, dado que con los parámetros originales no se obtienen. Se es consciente de que con este incremento el método pierde precisión a cambio de facilitar notablemente la convergencia del problema numérico.

Para poder aumentar la convergencia de Abaqus/CAE hay que dirigirse en "step" y en el comando

“other/edit/step-1” se puede cambiar los parámetros. En este trabajo se ha cambiado I_A y R_n^α , el primero a un valor de 30 y el segundo a un valor de 0,5.

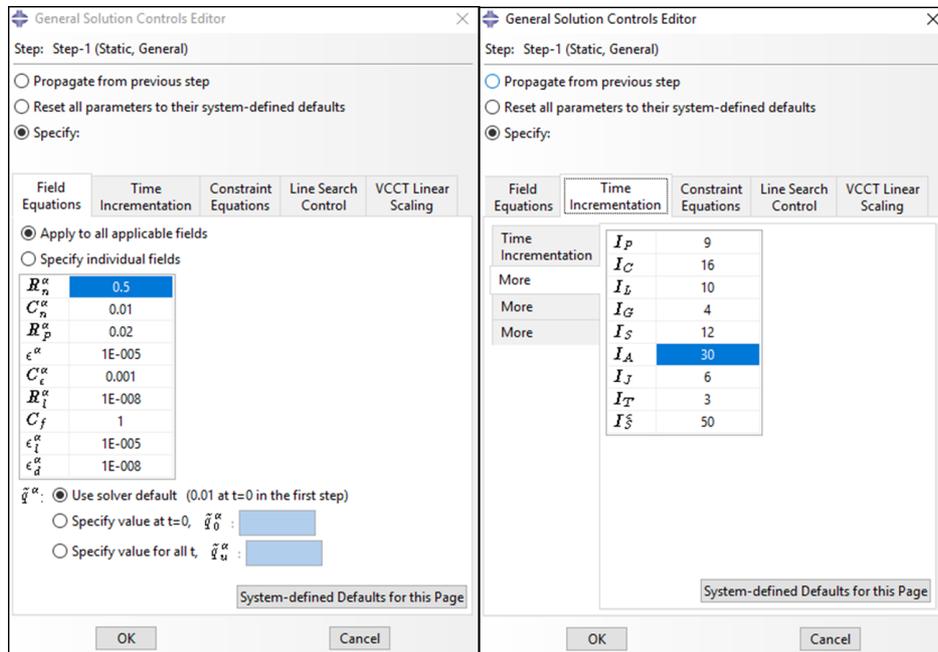


Ilustración 5-5: Parámetros de convergencia en XFEM.

Una vez se han determinado los parámetros de convergencia que se han utilizado se pasa a la visualización de grieta. Al igual que en VCCT en este trabajo se recomienda la visualización de las tensiones en la dirección 2. De esta forma se puede ver claramente el lugar de propagación de grieta dado que es donde se acumulan las tensiones en esta dirección. Al hacer zoom en la zona donde están las tensiones se ve claramente el lugar exacto donde se encuentra la propagación de la grieta.

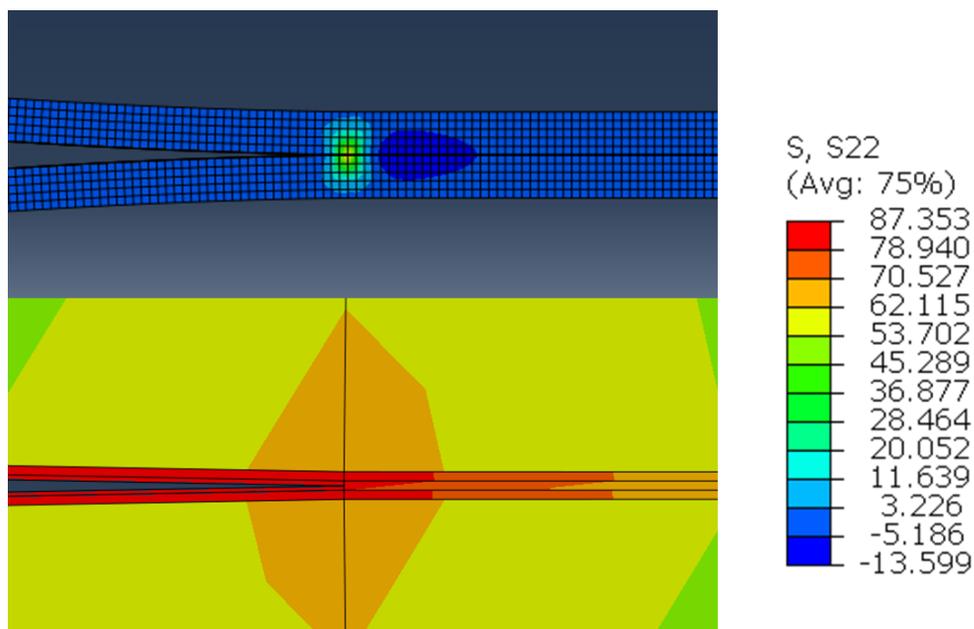


Ilustración 5-6: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando XFEM y malla de 0,3 mm.

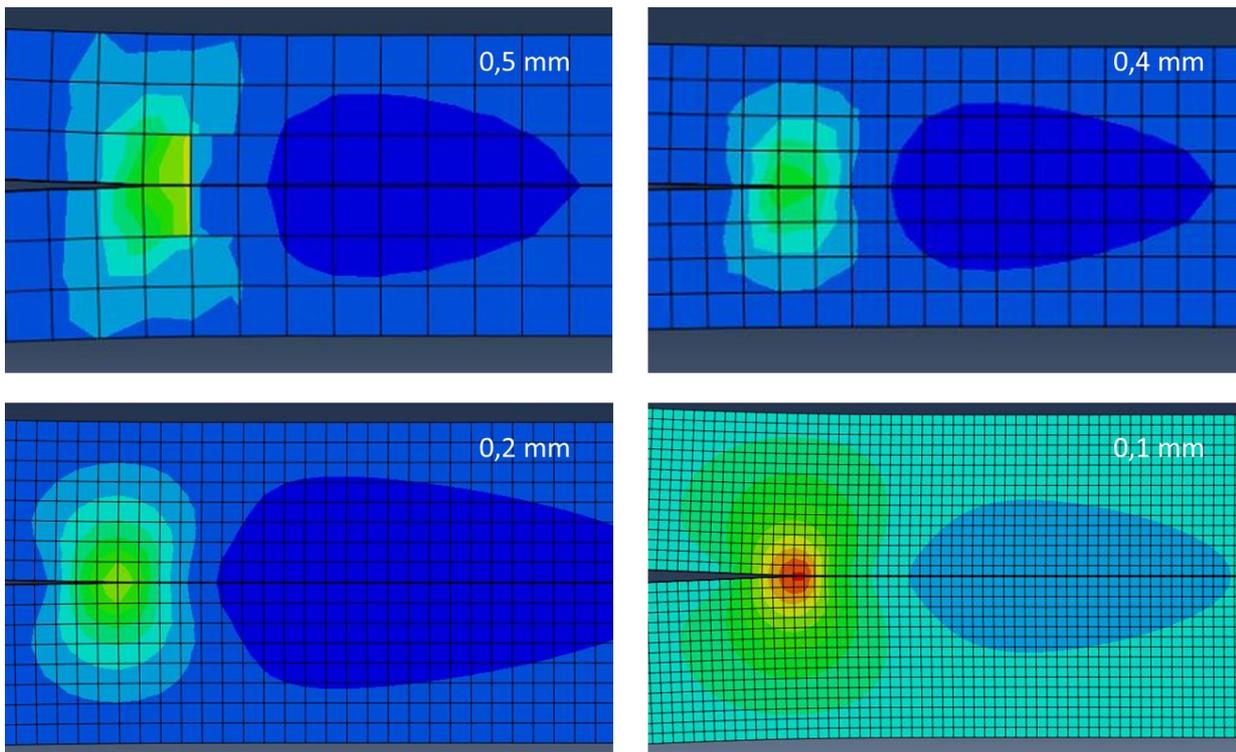


Ilustración 5-7: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando XFEM. Nota: los valores de las tensiones mostradas se asemejan a la leyenda de la ilustración 5-6.

En la simulación de XFEM se han obtenido unos resultados en cuanto a propagación de grieta y fuerza respecto a desplazamiento de la probeta ensayada que pueden observarse en la tabla 5-2.

Desplazamiento	5 mm	6 mm	7 mm
Fuerza	130 N	116,85 N	108 N
Apertura grieta	3,1 mm	6,7 mm	10 mm
Longitud de grieta	36 mm	39,6 mm	42,9 mm

Tabla 5-2: Avance de grieta usando una malla con tamaño de elemento 0,3 mm y XFEM.

5.3 Elementos cohesivos

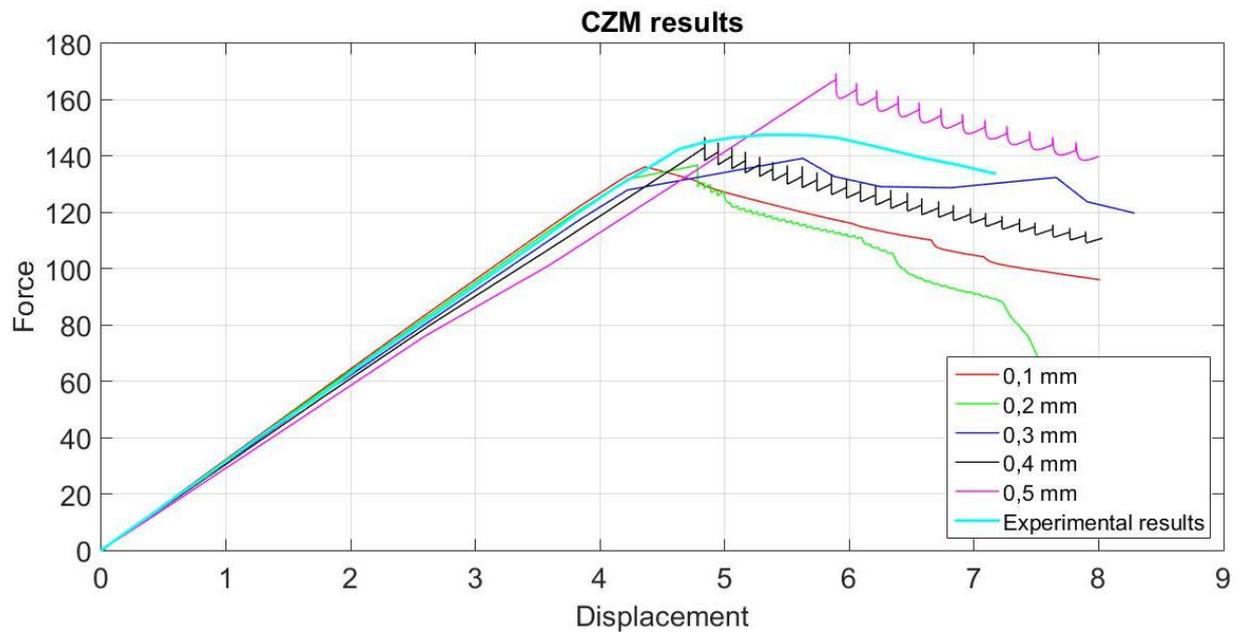


Ilustración 5-8: Resultados obtenidos en el ensayo DCB usando CZM para diferentes mallas.

Al igual que en los ensayos anteriores se comprueba como la rigidez es prácticamente la misma que en el ensayo experimental, aunque al igual que en XFEM la grieta empieza a propagar un poca antes en las simulaciones numéricas. El mayor pico será uno u otro dependiendo de la malla que se estudie, en los casos de las mallas menores será del orden de 138 N, y para las mallas de 0,3 mm y 0,4 mm muy próximo al valor experimental.

La tendencia que siguen las mallas es a estabilizarse a la vez que se va afinando. En este ensayo se pueden observar dos peculiaridades, la primera es con la malla de 0,3 mm encuentra muy rápido la convergencia, esto es debido a los criterios de convergencia elegidos. La otra peculiaridad es con la malla de 0,2 mm, con la cual el método simula bien hasta el comienzo de propagación de grieta, a partir de ahí en el periodo de pérdida de rigidez no simula correctamente el ensayo llegando a perder súbitamente toda la rigidez y fallando en torno a un desplazamiento de 7,5 mm.

En términos de coste computacional cabe decir que se encuentra entre los dos métodos anteriores, siendo las simulaciones más rápidas que las de XFEM pero no tanto como VCCT. Con respecto a memoria ocupada nos encontramos en el mismo caso de XFEM ocupando gran tamaño.

Para estudiar la propagación de grietas en este método se siguen los mismos criterios de convergencia usados anteriormente en XFEM, sin embargo para la visualización del avance de grieta se recomienda el uso de la variable "SDEG" dentro de "visualisation". En este modo de visualización se puede ver el daño que sufre la interfaz cohesiva, llegando al valor máximo de 1 la parte que está a punto de despegarse, quedando despegada en los posteriores pasos.

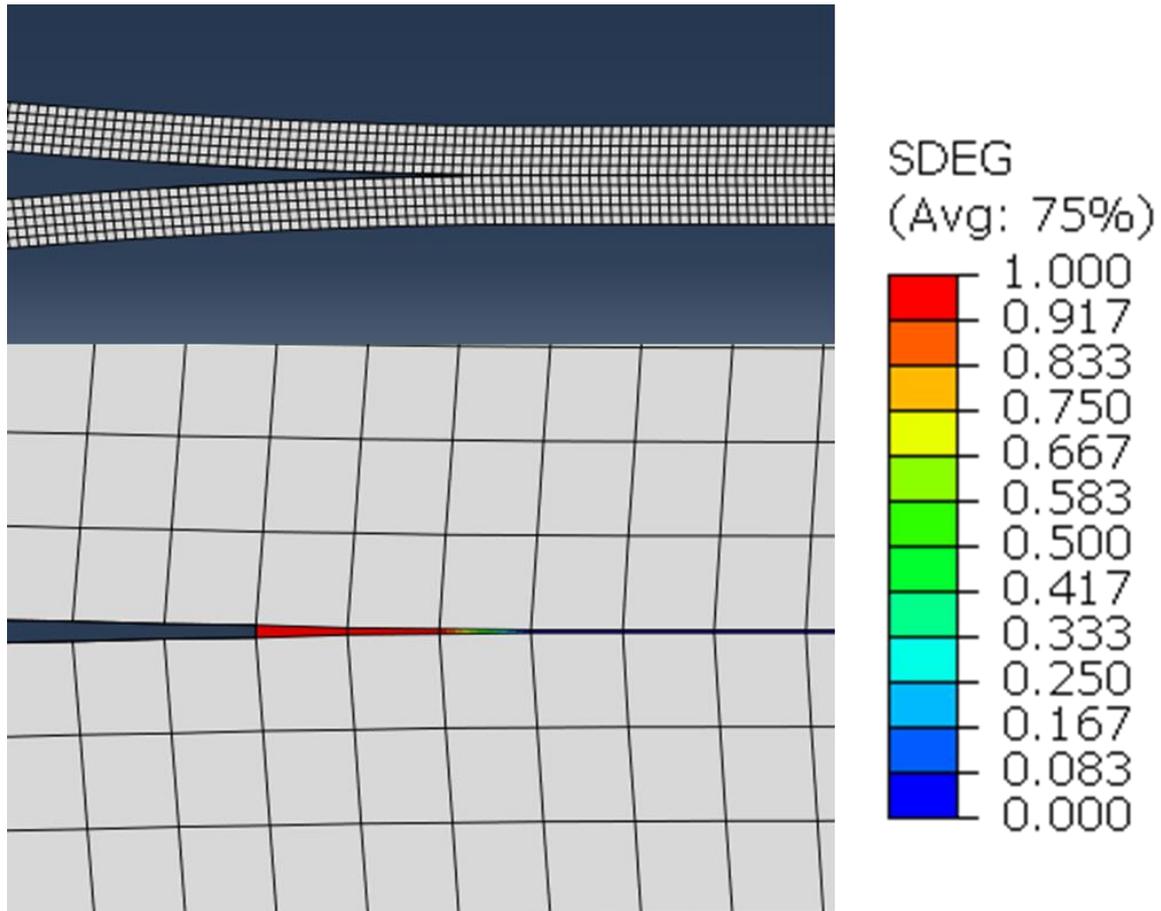


Ilustración 5-9: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM, SDEG y una malla de 0,3 mm.

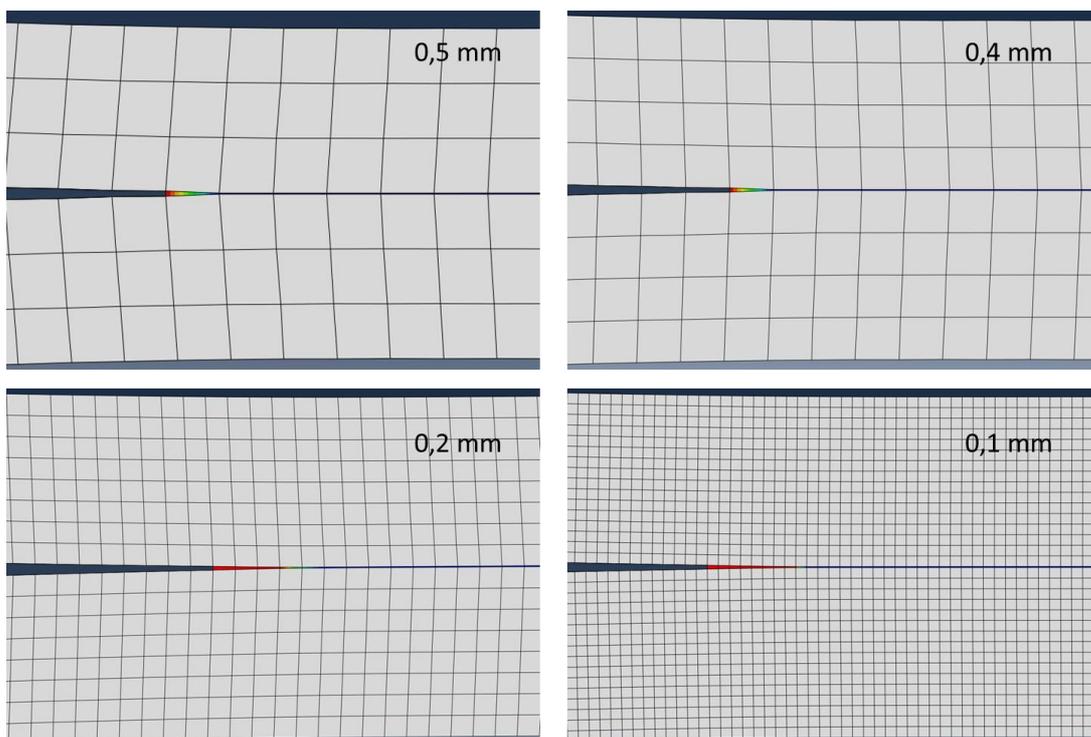


Ilustración 5-10: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM y SDEG.

Al igual que en los dos métodos anteriores se puede ver las tensiones en la dirección 2. En este caso es más intuitivo seguir la propagación de grieta como se puede observar en la ilustración 5-9, sin embargo se muestra como se podría seguir la evolución de la grieta usando la variable "S22".

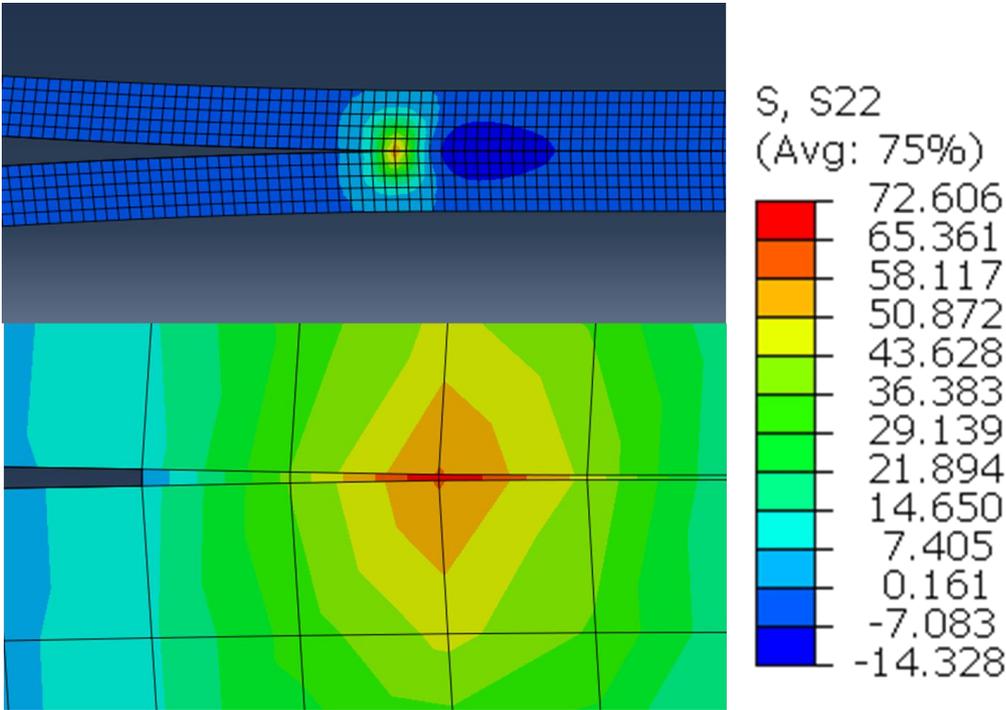


Ilustración 5-11: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM, S22 y una malla de 0,3 mm.

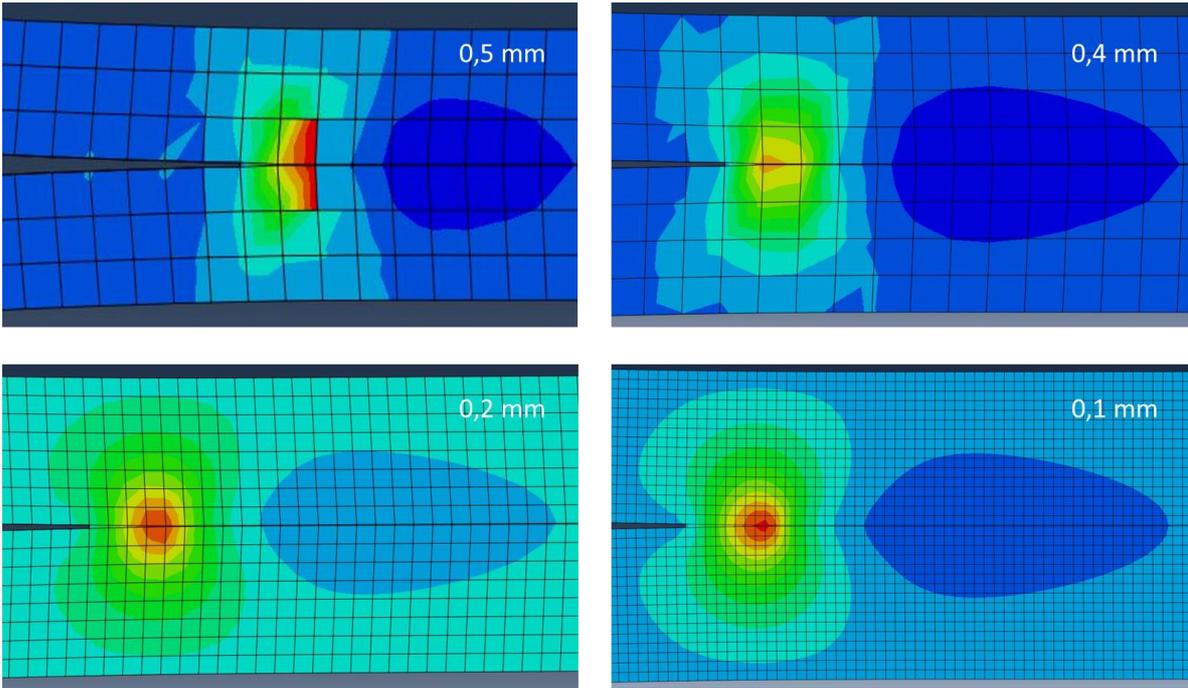


Ilustración 5-12: Tensiones experimentadas en la zona del vértice de la grieta usando CZM y S22. Nota: los valores de las tensiones mostradas se asemejan a la leyenda de la ilustración 5-11.

Los resultados obtenidos en esta simulación con respecto a propagación de grieta y fuerza se muestran en la tabla 5-3. Cabe decir que en este ensayo se muestran los datos de la malla de 0,4 mm ya que como se indico anteriormente la malla de 0,3 mm no simulo un gran número de steps para realizar este tipo de análisis con la precisión requerida.

Desplazamiento	5 mm	6 mm	7 mm
Fuerza	138,45 N	125,75 N	116,5 N
Apertura grieta	0,8 mm	4,4 mm	7,6 mm
Longitud de grieta	33,7 mm	37,3 mm	40,5 mm

Tabla 5-3: Avance de grieta usando una malla con tamaño de elemento 0,4 mm y CZM.

6 CONCLUSIÓN Y VALORACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo se ha pretendido realizar el análisis de un ensayo DCB, con unas condiciones determinadas, para así poder comparar los resultados con la información extraída de la literatura de la manera más certera posible. Tras la obtención de los mismos se puede aclarar que para estas condiciones propuestas el método más ventajoso es VCCT. Sin embargo es beneficioso el estudio de XFEM y CZM ya que podrían arrojar mejores resultados para otras condiciones de este mismo ensayo o para ensayos como los antes citados ENF y MMB.

El estudio del ensayo se ha llevado a cabo mediante estos tres métodos por diferentes motivos. VCCT es un método de fácil implementación, elementos cohesivos simula daño mediante la interfaz cohesiva y XFEM no necesita una dirección de grieta predefinida por lo que puede propagarse mediante los elementos.

Una vez se han realizado los ensayos se pueden extraer una serie de conclusiones las cuales dotan de sentido a este documento:

- Se ha comprobado como en los tres métodos un refinamiento de malla implica una mejora la calidad de los resultados obtenidos. En el caso de VCCT para encontrar la convergencia en los resultados se necesitan mallas de $0,2\text{ mm}$ o inferiores a esta, no siendo así para XFEM en el cual los resultados empiezan a converger para mallas inferiores a $0,3\text{ mm}$.
- VCCT se muestra como el método más preciso para están condiciones de ensayo. Su simpleza hace además que su coste computacional sea inferior al resto de métodos estudiados. La unión de nodos resulta ventajosa para los ensayos DCB. Otra ventaja de este método es que incluso con las mallas más grandes ensayadas se obtienen resultados precisos.
- XFEM arroja unos resultados aceptables desde el punto de vista numérico, sin embargo su coste computacional es muy superior al resto de métodos lo cual no lo hace aconsejable para este tipo de ensayo. Además de las mallas utilizadas solo las inferiores a $0,3\text{ mm}$ dan resultados certeros, lo cual hace que el coste computacional para obtener simulaciones validas sea mayor.
- CZM ha ocasionado problemas para las mallas de $0,3\text{ mm}$ y $0,2\text{ mm}$. Ofrece los peores resultados dentro de los métodos simulados, aunque su coste computacional es inferior al de XFEM.
- En las tablas de comparación realizadas para cada método se observan dos importantes factores, la evolución de grieta y la fuerza aplicada para cierto desplazamiento. En el caso de la evolución de propagación de grieta se puede ver como es muy similar para VCCT y CZM aunque para XFEM la grieta

propaga más rápido. La fuerza necesaria cobra sentido al comprobarse que para propagaciones de grietas menores se necesita menos fuerza aplicada y para propagaciones mayores se necesita más.

REFERENCIAS

- [1] John C. Halpin, 1992, Primer on Composite Materials Analysis-Second Edition, Revised. CRC Press.
- [2] F. París, J. Cañas, J. C. Marín y A. Barroso, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, 2008.
- [3] A. Salinas Hernández, Fabricación y caracterización de laminados de material compuesto a partir de láminas ultradelgadas, Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2016.
- [4] P.P. Camanho, C.G. Davila y M.F Moura, Numerical Simulation of Mixed-mode Progressive Delamination in Composite Materials. Composite Materials, Vol. 37, 2003.
- [5] A. Turon, P.P. Camanho, J. Costa y C.G. Davila, A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. Mechanics of Materials, Vol. 38, pp. 1072–1089, 2006.
- [6] J.R. Reeder y J.R. Crews Jr, Mixed-Mode Bending Method for Delamination Testing. AIAA Journal, Vol. 28, pp.1270–1276, 1990.
- [7] G. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp.361–364, 1957.
- [8] E.F. Rybicki y M.F Kanninen, A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp.931–938, 1977.
- [9] I.S. Raju, Calculation of strain-energy release rates with higher order and singular finite elements. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, pp.251–274, 1987.
- [10] M.L. Benzeggagh y M. Kenane, Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. Composites Science and Technology, Vol. 56, pp.439–449, 1995.
- [11] G. Hattori, R. Rojas-Díaz, A. Sáez, F. García-Sánchez, N. Sukumar, El método de los elementos finitos extendidos (x-fem) para medios bidimensionales fisurados totalmente anisótropos. Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 2, pp.451-455, 2011.

- [12] T. Belytschko y T. Black, Elastic Crack Growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, Vol. 45, pp.601-620, 1999.
- [13] N. Möes, J. Dolbow y T. Belytschko, A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, Vol. 46, pp.131-150, 1999.
- [14] ABAQUS, "Abaqus Analysis User's Manual", Consultado 06 de Julio de 2019, versión en línea.
- [15] D.S. Dugdale, Yielding in steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.8, pp.100–104, 1960.
- [16] G.I. Barenblatt, The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. In: *Advances in Applied Mechanics* (edited by H.L. Dryden and T. Von Karman) Academic Press, pp. 55–129, 1962.
- [17] D. Castillo González, Implementación de un modelo de interfase en el programa de elementos finitos ABAQUS. Aplicación a materiales compuestos, Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla, 2014.
- [18] ABAQUS, "Abaqus theory guide", Consultado 08 de Julio de 2019, versión en línea.
- [19] S.R. Hallett, B.G. Green, W.G. Jiang, M.R. Wisnom, An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.40, pp.613–624, 2009.
- [20] F. París, Teoría de la elasticidad, 3ª Edición, 2005.
- [21] L. Vicente del Estad, Determinación de la tenacidad a la fractura en probetas con grietas de esquina, Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla, 2013.