

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales
Mención en Materiales

Estudio de fallo no convencional en laminados
[0,90n]s: Caracterización del fallo en la lámina de 90 a
partir de la Mecánica de la Fractura de Grietas de
Interfase

Autor: Alejandro López Olmedo

Tutor: Elena Correa Montoto

Federico París Carballo

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Estudio de fallo no convencional en laminados
[0,90_n]s: Caracterización del fallo en la lámina de
90 a partir de la Mecánica de la Fractura de Grietas
de Interfase**

Autor:

Alejandro López Olmedo

Tutor:

Elena Correa Montoto

Federico París Carballo

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de fallo no convencional en laminados [0,90n]s: Caracterización del fallo en la lámina de 90 a partir de la Mecánica de la Fractura de Grietas de Interfase

Autor: Alejandro López Olmedo

Tutor: Elena Correa Montoto
Federico París Carballo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi abuela,

Agradecimientos

A Elena, por tantas horas de dedicación, tan buena disposición en todo momento y tanto interés en hacer bien cada detalle del trabajo, haciendo que haya aprendido tanto de este trabajo. A Federico, por su tan útil perspectiva guiándome en el trabajo y por haberme despertado el interés en esta materia tan bonita. A Alejandro, por ser un tutor más y haberme dedicado tanto tiempo en cada quebradero de cabeza que ha surgido con el programa.

A mis padres y a mi hermano, por creer en mí y darme un apoyo y ayuda incondicionales en todo momento. A mi abuela, por enseñarme tanto de su forma de ver la vida y afrontar las dificultades.

A mis amigos de Sevilla, por haber sido un apoyo fundamental en la carrera, en los momentos buenos y en los difíciles, haciendo que haya disfrutado tanto estos cuatro años. A mis amigos de Granada, especialmente a Marta y Elena, por el apoyo incondicional durante tantos años y por tan buenos momentos.

A todos, simplemente gracias.

Resumen

En el presente trabajo se hace un estudio de un fallo no convencional que se ha observado experimentalmente en diferentes situaciones para un ensayo de tracción de un laminado de material compuesto de fibra de carbono [0₂,90,0₂]. El fallo consiste en una grieta transversal a la capa de 90 grados, con una dirección de 45 grados, con presencia de grandes grietas de delaminación. Lo normal y esperable sería que este fallo hubiera aparecido a 90 grados.

Para ello, se ha simulado el ensayo de tracción del material compuesto, a través de sucesivos modelos, mediante el software Abaqus/CAE, que emplea el Método de Elementos Finitos, y se ha hecho uso de magnitudes propias de la Mecánica de la Fractura.

En concreto, se ha estudiado la generación de dicho daño no convencional desde dos puntos de vista. El primero de ellos ha sido como un daño progresivo, haciendo uso del índice de liberación de energía. Se han modelado los elementos observados experimentalmente (grieta de delaminación y grieta transversal a la capa de 90 grados) y se ha estudiado el efecto de la orientación y longitud de la grieta, del espesor de la capa de 90 grados y de la temperatura de curado. El segundo de ellos ha sido como un daño explosivo, haciendo uso del trabajo total liberado. Se ha modelado el daño transversal a la capa de 90 grados y se ha estudiado el efecto de la orientación del daño y del espesor de la capa de 90 grados.

Con ello se busca comprender el origen de este daño observado experimentalmente que no se puede explicar a priori.

En el caso del daño progresivo, se ha concluido que la aparición del daño en la lámina de 90 grados tendría una propagación inestable y se han obtenido indicios de la explicación de la aparición del daño en el laminado de los espesores observados experimentalmente, en ambos casos sin la presencia de la grieta de delaminación. No se han observado evidencias claras de la explicación de la dirección de la grieta transversal observada, ni partiendo de una grieta de delaminación, ni partiendo del daño en la lámina de 90 grados.

En el caso de daño explosivo, no se han obtenido evidencias claras de la explicación ni de la orientación observada, ni del espesor para el que se ha observado el daño.

Abstract

In the current work, a study of a non-conventional failure that has been experimentally observed in different situations when performing a tensile test of a $[0_2,90,0_2]$ carbon fiber composite laminate is presented. The failure consists of a crack in the 90 degrees layer, with an orientation of 45 degrees, also appearing large delamination cracks. The usual and expected event would have been that this failure would have occurred at 90 degrees.

In order to do it, the composite test has been simulated, through successive models, using the Abaqus/CAE software, which applies the Finite Element Method, and magnitudes belonging to Fracture Mechanics has been analysed.

In particular, it has been studied the origin of the previously mentioned damage under two different perspectives. In the first one it has been modelled as a progressive damage, using the energy release rate. The experimentally observed elements (delamination crack and crack in the 90 degrees layer) have been modelled and it has been studied the effect of the crack orientation and length, the effect of the thickness of the 90 degrees layer and the effect of the curing temperature. In the second one the damage has been modelled as explosive, using the global released work. It has been modelled the transverse damage to the 90 degrees layer and it has been studied the effect of the damage orientation and the effect of the thickness of the 90 degrees layer.

The main goal with it is understanding the origin of the experimentally observed damaged, which can't be explained a priori.

In the case of progressive damage, it has been concluded that the appearance of a damage in the 90 degrees layer would have an unstable propagation and evidences have been obtained about the presence of the damage in the laminate of the experimentally observed thicknesses, in both cases without the delamination crack. It has not been observed clear evidences about the reason of the observed direction of the transversal crack, neither with the origin of the delamination crack, nor with the damage in the 90 degrees layer.

In the case of the explosive damage, it has not been obtained clear evidences of the explanation neither for the observed orientation, nor for the thicknesses in which the damage has been observed.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
ÍNDICE DE TABLAS	17
ÍNDICE DE FIGURAS	19
1 Introducción	1
1.1. Contexto y motivación	1
1.1.1 Terminología y conceptos fundamentales en materiales compuestos	1
1.1.2 Importancia y uso de los materiales compuestos	2
1.1.3 Motivación	3
1.2. Objetivo	7
2 Métodos y Herramientas	9
2.1. Método de Elementos Finitos (MEF) y Abaqus	9
2.1.1 Método de Elementos Finitos	9
2.1.2 Abaqus CAE	10
2.2. Mecánica de la Fractura y herramienta VCCT	10
2.2.1 Mecánica de la Fractura	10
2.2.2 Herramienta VCCT	13
2.3. Limitaciones del MEF para el entorno de la punta de la grieta	15
2.4. Escalas de estudio de materiales compuestos. Escala mesomecánica	16
2.5. Materiales	17
3 Modelado	11
3.1 Descripción de la geometría y el modelado comunes a todos los modelos	11
3.1.1 Geometría	11
3.1.2 Materiales	11
3.1.3 Ejes locales y globales	13
3.1.4 Secciones	13
3.1.5 Pasos de carga	13
3.1.6 Condiciones de contorno	13
3.1.7 Decremento térmico	14
3.1.8 Restricciones a los grados de libertad	15
3.1.9 Interacciones. Contacto con VCCT	15
3.1.10 Mallado	15
3.2. Modelos	16
3.2.1 Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0°-90°	16

3.2.2	Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90°	18
3.2.3	Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°	23
3.2.4	Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central	25
3.2.5	Modelo 5. Estudio de variación de W en daño explosivo con el espesor de la capa de 90° y con el ángulo de la grieta	27
3.2.6	Efecto de la temperatura de curado	30
4	Resultados	31
4.1.	<i>Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0°-90°</i>	<i>31</i>
4.1.1	Condición de contorno en desplazamientos	31
4.1.2	Condición de contorno en tensiones	33
4.2.	<i>Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90°</i>	<i>38</i>
4.2.1	Resultados frente izquierdo	42
4.2.2	Resultados frente derecho	43
4.2.3	Comparación de resultados de frente izquierdo y derecho	45
4.3.	<i>Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°</i>	<i>46</i>
4.3.1	Resultados frente izquierdo	47
4.4.	<i>Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central</i>	<i>48</i>
4.4.1	Resultados frente izquierdo	49
4.5.	<i>Modelo 5. Estudio de variación de W por ud. de longitud de la grieta en daño explosivo con el espesor de la capa de 90°</i>	<i>51</i>
4.4.2	Resultados de la componente tangencial de W	54
4.4.3	Resultados de la componente normal de W	54
4.4.4	Resultado de la suma de componentes de W	55
4.4.5	Comparación de resultados	55
4.6.	<i>Efecto de la temperatura de curado</i>	<i>59</i>
4.7.1	Efecto de la temperatura de curado en Modelo 1	59
4.7.2	Efecto de la temperatura de curado en Modelo 2	64
4.7.3	Efecto de la temperatura de curado en Modelo 3	69
4.7.4	Efecto de la temperatura de curado en Modelo 4	71
4.7.5	Efecto de la temperatura de curado en Modelo 5	72
4.7.	<i>Validación de resultados. Test de convergencia de malla</i>	<i>83</i>
4.7.6	Validación del Modelo 1	84
4.7.7	Validación de los Modelos 2, 3 y 4	84
4.7.8	Validación del Modelo 5	90
4.10		93
5	Conclusiones y Desarrollos Futuros	93
5.1.	<i>Conclusiones</i>	<i>93</i>
5.1.1	Modelo 1 y efecto de la temperatura de curado	93
5.1.2	Modelo 2 y efecto de la temperatura de curado	94
5.1.3	Modelo 3 y efecto de la temperatura de curado	95
5.1.4	Modelo 4 y efecto de la temperatura de curado	95
5.1.5	Modelo 5 y efecto de la temperatura de curado	96
5.1.6	Conclusiones sobre el uso de la herramienta VCCT	97
5.2.	<i>Desarrollos futuros</i>	<i>98</i>
Referencias		99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 . Dimensiones de las probetas del laminado $[0_2,90,0_2]$ ensayadas al 80% de la carga de rotura. [6]	4
Tabla 1.2. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado $[0_2,90,0_2]$. [6]	4
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la lámina equivalente ortótropa. 1 se refiere a la dirección de las fibras, 2 y 3 se refieren a direcciones perpendiculares a las fibras	17
Tabla 2.2. Propiedades térmicas de la lámina equivalente ortótropa. 1 se refiere a la dirección de las fibras, 2 y 3 se refieren a direcciones perpendiculares a las fibras	18
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del material que modela las láminas a 0°	12
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material que modela las láminas de 90°	12
Tabla 3.3. Propiedades térmicas del material que modela las láminas de 0°	12
Tabla 3.4. Propiedades térmicas del material que modela las láminas de 90°	13
Tabla 3.5. Nomenclatura de los Submodelos del Modelo 5	27
Tabla 4.1. G_I y G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos y VCCT en ambos frentes	32
Tabla 4.2. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos	33
Tabla 4.3. G_I y G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y VCCT en frente derecho	34
Tabla 4.4. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones	35
Tabla 4.5. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψG) para Modelo 2 en frente izquierdo	42
Tabla 4.6. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψG) para Modelo 2 en frente derecho	44
Tabla 4.7. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψG) para Modelo 3 en frente izquierdo	47
Tabla 4.8. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 4 en frente izquierdo	49
Tabla 4.9. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo (MPa*mm) por unidad de longitud de la grieta para el Modelo 5	54
Tabla 4.10. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5	55
Tabla 4.11. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5	55
Tabla 4.12. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1.T+Desp.	61
Tabla 4.13. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1.T+Tens.	62
Tabla 4.14. Estudio de la variación de las magnitudes implicadas en el cálculo del índice de liberación de energía	

al introducir el decremento térmico en el modelo	69
Tabla 4.15. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T	76
Tabla 4.16. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.	76
Tabla 4.17. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T	76
Tabla 4.18. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.	77
Tabla 4.19. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5.T	77
Tabla 4.20. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.	77
Tabla 4.21. Estudio de la variación de las variables normales involucradas en el cálculo del trabajo normal liberado por daño explosivo al incluir el decremento térmico en el modelo	80
Tabla 4.22. Estudio de la variación de las variables tangenciales involucradas en el cálculo del trabajo tangencial liberado por daño explosivo al incluir el decremento térmico en el modelo	82
Tabla 4.23. Test de convergencia de malla de G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones para una longitud de grieta a de 1,875 mm	84
Tabla 4.24. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo no refinado	86
Tabla 4.25. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo refinado	86
Tabla 4.26. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Variación porcentual entre resultados de modelo basto y refinado	87
Tabla 4.27. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo no refinado	88
Tabla 4.28. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo refinado	88
Tabla 4.29. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Variación porcentual entre resultados de modelo refinado y basto	89
Tabla 4.30. Test de convergencia de tamaño de malla de G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 2 para ángulo α de 45° en frente izquierdo	89
Tabla 4.31. Test de convergencia de simetría de malla de G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 2 para ángulo α de 45° en frente izquierdo	90
Tabla 4.32. Test de convergencia de malla del Modelo 5	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diferentes tipos de materiales compuestos [2]	1
Figura 1.2. Esquema de laminado con orientaciones a 0° , 45° , 90° y -45° [3]	2
Figura 1.3. Evolución del porcentaje en peso de materiales compuestos en aviones de la compañía Airbus [4]	3
Figura 1.4. $[0_2,90,0_2]$. Probeta 12. (a)-(d) Grietas transversales y delaminaciones a x200 [6]	5
Figura 1.5. $[0_2,90,0_2]$: Probeta 13. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200 [6]	6
Figura 2.1. Etapas de modelado mediante MEF [9]	10
Figura 2.2. Modos de Fractura [12]	11
Figura 2.3. Esquema global de trabajo liberado en daño explosivo en componente normal. En la Imagen (A) se muestra el sólido sin grieta de donde se obtienen las tensiones σ . En la Imagen (B) se muestra el sólido con la grieta totalmente abierta de donde se obtienen los desplazamientos relativos entre los labios.	12
Figura 2.4. Propagación de grieta en sólido discretizado para el MEF en Modo I para el cálculo de G mediante el criterio VCCT [14]	14
Figura 2.5. Esquema de las magnitudes necesarias para el cálculo del índice de liberación de energía G mediante el criterio VCCT [14]	14
Figura 2.6. Sólido con grieta bajo tensión en dos direcciones [11]	15
Figura 2.7. Solución analítica de Westergaard de la tensión en la punta de la grieta en la dirección de la grieta x para $a=1$ y $\sigma=1$ [11]	15
Figura 2.8. Esquema de una lámina y sus componentes (fibra y matriz) desde un enfoque Micromecánico	16
Figura 2.9. Esquema de un laminado y sus láminas que la componen desde un enfoque Macromecánico	17
Figura 3.1. Esquema general del modelo	11
Figura 3.2. Esquema de las condiciones de contorno para evitar el desplazamiento como sólido rígido	14
Figura 3.3. Esquema de las condiciones de contorno del ensayo de tracción	14
Figura 3.4. Esquema del Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0° - 90°	16
Figura 3.5. Esquema de los <i>Part</i> utilizados en el Modelo 1	16
Figura 3.6. Vista general de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm	17
Figura 3.7. Vista de semidetalle de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm	17
Figura 3.8. Vista de detalle de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm	18

Figura 3.9. Esquema general del Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90°. El tamaño de la grieta se ha exagerado para hacerla visible	18
Figura 3.10. Esquema de los <i>Part</i> empleados en el Modelo 2	19
Figura 3.11. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 0°	19
Figura 3.12. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 15°	19
Figura 3.13. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 30°	19
Figura 3.14. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 45°	19
Figura 3.15. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 60°	20
Figura 3.16. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 75°	20
Figura 3.17. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 90°	20
Figura 3.18. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45°. Vista general	20
Figura 3.19. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45°. Vista general ampliada. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas	21
Figura 3.20. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45°. Vista de semidetalle. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas	21
Figura 3.21. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45°. Vista de detalle. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas	22
Figura 3.22. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45°. Vista de detalle ampliada. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas. Se muestra el frente izquierdo	22
Figura 3.23. Esquema general Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°	23
Figura 3.24. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 3	23
Figura 3.25. Mallado de Modelo 3. Vista general	24
Figura 3.26. Mallado de Modelo 3. Vista general ampliada	24
Figura 3.27. Mallado de Modelo 3. Vista de detalle	25
Figura 3.28. Mallado de Modelo 3. Vista de detalle ampliada	25
Figura 3.29. Esquema Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central. La longitud de la grieta se ha exagerado para hacerla visible	26
Figura 3.30. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de 90° <i>e</i> de 0,095 mm	26
Figura 3.31. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de 90° <i>e</i> de 0,19 mm	26
Figura 3.32. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de 90° <i>e</i> de 0,38 mm	26
Figura 3.33. Esquema de Modelo 5. Estudio de variación de W en daño explosivo con el espesor de la capa de 90° <i>h</i> y el ángulo de la diagonal β	27
Figura 3.34. Esquema de los <i>Part</i> empleados en el Modelo 5	28
Figura 3.35. Particiones geométricas del Modelo 5.038.30 Vista general	28
Figura 3.36. Particiones geométricas del Modelo 5.038.45 Vista general	28
Figura 3.37. Particiones geométricas del Modelo 5.038.60 Vista general	29
Figura 3.38. Particiones geométricas del Modelo 5.019.45. Vista de detalle	29
Figura 3.39. Mallado del Modelo 5 para un espesor de la capa de 90° <i>h</i> de 0,19 mm. Vista general	29
Figura 3.40. Mallado del Modelo 5 para un espesor de la capa de 90° <i>h</i> de 0,19 mm. Vista de detalle	30

Figura 4.1. Indeformada del Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos	32
Figura 4.2. Deformada del Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos	32
Figura 4.3. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm	33
Figura 4.4. Deformada de Modelo 1 con una longitud de grieta a de 0,02 mm con condición de contorno en tensiones	34
Figura 4.5. G_{II} con la longitud de grieta a para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y VCCT en frente derecho	34
Figura 4.6. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm	35
Figura 4.7. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones. Vista global	36
Figura 4.8. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones. Vista ampliada	36
Figura 4.9. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 1,875 mm. Vista general	37
Figura 4.10. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 1,875 mm. Vista de detalle	37
Figura 4.11. Deformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm	38
Figura 4.12. Mapa de tensiones circunferenciales (MPa) sobre indeformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Vista general	38
Figura 4.13. Mapa de tensiones circunferenciales (MPa) sobre indeformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Vista de detalle	38
Figura 4.14. Deformada de la grieta del Modelo 2 para un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la grieta	39
Figura 4.15. Deformada de la punta de la grieta para Modelo 2 para un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta	39
Figura 4.16. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista general	40
Figura 4.17. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la grieta	40
Figura 4.18. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Visión de detalle de la punta de la grieta. Frente izquierdo	40
Figura 4.19. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista general	41
Figura 4.20. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la grieta	41
Figura 4.21. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la punta de la grieta	41
Figura 4.22. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 2 en frente izquierdo	43
Figura 4.23. Mixicidad para Modelo 2 en frente izquierdo	43

Figura 4.24. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 2 en frente derecho	44
Figura 4.25. Mixicidad para Modelo 2 en frente derecho	45
Figura 4.26. Comparación de resultados de G_I y G_{II} en Modelo 2 para ambos frentes de grieta	45
Figura 4.27. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista general	46
Figura 4.28. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista de detalle de la grieta	46
Figura 4.29. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta	47
Figura 4.30. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 3 en frente izquierdo	47
Figura 4.31. Deformada del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm. Vista general	48
Figura 4.32. Deformada de la grieta del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm	48
Figura 4.33. Deformada de la punta de la grieta del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm	49
Figura 4.34. G_I y G_{II} para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista general	49
Figura 4.35. G_{total} y para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada	50
Figura 4.36. G_I y G_{II} para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada	50
Figura 4.37. G_{total} y para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada	50
Figura 4.38. Deformada del Submodelo 5.019.45A	51
Figura 4.39. Deformada del Submodelo 5.019.45B. Vista general	51
Figura 4.40. Deformada del Submodelo 5.019.45B. Vista de detalle	52
Figura 4.41. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista general	52
Figura 4.42. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista de detalle	52
Figura 4.43. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista de detalle	53
Figura 4.44. Mapa de desplazamientos tangenciales u_t (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista general	53
Figura 4.45. Mapa de desplazamientos tangenciales u_t (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista de detalle	53
Figura 4.46. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista general	54
Figura 4.47. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista de detalle	54
Figura 4.48. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 30° para diferentes espesores para el Modelo 5	56
Figura 4.49. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5	56
Figura 4.50. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 60° para diferentes espesores para el Modelo 5	56
Figura 4.51. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 90° para diferentes espesores para el Modelo 5	57
Figura 4.52. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,095 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5	57

Figura 4.53. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5	58
Figura 4.54. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5	58
Figura 4.55. Trabajo liberado por daño explosivo para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5	59
Figura 4.56. Deformada del Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm	60
Figura 4.57. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm. Vista general	60
Figura 4.58. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm. Vista general	60
Figura 4.59. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1.T+Desp. y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm	61
Figura 4.60. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1.T+Tens. y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm	62
Figura 4.61. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1.T+Tens.	62
Figura 4.62. Comparación de la tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° entre el Modelo 1 y el Modelo 1.T+Desp.	63
Figura 4.63. Comparación de la tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° entre el Modelo 1 y el Modelo 1.T+Tens.	63
Figura 4.64. Deformada del Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°	64
Figura 4.65. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista general	64
Figura 4.66. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista de detalle de la grieta	65
Figura 4.67. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta	65
Figura 4.68. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista general	65
Figura 4.69. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista de detalle de la grieta	65
Figura 4.70. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°. Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta	66
Figura 4.71. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 2.T en frente izquierdo	66
Figura 4.72. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 2.T+Desp. en frente izquierdo	67
Figura 4.73. Comparación de G_I y G_{II} y G_{total} entre Modelo 2 y Submodelo 2.T+Desp. en frente izquierdo	67
Figura 4.74. Deformación longitudinal E_{xx} del Modelo 2.T para un ángulo de la grieta de 45°	68
Figura 4.75. Deformación E_{yy} transversal del Modelo 2.T para un ángulo de la grieta de 45°	68
Figura 4.76. Deformada del Submodelo 3.T para una longitud de grieta de 0,02 mm	69
Figura 4.77. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 3.T en frente izquierdo	70
Figura 4.78. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 3.T+Desp. en frente izquierdo	70
Figura 4.79. Comparación de G_I y G_{II} y G_{total} entre Modelo 3 y Submodelo 3.T+Desp. en frente izquierdo	70

Figura 4.80. Deformada del Submodelo 4.T para un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm	71
Figura 4.81. G_I y G_{II} para Submodelo 4.T en frente izquierdo. Vista de detalle	71
Figura 4.82. G_I y G_{II} para Submodelo 4.T+Desp. en frente izquierdo	72
Figura 4.83. Comparación de G_I y G_{II} entre Modelo 4 y Submodelo 4.T+Desp. en frente izquierdo. Vista general	72
Figura 4.84. Deformada del Submodelo 5.019.45A.T	73
Figura 4.85. Deformada del Submodelo 5.019.45B.T. Vista general	73
Figura 4.86. Deformada del Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle	73
Figura 4.87. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T Vista general	73
Figura 4.88. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T Vista de detalle de la diagonal	74
Figura 4.89. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T. Vista general	74
Figura 4.90. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T. Vista de detalle de la diagonal	74
Figura 4.91. Mapa de desplazamientos tangenciales u_t (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista general	74
Figura 4.92. Mapa de desplazamientos tangenciales u_t (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle	75
Figura 4.93. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista general	75
Figura 4.94. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle	75
Figura 4.95. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5.T	78
Figura 4.96. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5.T+Desp	78
Figura 4.97. Comparación del trabajo liberado por unidad de longitud de la grieta por daño explosivo para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores entre el Modelo 5, y el Modelo 5.T+Desp	78
Figura 4.98. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5.T	79
Figura 4.99. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5.T+Desp	79
Figura 4.100. Comparación de trabajo liberado por unidad de longitud de la grieta por daño explosivo para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta entre el Modelo 5 y el Modelo 5.T+Desp	80
Figura 4.101. Test de convergencia de tamaño de malla. Modelo inicial	85
Figura 4.102. Test de convergencia de tamaño de malla. Modelo refinado	85
Figura 4.103. Malla del modelo inicial del test de convergencia de malla del Modelo 5	90
Figura 4.104. Malla del modelo refinado del test de convergencia de malla del Modelo 5	91

1 INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos ofrecen posibilidades muy interesantes para la mejora de las propiedades y la sustitución de materiales más pesados en muchos ámbitos de la industria. Es por ello que, en los últimos años, se ha producido un gran avance en la investigación e implementación industrial de estos materiales. En este trabajo se busca profundizar en la comprensión del comportamiento de estos materiales en base al estudio de un caso concreto de fallo no convencional, aparentemente sin explicación.

En el presente capítulo se hace una descripción del concepto de material compuesto, se pone de manifiesto su relevancia y uso en la industria, así como las motivaciones y los objetivos del presente trabajo.

1.1. Contexto y motivación

1.1.1 Terminología y conceptos fundamentales en materiales compuestos

Aunque el concepto de material compuesto es amplio y ha sufrido diversas revisiones, se suele definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material [1]. El material compuesto tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material.

Según la mejora de propiedades concretas que se busque, se diseñarán los materiales y geometría del refuerzo dando lugar a los dos grandes grupos de materiales compuestos reforzados con partículas o con fibras como se muestra en la Figura 1.1. Debido a sus excelentes propiedades mecánicas, los reforzados con fibras son los más extendidos en la industria y los que se abordarán en el presente estudio.

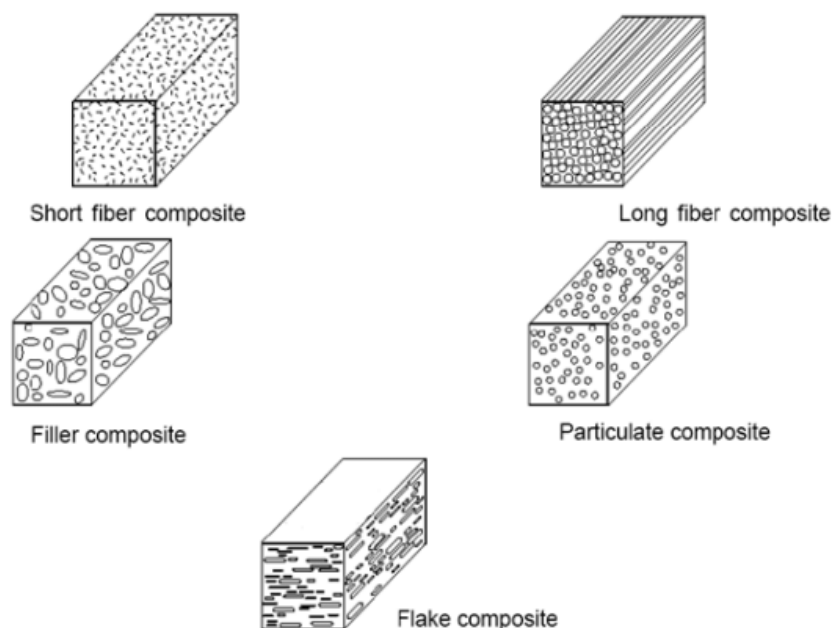


Figura 1.1. Diferentes tipos de materiales compuestos [2]

En los materiales compuestos reforzados con fibras, estas actúan absorbiendo la mayor parte de la carga ya que debido a su pequeña sección transversal, la presencia de defectos es mucho menor y la resistencia mecánica es

muy alta. La matriz tiene la función de dar cohesión al material y aglutinar las fibras, transmitiendo la carga entre ellas. [1]

En algunas de sus aplicaciones, las fibras usadas en los materiales compuestos son continuas y se disponen en láminas de pequeño espesor que se apilan unas sobre otras, dando lugar a laminados en los que se combinan diferentes orientaciones de estas fibras, buscando mejorar las propiedades mecánicas en determinadas direcciones según la aplicación concreta. Un ejemplo de este tipo de material compuesto se muestra en la Figura 1.2. En el presente estudio se trata este tipo de material compuesto, un laminado.

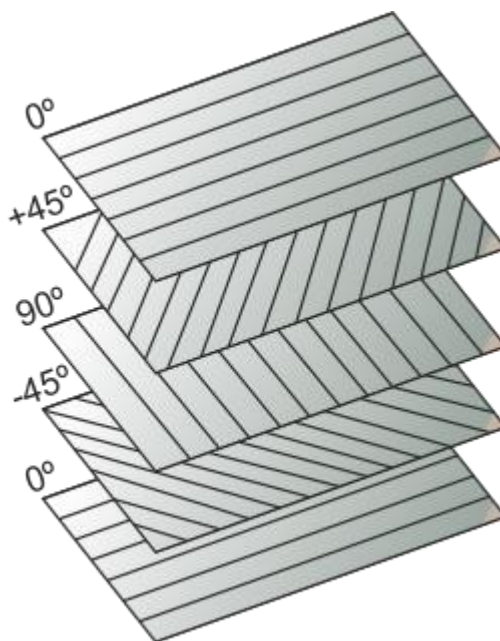


Figura 1.2. Esquema de laminado con orientaciones a 0°, 45°, 90° y -45° [3]

Cabe destacar que la estructura de los materiales compuestos reforzados con fibra es heterogénea y anisótropa. La heterogeneidad implica que las propiedades del material son función de punto y la anisotropía implica que además es función de la dirección a la que se refiera.

En cuanto a los materiales, aunque existe una gran variedad de ellos, por su uso más extendido, en el presente trabajo se referirá a fibra de carbono y matriz de epoxy.

1.1.2 Importancia y uso de los materiales compuestos

Como se ha comentado, en el presente trabajo se considerarán materiales compuestos de fibra de carbono con matriz de epoxy. Estos materiales presentan unas rigideces y resistencias específicas, relativas al peso, muy superiores a los materiales metálicos convencionales. Sin embargo, presentan inconvenientes, debido a su comportamiento y procesos de fabricación mucho más complejos que dan lugar a procesos de diseño, fabricación y puesta en servicio muy costosos que limitan su uso extensivo.

Por ello, solamente en situaciones en que el factor peso juega un papel muy importante (por ejemplo, en ingeniería del espacio) o el precio no es un obstáculo (por ejemplo, en aplicaciones deportivas), o el procedimiento de fabricación está bastante afinado (por ejemplo, en elementos de revolución), es cuando los materiales compuestos han irrumpido en el mercado con carácter extensivo. [1]

Un ejemplo muy ilustrativo de la importancia del uso de los materiales es el creciente uso de estos que se da en la industria aeroespacial, como se muestra en la Figura 1.3.

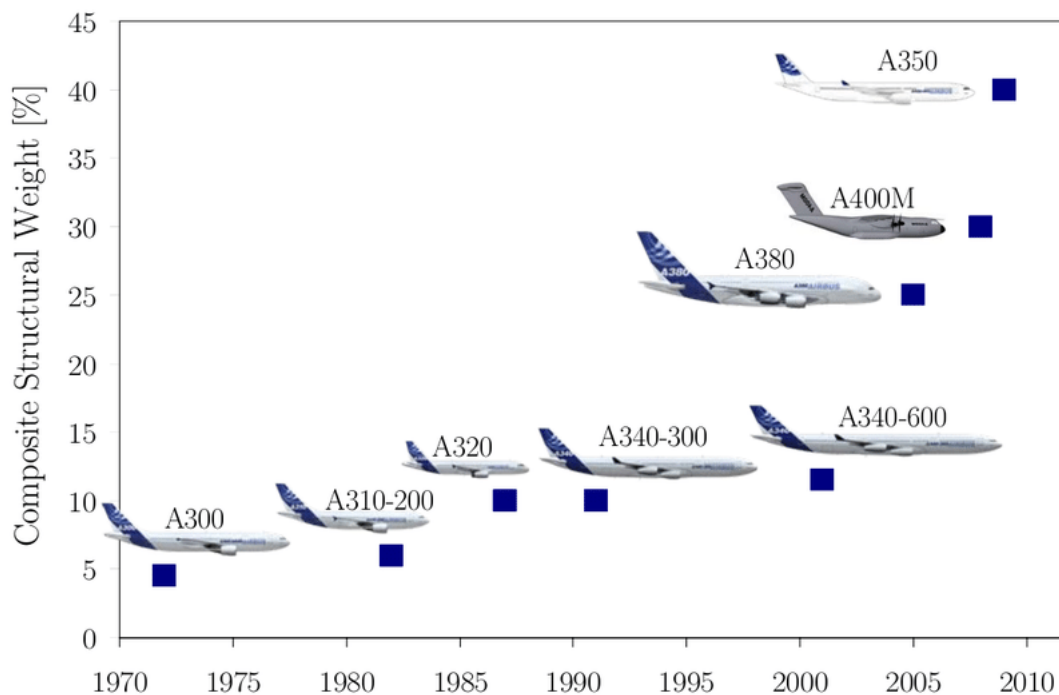


Figura 1.3. Evolución del porcentaje en peso de materiales compuestos en aviones de la compañía Airbus [4]

1.1.3 Motivación

Una de las líneas de investigación más importantes del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM), perteneciente al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Sevilla se centran en el estudio de materiales compuestos reforzados con fibra, dada la importancia y auge del uso de estos materiales en aplicaciones ingenieriles experimentado durante los últimos años.

Con el desarrollo de estos materiales surge la necesidad de establecer unas leyes que permitan determinar su comportamiento y criterios de fallo del material. Aunque se ha avanzado mucho, desde criterios basados en el comportamiento de materiales metálicos a criterios más complejos que tienen en cuenta el fallo de cada uno de sus componentes, tanto matriz como fibra, todavía no se ha llegado a una ley definitiva, por lo que sigue siendo una línea de investigación abierta en la que se enmarca el presente trabajo. Hay que tener en cuenta que la propia naturaleza de estos materiales hace difícil la predicción del fallo, pudiéndose atribuir a distintas causas: la heterogeneidad y anisotropía de sus componentes, la diversidad de geometrías que pueden formar un laminado con las diferentes orientaciones que se pueden dar a las láminas o las distintas secuencias de apilado, los posibles defectos de fabricación, etc. La alta complejidad de los mecanismos de fallo de estos materiales está asociada, por tanto, a la microestructura a diferentes escalas e incluso a la interacción entre ellas.

En este contexto, en el presente trabajo se busca estudiar y comprender mediante simulaciones numéricas un fallo no convencional y sin una explicación clara a priori observado experimentalmente en un laminado. En concreto, el fallo observado, antecedente de este trabajo, se enmarca en los resultados experimentales obtenidos en diferentes trabajos del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) asociados al estudio del efecto escala [5].

En concreto se trata la situación llevada a cabo en el estudio experimental [6] en el que se han cargado las probetas de un laminado $[0_2, 90, 0_2]$ al 80% de la carga de rotura y, a partir de aquí, se ha realizado un incremento gradual de la carga con control en desplazamientos a una velocidad de 0.2 mm/min. En la Tabla 1.1 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado ensayadas en las que ha aparecido el fallo no convencional. En la Tabla 1.2 se recogen las cargas a las que han sido ensayadas cada una de las muestras.

Tabla 1.1 . Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] ensayadas al 80% de la carga de rotura. [6]

Número Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
12	1,0567	14,3933	15,2534
13	1,0467	14,2433	14,9520

Tabla 1.2. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0₂,90,0₂]. [6]

Número Probeta	Carga Ensayo (N)	Porcentaje de la carga de rotura (%)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Aviso sonoro
12	14607,09	74,96	0,3906	0,78	SI (1,260 toneladas)
13	14322,6	73,5	0,4302	0,86	SI(1,256 toneladas)

Tal y como se observa en la Figura 1.4 y Figura 1.5 se trata de un daño generalizado, en el que aparecen grandes delaminaciones entre las láminas a 0 grados y las láminas a 90 grados, y en el que todas las grietas aparecen inclinadas formando un ángulo aproximado de 45 grados con respecto a la dirección de aplicación de la carga. Además, en ambas probetas existía una alta densidad de grietas.

Hay que destacar el hecho de que cuando se encontró el daño ya se había producido el primer aviso sonoro de daño (en la Tabla 1.2 y Tabla 2.1 se da el valor numérico en toneladas de la carga a la que se escuchó). Esto hace que no se conozca si han ocurrido antes las delaminaciones o las grietas transversales a 45 grados. Esta consideración será importante a la hora de determinar el modelado para la simulación.

Como se puede observar, estos fallos son no convencionales ni esperables, ya que habitualmente se producen daños transversales perpendiculares a la dirección de aplicación de carga, con aparición posterior de delaminaciones entre las capas de 0 y 90 grados. En este caso, las observaciones experimentales muestran que no es así, ya que los daños transversales forman 45 grados con la dirección de aplicación de carga y las grandes delaminaciones sugieren que estas pudieran haberse producido anteriormente a los daños transversales.

Así mismo, cabe destacar el hecho de que este fallo no convencional con grietas a 45 grados solo se ha observado par este laminado [0₂,90,0₂], no así para otros espesores de capas.

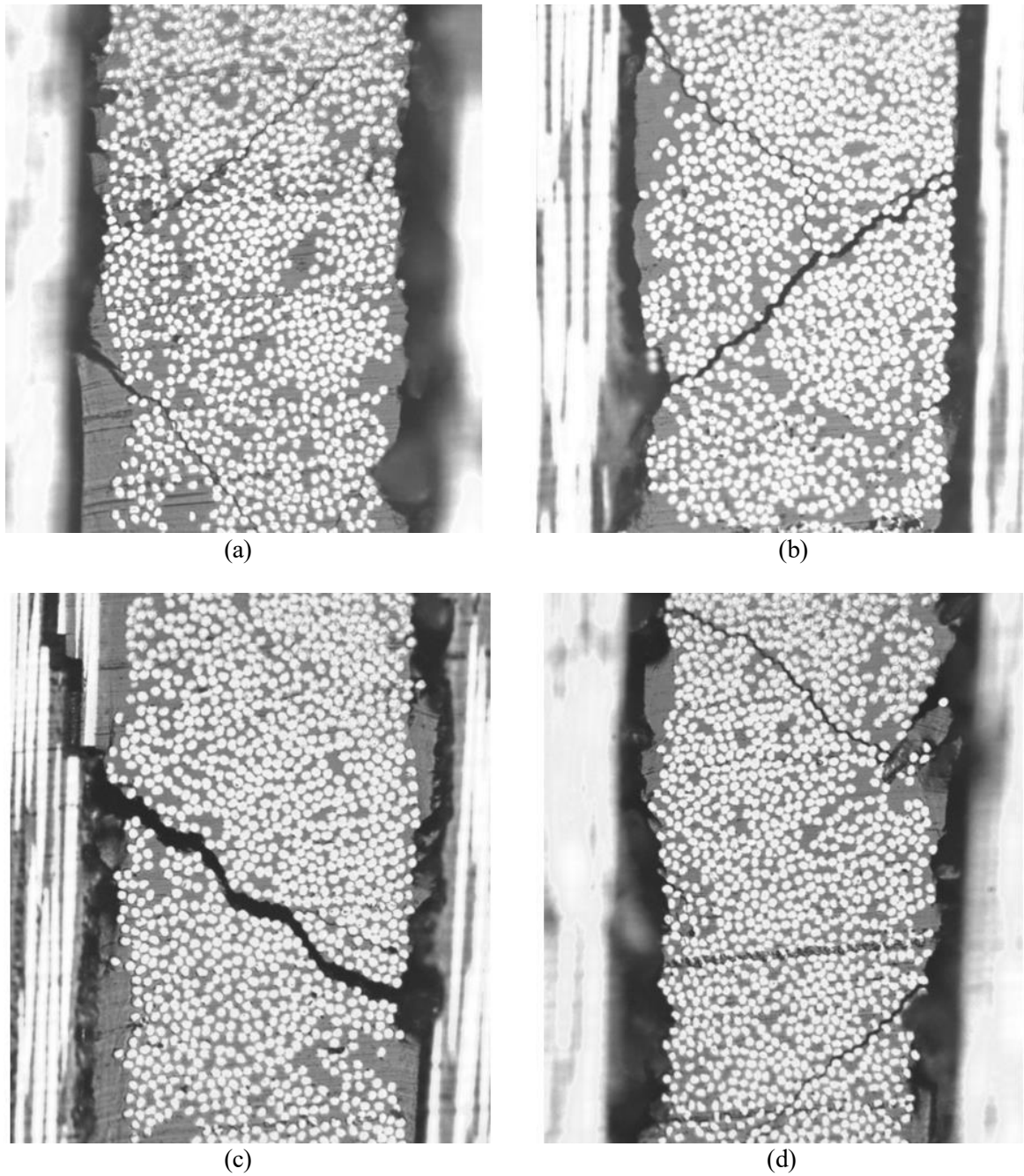


Figura 1.4. [0₂,90,0₂]. Probeta 12. (a)-(d) Grietas transversales y delaminaciones a x200 [6]

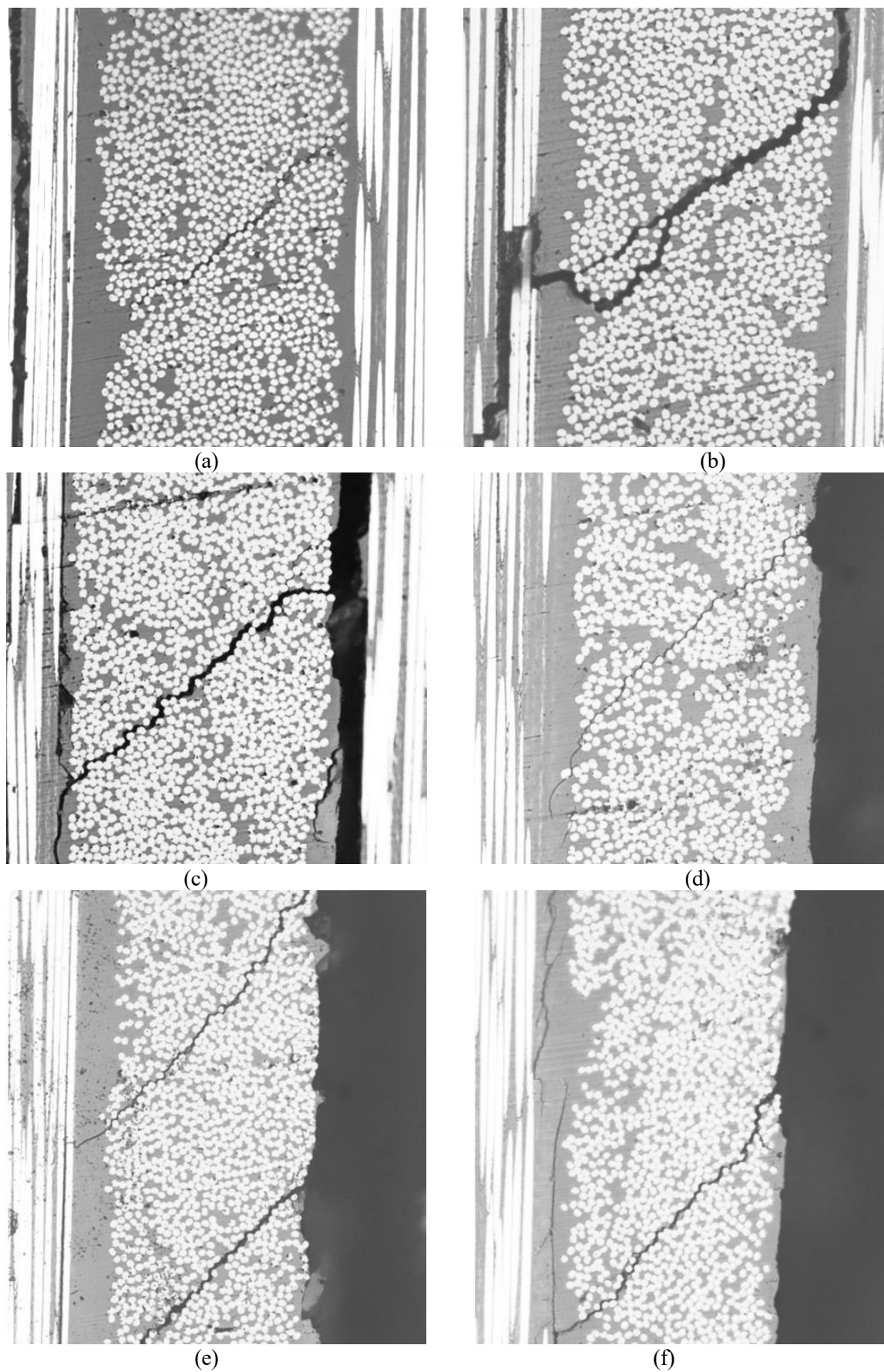


Figura 1.5. $[0_2,90,0_2]$: Probeta 13. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200 [6]

1.2. Objetivo

El objetivo del presente estudio consiste en simular a través de diferentes modelos el ensayo descrito en el Apartado 1.1.3, haciendo uso del Método de Elementos Finitos (MEF), implementado con el programa Abaqus CAE y utilizando la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal, en algunos casos mediante la herramienta de Abaqus VCCT para ver el efecto de la variación de determinadas variables y, en última instancia, tratar de comprender la aparición de este fallo no convencional en el laminado considerado. Cabe destacar que este trabajo no se ha realizado de forma aislada, sino que se encuadra en un conjunto de trabajos, a los que se hará referencia a lo largo de este, en el que cada uno busca un enfoque diferente para comprender este fenómeno.

Para ello, se han llevado a cabo diversos modelos, agrupados en dos grandes grupos según la magnitud que se estudia como indicador de la tendencia al fallo:

Modelos de estudio del índice de liberación de energía

En estos modelos se busca analizar la tendencia al crecimiento de la grieta como un daño progresivo. Para ello se buscará calcular el índice de liberación de energía G en los diferentes modos de crecimiento, en presencia de una grieta. Los modelos en los que se ha hecho este estudio son los siguientes:

- *Modelo 1.* Simula la grieta de delaminación entre la capa de 0 grados y de 90 grados observada experimentalmente. Modela la posibilidad de que dicha grieta de delaminación se haya producido antes que la grieta transversal a 45 grados. Se estudiará cómo afecta la longitud de esta grieta de delaminación al índice de liberación de energía. También se estudiará la tensión circunferencial en la punta de la grieta para observar la posible tendencia a generar un daño transversal a partir de esta grieta de delaminación.

Cabe destacar que el estudio de la grieta de delaminación no es el objetivo fundamental de este trabajo, y se ha realizado hasta este punto en común con otro trabajo fin de grado [7]. Una vez que se ha comprendido el funcionamiento de la herramienta VCCT, se ha profundizado en este último en la grieta de delaminación, junto con otros trabajos [8], mientras que el presente trabajo se centra en los modelos que se describen a continuación.

- *Modelos de grieta central.* En estos modelos se ha simulado la presencia de una grieta corta centrada en la capa de 90 grados que pudiera existir previamente, por diversos motivos, sin presencia de la grieta de delaminación. Modela la posibilidad de que dicha grieta, que pudiera progresar hasta atravesar transversalmente a 45 grados la capa central como se observa experimentalmente, se haya producido previamente a la delaminación. Bajo esta situación general se busca estudiar diferentes aspectos:
 - *Modelo 2.* Estudia el efecto del ángulo que forma la grieta central con la dirección longitudinal del laminado en el índice de liberación de energía. Con este modelo se busca entender por qué aparece experimentalmente la grieta a un ángulo de 45 grados.
 - *Modelo 3.* Estudia el efecto de la longitud de la grieta central a 45 grados en el índice de liberación de energía. Con este modelo se busca estudiar la estabilidad del crecimiento de dicha grieta central.
 - *Modelo 4.* Estudia el efecto del espesor de la capa de 90 grados en el índice de liberación de energía. Con este modelo se busca entender por qué únicamente se observa este daño no convencional en el laminado [0₂,90,0₂], y no para otros espesores.

Modelo 5. Estudio del trabajo total liberado por daño explosivo

En este modelo se busca analizar la tendencia a la aparición de la grieta como un daño explosivo. Para ello se buscará calcular el trabajo total liberado en la aparición de un daño que atraviesa transversalmente la capa de 90 grados sin presencia de la grieta de delaminación. Se estudiará conjuntamente el efecto de la variación del ángulo del daño transversal con la dirección longitudinal de la probeta, y el efecto del espesor de la capa de 90° en el trabajo total liberado en sus componentes tangencial y normal a la grieta, y la suma de estas. Con ello se busca entender por qué aparece el daño a 45 grados en el laminado [0₂,90,0₂] y no para otras orientaciones o espesores.

Estudio del efecto de la temperatura de curado

Para todos los modelos se estudiará el efecto del decremento térmico que se produce durante el curado de los materiales compuestos y que genera unas tensiones residuales que pueden ser determinantes para el fallo del laminado. No son modelos independientes, sino que se parten de los *Modelos 1, 2, 3, 4 y 5*, descritos

anteriormente, y se realizará para todos los casos dos submodelos:

- El primer Submodelo considera conjuntamente el efecto de la temperatura de curado junto con la carga mecánica. Este submodelo es el más cercano a la realidad.
- El segundo Submodelo tiene como objetivo comprender el efecto diferencial que produce la temperatura de curado. Por ello se modela únicamente el decremento térmico, sin la carga mecánica.

Objetivos transversales

Además de todos los objetivos principales ya mencionados, en el presente trabajo se busca como objetivo transversal profundizar en la comprensión e idoneidad de la herramienta VCCT como método para obtener el índice de liberación de energía.

2 MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

Los métodos y herramientas utilizados para la simulación a través de diferentes modelos han sido el Método de Elementos Finitos (MEF), implementado a través del programa Abaqus CAE, y de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal, haciendo uso de la herramienta de simulación de grietas VCCT. Además, se ha utilizado un enfoque mesomecánico del material compuesto y se ha modelado el material consecuentemente. En el presente capítulo se hace una breve descripción de todos los métodos y herramientas mencionados para facilitar la comprensión del trabajo realizado y la interpretación de los resultados.

2.1. Método de Elementos Finitos (MEF) y Abaqus

2.1.1 Método de Elementos Finitos

La Mecánica Computacional es una disciplina que surge a raíz de la imposibilidad de resolver de forma analítica, con un grado de precisión aceptable, el conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan la Mecánica de Medios Continuos. Debido a estas limitaciones, el desarrollo de nuevas técnicas numéricas para el cálculo de estructuras y el modelado del comportamiento de materiales ha experimentado un auge extraordinario en las últimas décadas, principalmente debido a las elevadas capacidades computacionales existentes en la actualidad. [9]

Entre la multitud de técnicas numéricas existentes para el análisis de sólidos deformables basados en métodos de discretización, el denominado Método de los Elementos Finitos (MEF) es la herramienta más comúnmente aplicada en la actualidad. Una de las principales causas que motivan su popularidad es su relativa simplicidad para ser implementado numéricamente, así como su elevado grado de versatilidad, siendo adaptable para problemas mecánicos, térmicos, electromagnéticos, fenómenos multi-fásicos, fractura, entre otras aplicaciones. Es más, desde un punto de vista práctico, numerosas herramientas software comerciales basados en el MEF han sustituido casi por completo los métodos manuales o semi-analíticos, así como a las tablas y ábacos de cálculo empleados tradicionalmente. [9]

Desde un punto de vista ingenieril, la idea básica del MEF consiste en la introducción del concepto de discretización del dominio bajo estudio. La idea de discretización del MEF consiste en dividir el dominio bajo estudio en una serie de "elementos finitos" (de alguna forma pueden interpretarse como subdominios), los cuales son generalmente denominados "elementos". Estos elementos están conectados a través de "nodos", que contienen la información acerca de los grados de libertad del sistema (o variables primarias), es decir, desplazamientos, presiones, temperatura, potencial eléctrico, entre otros. Particularizando estas ideas para el análisis mecánico de sólidos deformables, los parámetros mecánicos (por ejemplo, la rigidez) de los elementos individuales generalmente aproximan la contribución de dicho elemento en función de la Teoría Mecánica correspondiente (por ejemplo, tirantes, vigas, placas...). [9]

El conjunto de elementos finitos que discretizan el dominio completo se denomina "malla". Es por ello que, mediante este proceso de discretización, se procede a una transformación de la tipología de ecuaciones de gobierno del problema, es decir, las ecuaciones en derivadas parciales originalmente establecidas son transformadas en una serie de ecuaciones algebraicas (lineales o no lineales dependiendo del problema). Es más, desde un punto de vista operacional, el MEF proporciona una metodología sistemática para la generación de tal conjunto de ecuaciones algebraicas, la cual es susceptible de ser programada computacionalmente. [9]

Los principales aspectos del proceso de modelado y simulación de estructuras ingenieriles consisten, desde una perspectiva global, en las etapas que se recogen en la Figura 2.1.

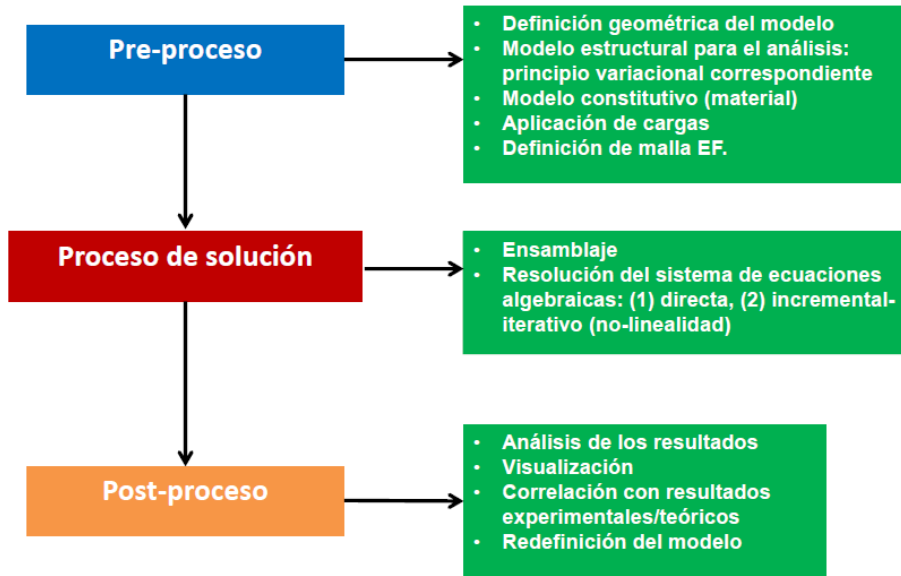


Figura 2.1. Etapas de modelado mediante MEF [9]

2.1.2 Abaqus CAE

Abaqus es un conjunto de programas informáticos (*product suite*) de simulación que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos y otros.

Consta de cuatro productos: Abaqus/CAE (siendo CAE el acrónimo de "*Complete Abaqus Environment*"), Abaqus/CFD (acrónimo de "*Computational Fluid Dynamics*"), Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. [10]

En el presente trabajo se ha hecho uso del software Abaqus CAE.

Entre las múltiples herramientas de las que se han hecho uso en el modelado de la simulación de Abaqus, se destaca el uso de la herramienta de criterio de crecimiento de grietas VCCT que se describirá posteriormente.

2.2. Mecánica de la Fractura y herramienta VCCT

2.2.1 Mecánica de la Fractura

La Mecánica de la Fractura se encarga de estudiar el comportamiento de sólidos sometidos a cargas exteriores en presencia de grietas o defectos asimilables a grietas. El objetivo principal de esta disciplina consiste en determinar bajo qué condiciones va a crecer una grieta y cómo de rápido va a crecer. [11]

Hay que tener en cuenta que los fenómenos que determinan el comportamiento de grietas responsables del fallo en materiales compuestos son complejos. En la base de esta complejidad está la heterogeneidad del material en una escala micro, con la presencia de fibras y matriz de propiedades diferentes y las interfases entre estas; así como la presencia de diferentes láminas con sus respectivas orientaciones de las fibras y las interfases entre estas, en las que pueden aparecer fenómenos como las delaminaciones. La alta complejidad de los mecanismos que producen fallo de estos materiales están asociados, por tanto, a la microestructura a diferentes escalas e incluso a la interacción entre ellas.

En la Mecánica de la Fractura elástica lineal se describen tres modos de fractura diferentes, según las tres componentes del desplazamiento relativo que pueden sufrir las caras de la grieta, como se muestra en la Figura 2.2. Se denominan los Modos de Fractura I, II y III. La combinación entre estos modos da lugar a los Modos Mixtos.

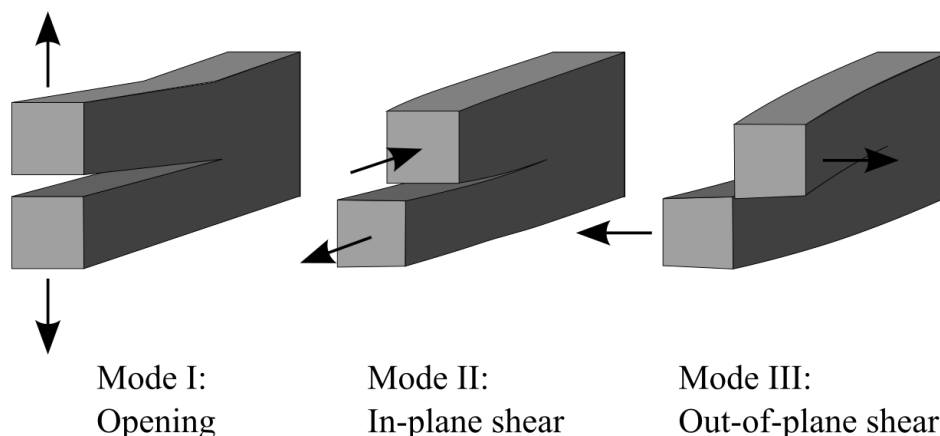


Figura 2.2. Modos de Fractura [12]

A partir de estos conceptos básicos surgen diferentes criterios para determinar el crecimiento de una grieta, que se describen a continuación.

2.2.1.1 Índice de liberación de energía G

El índice de liberación de energía G hace referencia a la energía disponible para hacer crecer la grieta. Cabe destacar que para cada modo de fractura existe un criterio de propagación de las grietas en base a esta magnitud. En concreto, considerando el enfoque energético, el criterio de crecimiento para cada modo sería:

$$G \geq G_c$$

Donde:

$G \equiv$ índice de liberación de energía (strain energy release rate)

$G_c \equiv$ tenacidad a la fractura

El índice de liberación de energía depende de las cargas y de la geometría del problema, mientras que la resistencia del material a la propagación de la grieta depende del material y el modo considerado, pudiendo determinarse experimentalmente. [11]

Sin embargo, para modos mixtos (combinación entre los modos I, II y III) en materiales compuestos, aunque se ha avanzado mucho, todavía no existen criterios claros que determinen el crecimiento de la grieta. Existen diversas propuestas de estos criterios pero actualmente no existen criterios universales y verificables en todas las situaciones que determinen satisfactoriamente cuándo propaga una grieta. Además, es importante resaltar que no se conocen los valores de G_c para el caso considerado.

Por todo ello, en el presente estudio y, teniendo en cuenta que en las situaciones consideradas aparecen modos mixtos, se prescindirá del término derecho del criterio de crecimiento, estudiando únicamente el índice de liberación de energía como una medida de la energía disponible en la grieta para propagarse, considerándola para cada modo independientemente y haciendo un análisis comparativo de esta magnitud entre diferentes situaciones. Se prescinde, por tanto, del estudio de la tenacidad a la fractura del material. Desde un punto de vista práctico, se establecerá un valor de G_c muy elevado para todos los modos, de forma que nunca se alcance el criterio de crecimiento, y el estudio se limitará a el cálculo del índice de liberación de energía y un estudio comparativo de este. El presente estudio no tiene un carácter predictivo, solo comparativo en términos cualitativos.

2.2.1.2 Balance global de trabajo por unidad de longitud liberado. Daño explosivo.

Otro enfoque para estudiar la tendencia a producirse la propagación de una grieta es el balance global de trabajo liberado. Esta idea se encuadra en el contexto de una propagación de la grieta explosiva.

En este caso se considera que las tensiones internas del material, cuando el material está pegado y la grieta sin propagar, trabajan sobre los desplazamientos que se producen entre los labios de la grieta cuando está

totalmente abierta, manejando, por lo tanto, dos situaciones que se muestran en la Figura 2.3 (A) y (B), respectivamente, para la componente normal (modo I). Para el modo II se trata una situación equivalente en la componente tangencial.

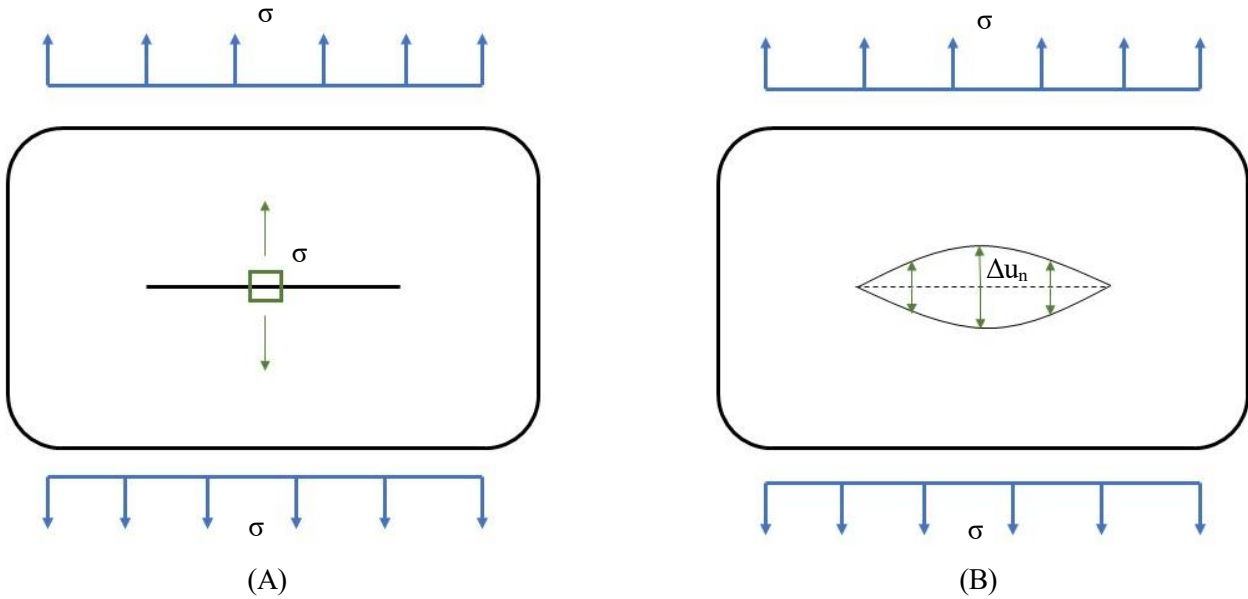


Figura 2.3. Esquema global de trabajo liberado en daño explosivo en componente normal. En la Imagen (A) se muestra el sólido sin grieta de donde se obtienen las tensiones σ . En la Imagen (B) se muestra el sólido con la grieta totalmente abierta de donde se obtienen los desplazamientos relativos entre los labios.

De esta forma, para obtener el trabajo global liberado por unidad de longitud para la componente normal W_{normal} se emplea la siguiente expresión:

$$W_{normal} = \frac{1}{L} \int_0^L (\sigma \times \Delta u_n) dl$$

Igualmente, para la componente tangencial se emplea la siguiente expresión:

$$W_{tangencial} = \frac{1}{L} \int_0^L (\tau \times \Delta u_\tau) dl$$

Donde:

L es la longitud de la grieta

σ es la tensión normal de la Figura 2.3 (A)

Δu_n es la apertura normal entre los labios de la grieta de la Figura 2.3 (B)

τ es la tensión tangencial de la Figura 2.3 (A)

Δu_τ es el deslizamiento relativo entre los labios de la grieta de la Figura 2.3 (B)

Hay que tener en cuenta que el método de elementos finitos da como salida las variables de tensiones y desplazamientos en los nodos, por lo que la integral de las expresiones se tiene que hacer a partir de valores discretos de las magnitudes. Existen muchas formas de hacer la integral desde un punto de vista numérico, entre las cuales se ha optado por la regla del punto medio, cuyas expresiones se muestran a continuación:

$$w_{ni} = \sigma_i \times \Delta u_{ni}$$

$$W_{normal} = \frac{1}{L} \sum_1^{N-1} \frac{(w_{n(i+1)} + w_{ni})}{2} \times b_i$$

Igualmente, para la componente tangencial se emplean las siguientes expresiones:

$$w_{\tau i} = \tau_i \times \Delta u_{\tau i}$$

$$W_{tangencial} = \frac{1}{L} \sum_1^{N-1} \frac{(w_{\tau(i+1)} + w_{\tau i})}{2} \times b_i$$

Donde:

w_{ni} es el producto de la tensión por la apertura de la grieta en el punto i de la grieta en el modo I (normal)

$w_{\tau i}$ es el producto de la tensión por el deslizamiento relativo en el punto i de la grieta en el modo II (tangencial)

N es el número de puntos considerados

L es la longitud de la grieta

b_i es el tamaño del elemento que va desde el punto i al punto $i+1$

2.2.2 Herramienta VCCT

Para el cálculo del índice de liberación de energía G se ha hecho uso de la herramienta de Abaqus VCCT. El denominado por Abaqus "criterio" VCCT (*Virtual Crack Closure Criterion*) aplica los criterios de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal y, por lo tanto, es apropiada para su uso en materiales frágiles donde la superficie de propagación está previamente definida.

El VCCT se basa en la técnica del cierre virtual de grieta planteado por Irwin en 1957 [13] y, por tanto, en la asunción de que el índice de liberación de energía G cuando una grieta se propaga y abre una cierta cantidad es la energía requerida para cerrar esta misma apertura.

Este concepto se ilustra, tal y como lo aplica Abaqus en la Figura 2.4 en la que se muestra la propagación de la grieta en Modo I en un sólido ya discretizado en elementos y nodos para el uso del Método de Elementos Finitos (MEF).

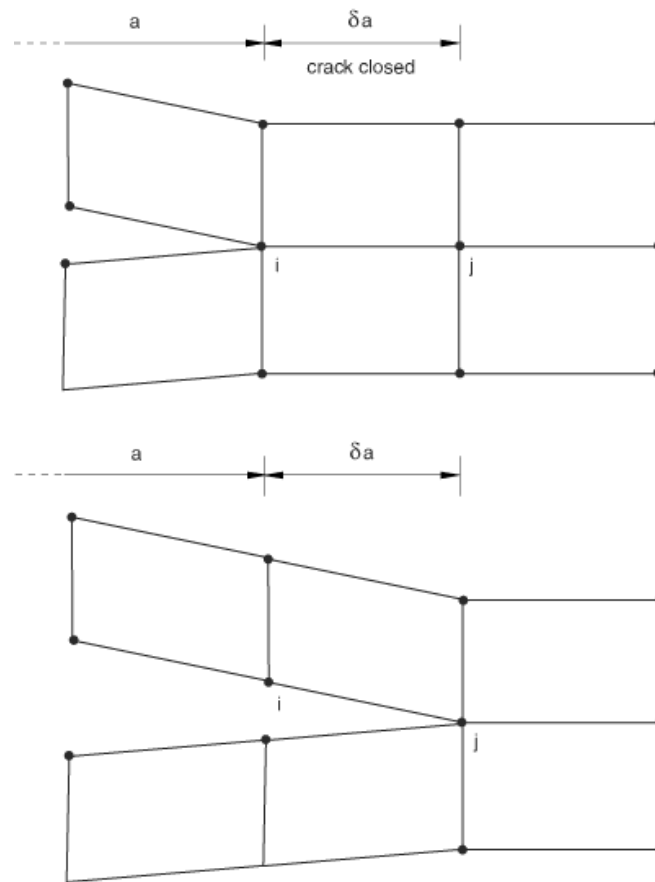


Figura 2.4. Propagación de grieta en sólido discretizado para el MEF en Modo I para el cálculo de G mediante el criterio VCCT [14]

En la Figura 2.5 se muestran las magnitudes necesarias para el cálculo de la G con la herramienta VCCT.

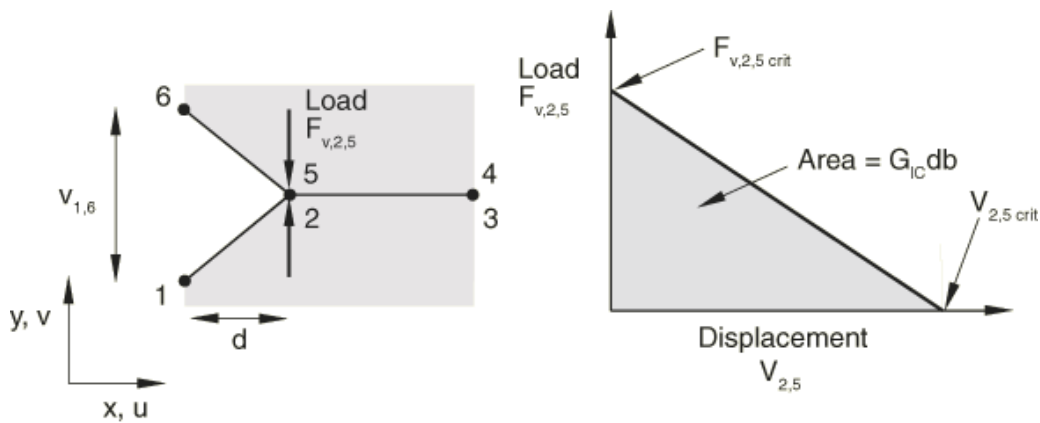


Figura 2.5. Esquema de las magnitudes necesarias para el cálculo del índice de liberación de energía G mediante el criterio VCCT [14]

Teniendo en cuenta los elementos de la Figura 2.5, se realiza el cálculo de G_I mediante la siguiente expresión:

$$G_I = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{1,6} \times F_{v,2,5}}{bd} \right)$$

Donde G_I es el índice de liberación de energía en Modo I, b es el espesor, d es la longitud de los elementos en la longitud de la grieta, $F_{v,2,5}$ es la fuerza vertical necesaria para mantener unidos los nodos 2 y 5, y $v_{1,6}$ es el desplazamiento vertical entre los nodos 1 y 6.

Asumiendo que la grieta está gobernada por el comportamiento elástico, la energía necesaria para cerrar la grieta (y, por tanto, la energía necesaria para abrirla) se calcula de la ecuación anterior. Ecuaciones y argumentos similares se pueden establecer para los Modos II y III.

2.3. Limitaciones del MEF para el entorno de la punta de la grieta

El método de los elementos finitos (MEF) utilizado en el presente trabajo, maneja la hipótesis de comportamiento perfectamente elástico del material. Basándose en esta hipótesis y considerando la grieta idealmente, en la solución analítica de problemas como en el de la Figura 2.6, en el fondo de la grieta aparece una singularidad de valores infinitos de tensiones como se muestra en la Figura 2.7.

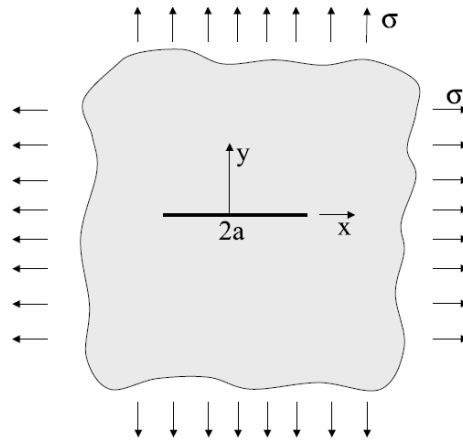


Figura 2.6. Sólido con grieta bajo tensión en dos direcciones [11]

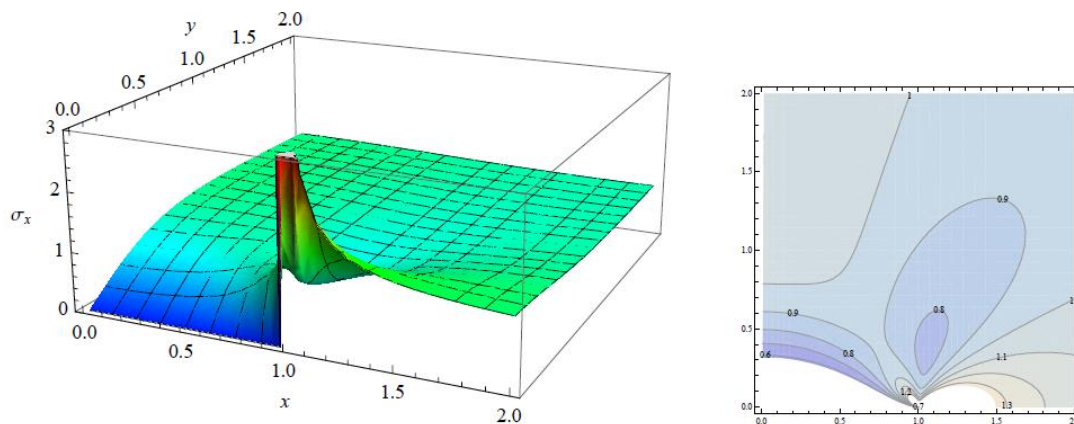


Figura 2.7. Solución analítica de Westergaard de la tensión en la punta de la grieta en la dirección de la grieta x para $a=1$ y $\sigma=1$ [11]

Esta solución no se corresponde con la realidad, ya que, en primer lugar, las condiciones de idealidad geométrica de la grieta no se dan en la realidad y, por otro lado, el comportamiento del material no es perfectamente elástico si no que, ante tensiones altas como las que aparecen aquí, se dan fenómenos de plastificación que no considera el MEF, aunque puede considerarlos.

Como se ha explicado anteriormente, el MEF no proporciona los resultados de la solución analítica, sino que realiza una discretización del sólido, obtiene los resultados en los nodos y realiza una distribución de la solución en el elemento con respecto a una determinada ley. Esto se traduce en el hecho de que, en el entorno de la punta de la grieta, cuanto más se refine (se disminuya el tamaño) los elementos en los que se discretice el sólido, mayores serán las tensiones obtenidas en estos, tendiendo estas al valor infinito de la solución analítica cuando los elementos fueran infinitamente pequeños.

Además, hay que tener en cuenta que, debido a la formulación del MEF, la solución primaria de este son los desplazamientos y las tensiones aparecen como resultados de operaciones que implican derivadas de los desplazamientos, que producen errores numéricos que se suman al fenómeno descrito anteriormente.

Todo esto habrá de ser tenido en cuenta en el mallado, en el que se harán elementos muy pequeños en el entorno de la grieta, así como en la interpretación de los resultados.

Cabe destacar que existe un método alternativo que no se ha empleado en el presente trabajo, muy útil para el manejo de grietas, que es el método de los elementos de contorno, que presenta ventajas desde el punto de vista de la discretización y la precisión de los resultados [9]. Se ha empleado el método de los elementos finitos porque la programación es bastante más cómoda y porque, con este tipo de estudio, es posible realizar un análisis más inmediato sobre la totalidad del modelo, proporcionando de manera directa resultados sobre la zona que rodea a la grieta y no solo los contornos. Sin embargo, para estudios posteriores sí podría ser interesante elaborar un modelo de elementos de contorno para obtener resultados más precisos en algunos puntos, por ejemplo, el fondo de las grietas.

2.4. Escalas de estudio de materiales compuestos. Escala mesomecánica

Como se ha mencionado anteriormente (Apartado 1.1.1), los materiales compuestos tienen un comportamiento heterogéneo y anisótropo. La complejidad de un análisis heterogéneo ha hecho necesario adoptar algunas hipótesis de comportamiento cuyos buenos resultados justifican su mantenimiento. Estas hipótesis están conectadas con una división clásica realizada en la mayoría de los libros sobre composites, y que considera el análisis de éstos desde dos puntos de vista: Micromecánico y Macromecánico.

- En el análisis Micromecánico se reconoce la existencia de dos componentes: fibra y matriz, aunque sin considerar la estructura interna de cada uno de ellos. Uno de los objetivos de este modelo es considerar y analizar los mecanismos físicos que producen el fallo del material: rotura de matriz, progresión de grietas en matriz o interfaces fibra-matriz, despegues de las fibras etc [1] Este enfoque se muestra en la Figura 2.8.

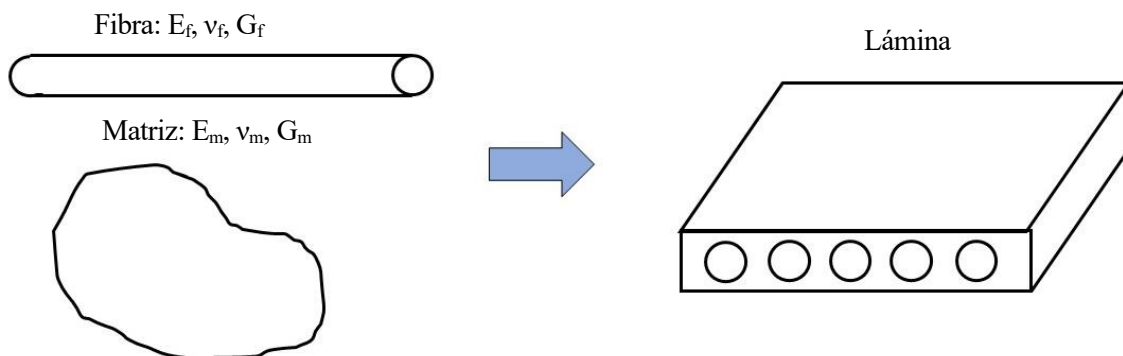


Figura 2.8. Esquema de una lámina y sus componentes (fibra y matriz) desde un enfoque Micromecánico

- En el análisis Macromecánico se considera la lámina como un material equivalente homogéneo y ortótropo con unas propiedades representativas que son las calculadas a partir de las de la fibra y matriz. Por consiguiente, la microestructura de la lámina no es considerada salvo en el hecho de que existen propiedades diferentes en la dirección de la fibra y en la dirección perpendicular. La lámina ortótropa se toma ahora como base para diseñar elementos laja, placa o lámina a los cuales se les aplica las teorías del cálculo estructural [1]. Este enfoque se muestra en la Figura 2.9.

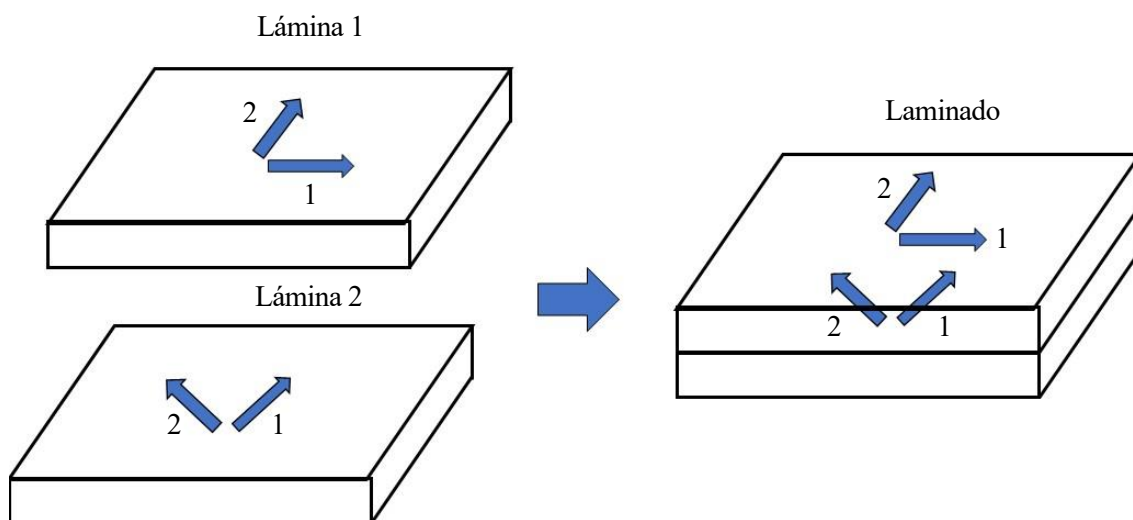


Figura 2.9. Esquema de un laminado y sus láminas que la componen desde un enfoque Macromecánico

En el presente estudio se ha optado por un enfoque intermedio entre el Micromecánico y el Macromecánico: enfoque Mesomecánico. En él, se han modelado las láminas como un material equivalente homogéneo y ortótropo, propio del enfoque macromecánico, pero se han modelado grietas, fenómenos locales, y su progresión por las láminas e interfaces entre láminas, orientación, etc. elementos propios del enfoque micromecánico.

2.5. Materiales

El laminado considerado para la simulación es un *cross-ply* [0,90,0₂] con un espesor de cada lámina de 0,19 mm. El material de todas las láminas del laminado del ensayo es AS4/8552.

Para definir el material de la lámina, dado el enfoque mesomecánico que se ha elegido, se considera el equivalente homogéneo y ortótropo del material de cada lámina. Las propiedades del mismo son las recogidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la lámina equivalente ortótropa. 1 se refiere a la dirección de las fibras, 2 y 3 se refieren a direcciones perpendiculares a las fibras

Propiedad	Valor
E_{11}	135 GPa
E_{22}	8,75 GPa
G_{12}	4,75 GPa
ν_{12}	0,3
ν_{23}	0,4

Por su parte, las propiedades térmicas del material equivalente ortótropo se modelan como dependientes de la temperatura. Los valores se recogen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades térmicas de la lámina equivalente ortótropa. 1 se refiere a la dirección de las fibras, 2 y 3 se refieren a direcciones perpendiculares a las fibras

Temperatura (°C)	α_1 ($10^{-6}C^{-1}$)	α_2 ($10^{-6}C^{-1}$)	α_3 ($10^{-6}C^{-1}$)
50	-7,46	15,79	16,68
75	-8,26	18,11	19,2
100	-8,95	20,4	22,23
120	-8,66	20,65	22,48

3 MODELADO

En el presente capítulo se hace una descripción de los diferentes modelos utilizados, con sus geometrías y mallas. En primer lugar, se hará una descripción de las características comunes a los modelos y de los elementos más significativos de estos. A continuación, se hará una enumeración de los diferentes modelos con sus características particulares.

3.1 Descripción de la geometría y el modelado comunes a todos los modelos

3.1.1 Geometría

En Abaqus, las partes (*Part* en Abaqus) definen la geometría de los componentes del modelo, son los bloques con los que se construye el modelo [14]. Se ha optado por llevar a cabo un modelo plano (2D) deformable con una geometría definida a través de *Part* con características de base de lámina (*Shell* en Abaqus) mediante los que se ha modelado la sección transversal de la probeta del ensayo, como se muestra en la Figura 3.1.

Se ha modelado una parte de la probeta con una longitud en la dirección longitudinal considerablemente grande, de 5 mm, para tratar de recoger los efectos de la delaminación que se observa experimentalmente y que se modelará, o no, según el modelo concreto considerado.

La probeta que se ha modelado es la que se muestra en la Figura 3.1. A partir de este modelo genérico se irá estudiando el efecto de variar determinados parámetros.

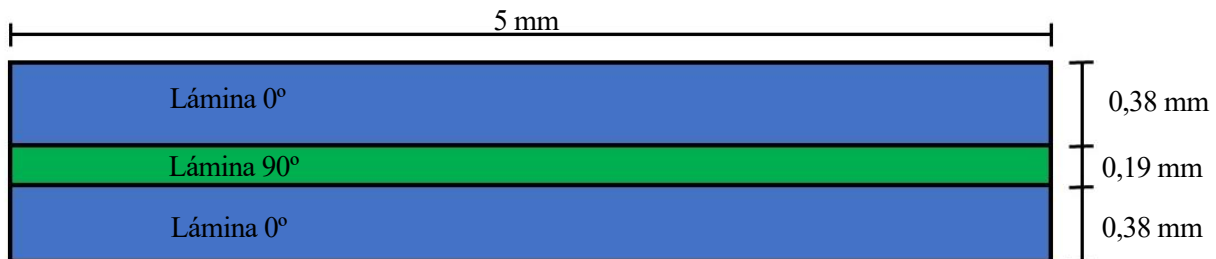


Figura 3.1. Esquema general del modelo

Cabe destacar que para generar modelos con grietas siempre es necesario que el modelo sea *multipart*. Esto quiere decir que el modelo debe estar formado por más de una parte. Solo de esta manera será posible generar la grieta, estableciendo las interacciones correspondientes entre cada parte. Se mostrarán los *part* utilizados en la descripción de cada modelo.

3.1.2 Materiales

En la lámina de 0° las fibras están en la dirección longitudinal de la probeta por lo que se ha modelado como un material equivalente homogéneo y ortótropo. En la lámina de 90°, sin embargo, las fibras están perpendiculares a la dirección longitudinal de la probeta “saliendo” de la pantalla en la Figura 3.1, por lo que se ha modelado como un material transversalmente isótropo.

En concreto, las propiedades mecánicas de la lámina de 0° se han introducido a través de un comportamiento de material tipo lámina (*Lamina* en Abaqus). Este elemento de Abaqus modela un comportamiento ortótropo plano [14]. Los valores introducidos para las láminas de 0° se recogen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del material que modela las láminas a 0°

Propiedad	Valor
E_{11}	135000 MPa
E_{22}	8750 MPa
ν_{12}	0,3
G_{12}	4750 MPa
G_{13}	4750 MPa
G_{23}	4750 MPa

Para el caso del material isótropo (lámina de 90°) se ha hecho uso del mismo comportamiento de material (*Lamina*) pero introduciendo los mismos valores para las diferentes direcciones para simular dicho comportamiento transversalmente isótropo. Los valores introducidos para la lámina de 90° se recogen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material que modela las láminas de 90°

Propiedad	Valor
E_{11}	8750 MPa
E_{22}	8750 MPa
ν_{12}	0,3
G_{12}	4750 MPa
G_{13}	4750 MPa
G_{23}	4750 MPa

En cuanto a las propiedades térmicas de expansión, se han introducido de nuevo como un comportamiento ortótropo mediante valores de los coeficientes de expansión térmica dependientes de la temperatura. Los valores introducidos para las láminas de 0° pertenecen al rango de temperatura del enfriamiento del curado y se recogen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades térmicas del material que modela las láminas de 0°

Temperatura (°C)	$\alpha_1 (10^{-6}C^{-1})$	$\alpha_2 (10^{-6}C^{-1})$	$\alpha_3 (10^{-6}C^{-1})$
50	-7,46	15,79	16,68
75	-8,26	18,11	19,2
100	-8,95	20,4	22,23
120	-8,66	20,65	22,48

Los valores introducidos para las láminas a 90° pertenecen al rango de temperatura del enfriamiento del curado se recogen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Propiedades térmicas del material que modela las láminas de 90°

Temperatura (°C)	α_1 (10^{-6}C^{-1})	α_2 (10^{-6}C^{-1})	α_3 (10^{-6}C^{-1})
50	16,68	15,79	-7,46
75	19,2	18,11	-8,26
100	22,23	20,4	-8,95
120	22,48	20,65	-8,66

Finalmente, es interesante aclarar el enfoque que se le ha dado al problema. No se usa el módulo de composites de Abaqus, en el que la definición del material sería más directa, porque, como se ha explicado, se busca un enfoque mesomecánico que permita modelar las grietas observadas en las micrografías.

3.1.3 Ejes locales y globales

Como se ha visto en las propiedades de los materiales (Apartado 3.1.2), estas se han introducido ya giradas por simplicidad, teniendo en cuenta las diferentes orientaciones de las láminas. Por ello se ha asignado una única orientación del material a todos los elementos del modelo. Los ejes locales coinciden con los globales.

3.1.4 Secciones

Las secciones (*Sections* en Abaqus) contienen información sobre un *Part* o una región de este. La información deberá de ser coherente con el tipo de *Part* o región de este al que se asigne [14]. Todas las secciones definidas y asignadas han sido secciones sólidas homogéneas (*Homogeneous solid sections* en Abaqus) que únicamente asignan a la geometría el material con sus características asociadas. Por tanto, se ha definido una sección correspondiente al material asociado a la lámina de 0 grados, y otra a la lámina de 90 grados.

3.1.5 Pasos de carga

Un paso de carga (*Step* en Abaqus) es cualquier fase del análisis del material que convenga definir (un transitorio térmico, dinámico, etc.). En su forma más simple un paso de carga es un análisis de un cambio de una carga de una magnitud a otra [14].

En el modelo se ha definido un paso de carga inicial que se ha utilizado, en los estudios del decremento térmico, para aplicar un campo de la temperatura alta de partida del material en el curado. Finalmente se ha definido un segundo paso de carga en el que se han introducido el campo de temperatura ambiente tras el curado (en los estudios del efecto del decremento térmico) y para la introducción de las condiciones de contorno que modelarán la carga mecánica del ensayo de tracción.

3.1.6 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno (*BCs* en Abaqus) especifican los valores de variables básicas (desplazamientos, rotaciones, presiones de fluidos, temperaturas, etc.) en los nodos cuando son conocidas [14]. Distinguimos dos grandes grupos de condiciones de contorno aplicadas: las que evitan el desplazamiento como sólido rígido y las que simulan el ensayo de tracción. Se describen a continuación.

3.1.6.1 Condiciones de contorno que evitan el desplazamiento como sólido rígido

En un análisis mediante MEF es fundamental eliminar el movimiento como sólido rígido para que entre en juego su comportamiento como sólido deformable, objeto de estudio. Para eliminar el movimiento como sólido rígido del modelo se deben limitar determinados grados de libertad de desplazamiento. Por argumentos de simetría y simplicidad geométrica se han aplicado las siguientes condiciones de contorno que se muestran en la Figura 3.2:

- *Apoyo superior*. Impide el desplazamiento en la dirección longitudinal.

- *Apoyo inferior*: Impide el desplazamiento en la dirección longitudinal y transversal.

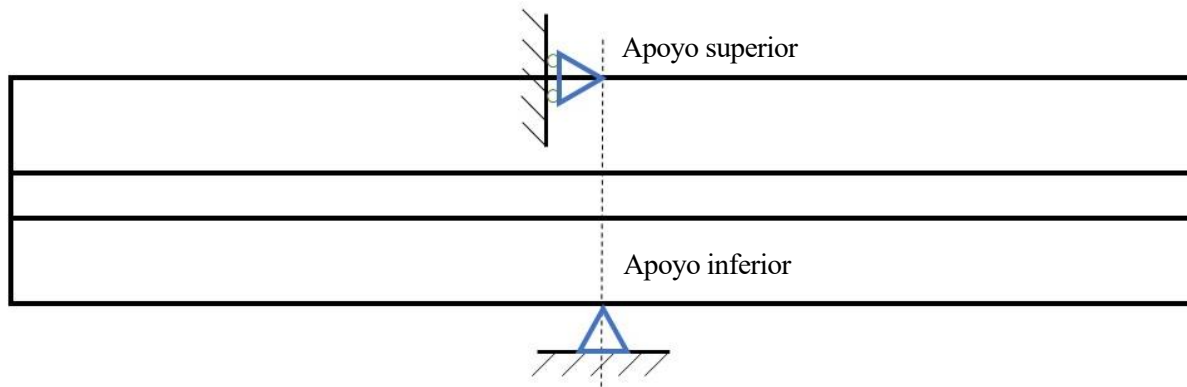


Figura 3.2. Esquema de las condiciones de contorno para evitar el desplazamiento como sólido rígido

3.1.6.2 Condiciones de contorno del ensayo de tracción

En el ensayo experimental que se modela, se ha aplicado el control en desplazamientos mediante mordazas que se agarran a la probeta del material. Se modelará como una condición de contorno equivalente y uniforme en las secciones transversales de la probeta del modelo, aunque en realidad se trate de una carga tangencial aplicada sobre los laterales de la probeta. Se han aplicado dos condiciones de contorno diferentes en los diferentes modelos que se muestran en la Figura 3.3 y se describen a continuación:

- *Condición de contorno en desplazamientos*. Se ha aplicado en la gran mayoría de los modelos ya que en el ensayo real se aplicó control en desplazamientos. El valor de desplazamiento aplicado ha sido de 0,022 mm para el Modelo 1 y de 0,028 mm para los Modelos 2, 3, 4 y 5 en cada extremo de la probeta (se ha hecho una descripción general de los modelos en el Apartado 1.2). Este valor es, aproximadamente, el valor de desplazamiento de la lámina de 0° para el cual se produjo experimentalmente el fallo en la probeta.
- *Condición de contorno en tensiones*. Se ha aplicado en determinados modelos una tracción uniformemente distribuida en los extremos de la probeta. El valor de tracción aplicado ha sido de 1195 MPa en cada extremo de la probeta. Este valor es, aproximadamente, el valor de la tracción asociada al desplazamiento para el cual se produjo experimentalmente el fallo en la probeta.

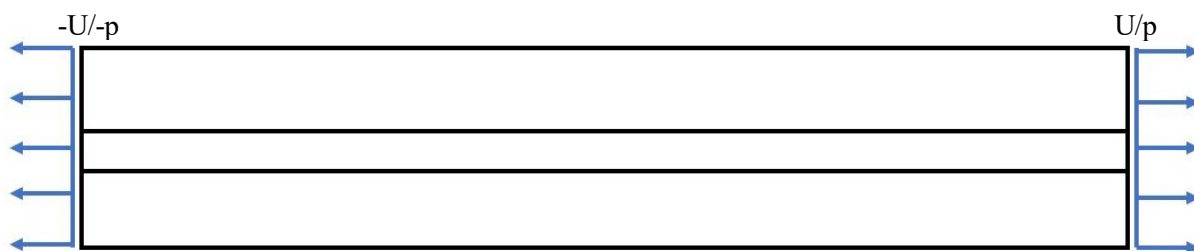


Figura 3.3. Esquema de las condiciones de contorno del ensayo de tracción

3.1.7 Decremento térmico

En todos los modelos se simulará el efecto del decremento térmico producido en el enfriamiento durante la fabricación del material compuesto, que se produce desde la temperatura de transición vítrea (155°C) del polímero hasta la temperatura ambiente (20°C). Este decremento térmico provoca, (debido a la ortotropía de las propiedades térmicas) tensiones denominadas “de curado” que, en determinadas ocasiones, juegan un papel relevante en el comportamiento y fallo del material compuesto.

Esto se ha simulado en Abaqus dentro del paso de carga (inicial para la temperatura de curado y final para la temperatura ambiente) mediante un campo predefinido de temperatura constante en toda la geometría.

3.1.8 Restricciones a los grados de libertad

Las restricciones (*Constraints* en Abaqus) definen relaciones entre diferentes grados de libertad de las diferentes regiones del modelo [14]. En el modelo se ha hecho uso de la Constraint *Tie*, que fusiona todos los grados de libertad de dos regiones aunque los mallados creados en las superficies de las regiones sean disimilares. Se ha hecho uso de esta restricción para unir aquellas superficies pertenecientes a *Part* diferentes, pero en las que no se quiere modelar una grieta ni una zona de potencial crecimiento de esta, sino que existe una continuidad del material. Se describirán pormenorizadamente en la descripción de cada modelo (Apartado 3.2).

3.1.9 Interacciones. Contacto con VCCT

Para modelar la zona del material por la que se encuentra la grieta y por donde podría progresar la grieta, y en la que se podrá aplicar la herramienta VCCT para obtener el índice de liberación de energía G , se hace uso de una interacción de contacto superficie-superficie con un método de discretización superficie-superficie y con la propiedad de interacción de contacto VCCT (se describe en el Apartado 2.2.2).

De esta forma, mediante esta interacción entre dos superficies previamente definidas en dos *Part* diferentes se establece la grieta, y la trayectoria que podría trazar esta. Por tanto, dentro de esta interacción se distinguen dos comportamientos:

- *Zona de la grieta*. En su definición en Abaqus consiste, por defecto, en toda la zona de interacción. Consiste en la propia grieta, donde está abierta y definida previamente sin haber progresado.
- *Zona de trayectoria de propagación de la grieta*. Se define en Abaqus a partir de la función *Bonding*, a través de un *Set* de nodos de la zona de interacción. Representa la zona donde el material está unido, pero que es susceptible de progresar la grieta si se cumple el criterio VCCT.

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, en el presente estudio no se hará progresar la grieta, sino que se calculará el G para diferentes situaciones con la grieta previamente definida y separada en el modelo. Por ello, en la definición de la propiedad de interacción de contacto VCCT se han definido unas tenacidad a la fractura muy superiores a las G que se alcanzan en las simulaciones y el criterio de crecimiento en modo mixto elegido es irrelevante ya que se busca el cálculo de esta magnitud mediante la herramienta VCCT y no el crecimiento de la grieta.

Cabe destacar que, en su definición, se hace uso de una superficie esclava y una maestra, cada una asociada a un *Part*. La interacción de VCCT queda asociada a la superficie esclava y calcula el índice de liberación de energía a partir de las magnitudes de los nodos de esta superficie.

3.1.10 Mallado

El concepto de mallado se ha explicado en el Apartado 2.1.1. Se ha optado por un mallado dependiente del *Part*, lo que significa que se define y asocia en los *Part* y no en el módulo *Assembly*.

El tipo de elemento usado ha sido de la librería *Standard*, en concreto tipo Tensión Plana, cuadrilátero, con orden geométrico lineal de integración reducida (CPS4R).

El tipo de mallado utilizado ha sido el *Free* con el algoritmo de mallado *Advancing front*. Este algoritmo genera elementos cuadriláteros en los contornos de la región considerada y continúa generando elementos cuadriláteros conforme se mueve sistemáticamente al interior de la región. Este algoritmo de mallado sigue exactamente las semillas de mallado definidas. Suele generar transiciones de mallado más suaves que otros métodos. [14]

Dentro de este método se han empleado elementos tipo *Quad-dominated*, que usa primordialmente elementos cuadriláteros, aunque permite elementos triangulares.

Los mallados de cada modelo se describirán pormenorizadamente en la descripción de cada modelo (Apartado 3.2).

3.2. Modelos

3.2.1 Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0° - 90°

El objetivo de este modelo es obtener el índice de liberación de energía G (se describe en el Apartado 2.2.1.1) para el Modo I y II. También se estudia la tensión circunferencial máxima en el fondo de la grieta.

3.2.1.1 Geometría y modelado en Abaqus

Este modelo considera la presencia de una grieta de delaminación en la interfase entre la capa de 0° y de 90° . El modelo simula la presencia previa de la grieta de delaminación y estudia si, a partir de esta situación, pudiera haberse generado el daño no convencional. Se ha modelado una grieta de una longitud a que parte del centro del modelo hacia la izquierda, como se muestra en la Figura 3.4.

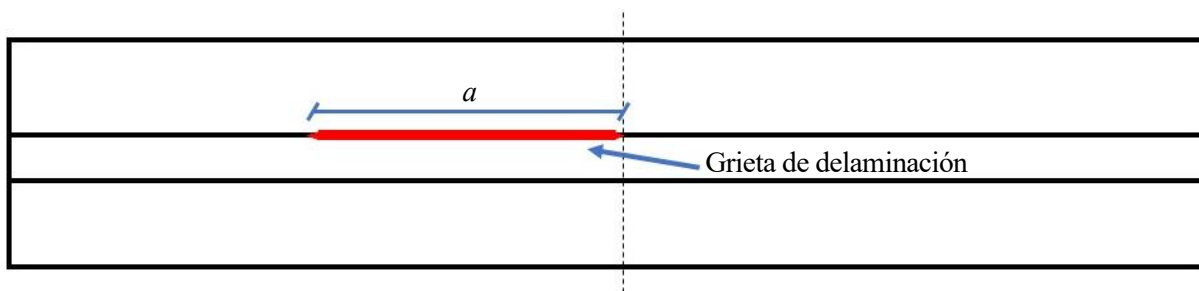


Figura 3.4. Esquema del Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0° - 90°

Se ha realizado el modelo para unas longitudes de grieta a de 0,02 mm; 0,625 mm; 1,25 mm; 1,875 mm y 2,5 mm. Estas situaciones recogen desde una delaminación muy pequeña, hasta una que ocupa completamente la mitad izquierda de la probeta. El espesor considerado de la capa de 90° es de 0,19 mm.

En su modelado en Abaqus se ha hecho uso de dos *Part* como se muestra en la Figura 3.5 representados mediante diferentes colores.

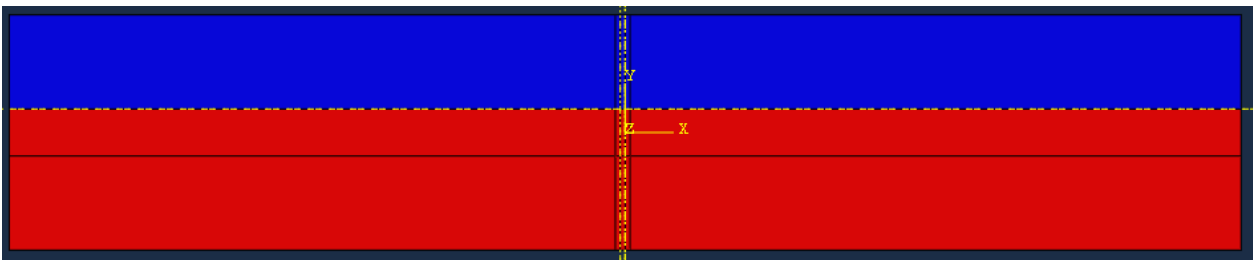


Figura 3.5. Esquema de los *Part* utilizados en el Modelo 1

En la intersección de estos, y de cara a una mayor comprensión del funcionamiento de la herramienta VCCT, se han modelado en el módulo de ensamblaje (*Assembly* en Abaqus) tres situaciones:

- *Frente derecho*. Se ha modelado como VCCT la grieta (abierta) y lo que queda tras el frente derecho de esta (*Bonding*) y con una *Constraint* de *Tie* el frente izquierdo de la grieta.
- *Frente izquierdo*. Se ha modelado como VCCT la grieta (abierta) y lo que queda tras el frente izquierdo de esta (*Bonding*) y con una *Constraint* de *Tie* el frente derecho de la grieta.
- *Ambos frentes*. Se han modelado ambos frentes izquierdo y derecho como VCCT.

3.2.1.2 Mallado

El mallado se ha realizado de forma simétrica respecto a ambas puntas de grieta para poder compararlos. El tamaño mínimo de los elementos en las puntas de la grieta es de 0,0014 mm y aumenta progresivamente al alejarse de estas. En las Figura 3.6, Figura 3.7 y Figura 3.8 se muestran imágenes del mallado utilizado para el caso de una longitud a de 0,625 mm. En ellas, la grieta se localiza en la línea discontinua amarilla horizontal limitada en sus dos frentes por las dos líneas discontinuas amarillas verticales. Para las otras longitudes de grieta el mallado es equivalente. El número de elementos es de 103.520.

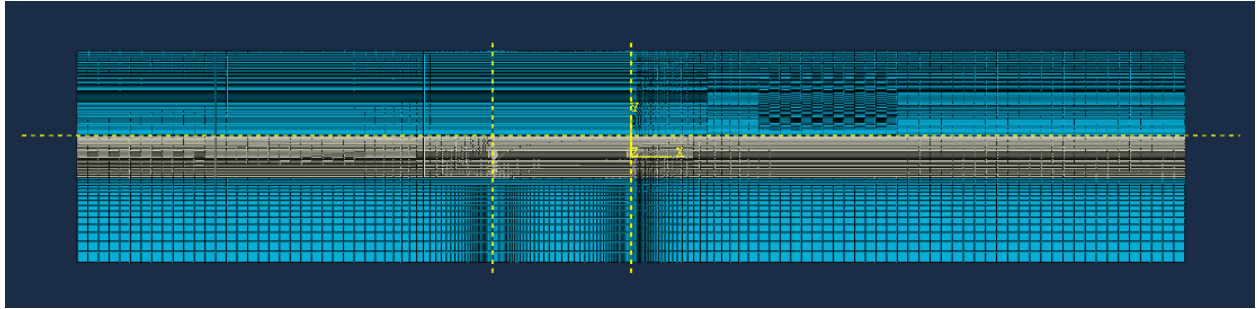


Figura 3.6. Vista general de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm

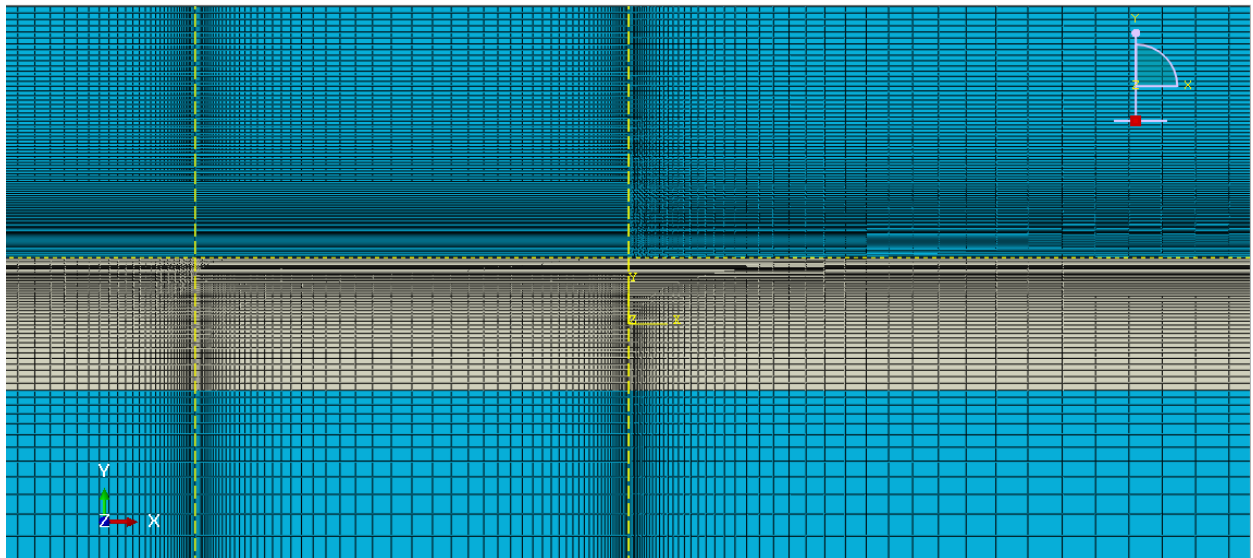


Figura 3.7. Vista de semidetalle de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm

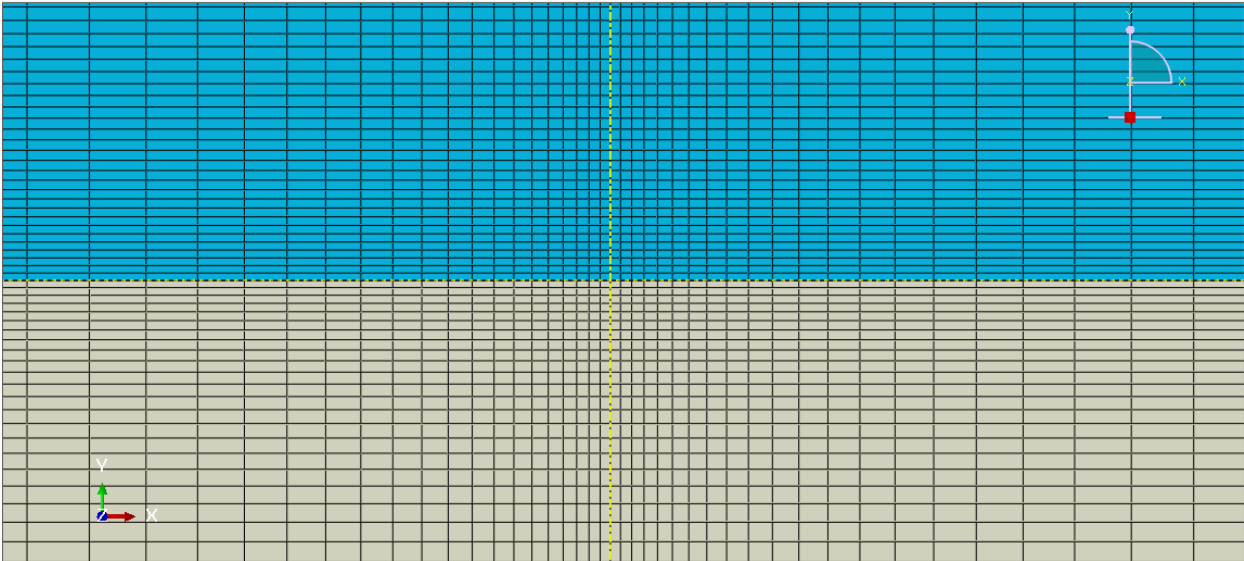


Figura 3.8. Vista de detalle de mallado de Modelo 1. Grieta en la interfase de 0° - 90° para una grieta de longitud a de 0,625 mm

3.2.2 Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90°

El objetivo de este modelo es obtener el índice de liberación de energía G (se describe en el Apartado 2.2.1.1) para el Modo I y II.

3.2.2.1 Geometría y modelado en Abaqus

En este modelo se simula la presencia de una grieta de 0,02 mm en el centro de la capa de 90° . Se estudia comparativamente su tendencia a propagarse calculando G_I y G_{II} para diferentes ángulos α de esta. Se estudiarán los ángulos α de 0° , 30° , 45° , 60° , 75° y 90° . El espesor considerado de la capa de 90° es de 0,19 mm.

El Modelo 2 se muestra en la Figura 3.9, donde se ha exagerado el tamaño de la grieta para hacerlo visible.

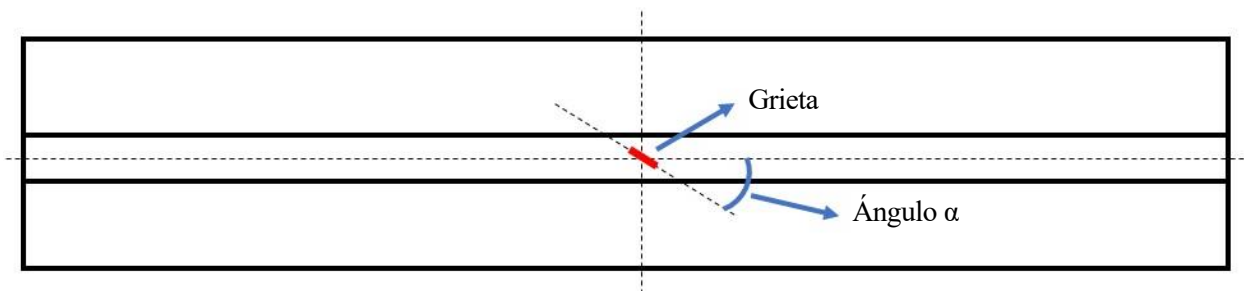
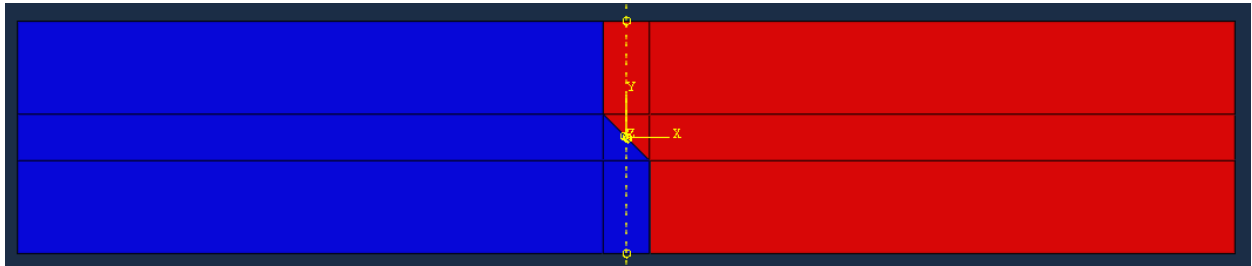


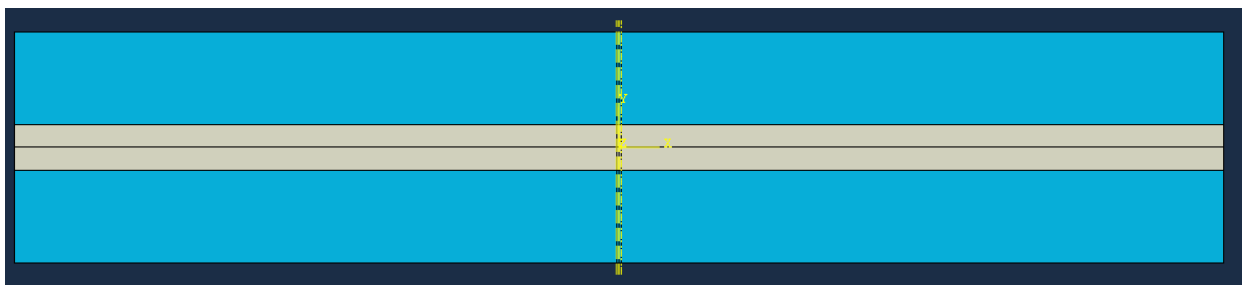
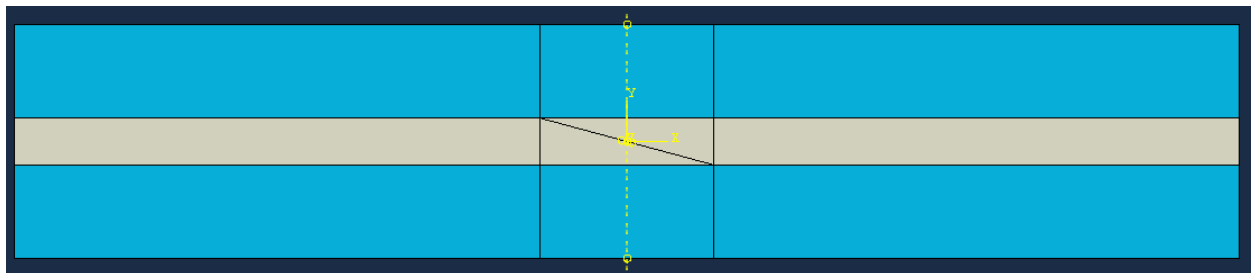
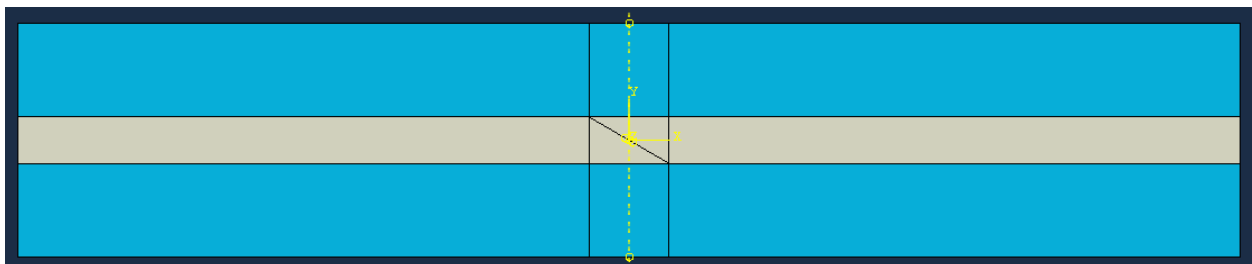
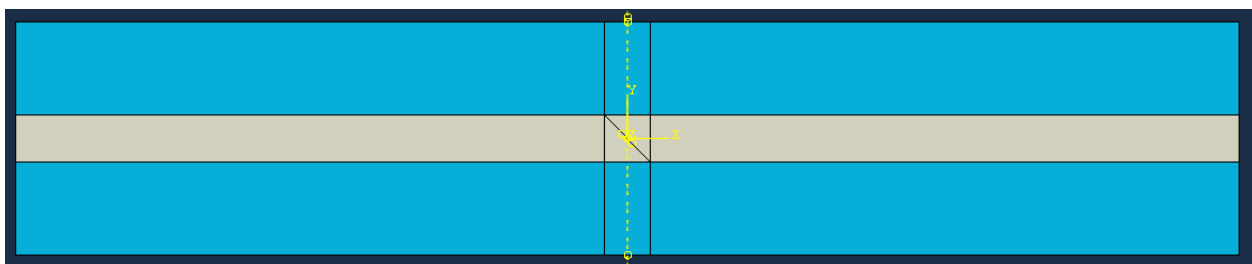
Figura 3.9. Esquema general del Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90° . El tamaño de la grieta se ha exagerado para hacerla visible

Para su introducción en Abaqus se ha hecho uso de dos *Part*, como se muestra en la Figura 3.10 en diferentes colores. En el módulo de ensamblaje (*Assembly* en Abaqus) se ha introducido la interacción de contacto de VCCT en la diagonal central (capa de 90°), distinguiendo la zona de la grieta y su zona de potencial progresión (*Bonding*); y una restricción de *Tie* en las intersecciones verticales (capas de 0°) entre ambos *Part*.

Figura 3.10. Esquema de los *Part* empleados en el Modelo 2

3.2.2.2 Mallado

En primer lugar, para facilitar la comprensión del mallado, en la Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17, se muestran las particiones que se han realizado geométricamente como base para el mallado para los diferentes ángulos modelados.

Figura 3.11. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 0° Figura 3.12. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 15° Figura 3.13. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 30° Figura 3.14. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 45°

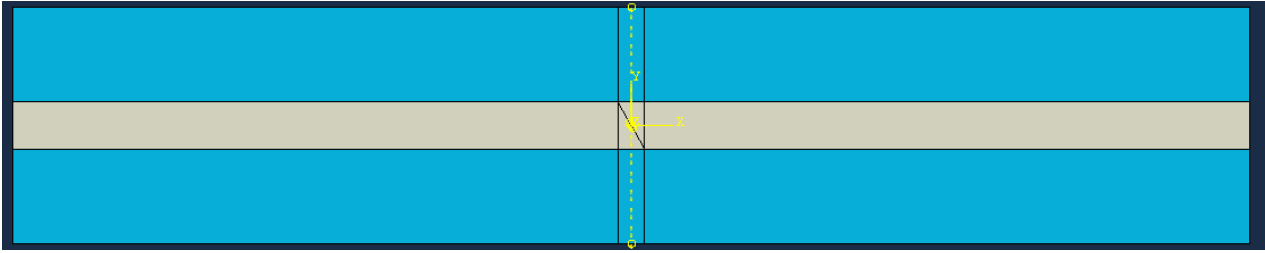


Figura 3.15. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 60°

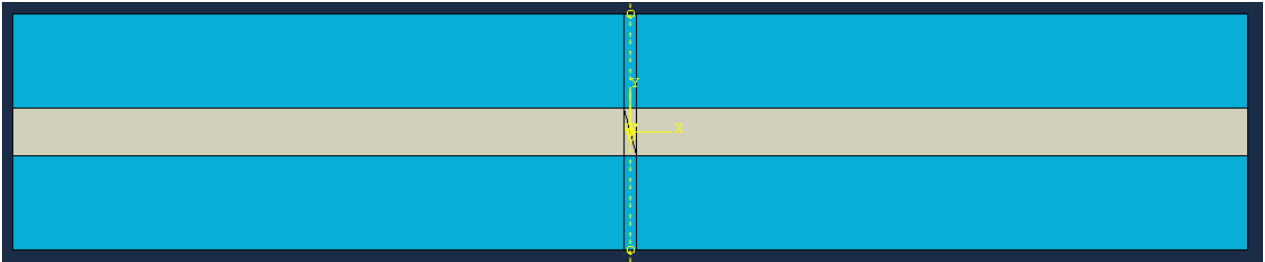


Figura 3.16. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 75°

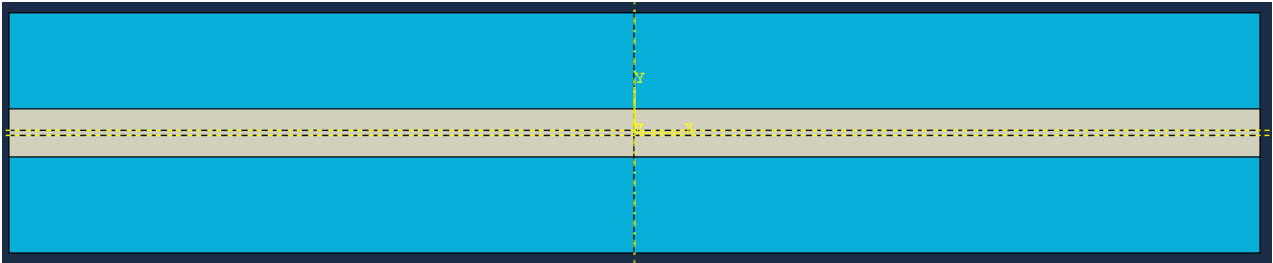


Figura 3.17. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 2 con un ángulo α de 90°

A continuación, en la Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20, Figura 3.21 y Figura 3.22 se muestra el mallado a diferentes escalas para el ángulo α de 45° . El mallado para el resto de modelos con los diferentes ángulos es equivalente, por lo que sólo se muestra el mencionado.

El mallado consiste en cuadriláteros en general, con un mallado *Free* con cuadriláteros y triángulos en la región central de la grieta. El tamaño mínimo de elemento se da en la grieta y es de $5E-5$ mm y va aumentando progresivamente conforme se aleja de esta. El número de elementos es de 197.450.

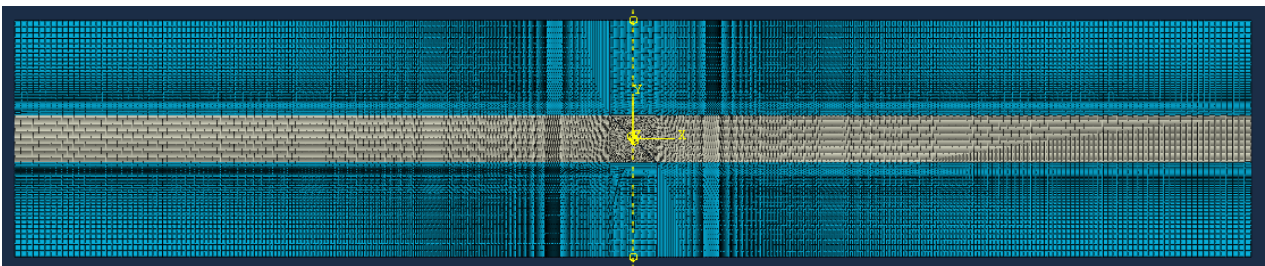


Figura 3.18. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45° . Vista general

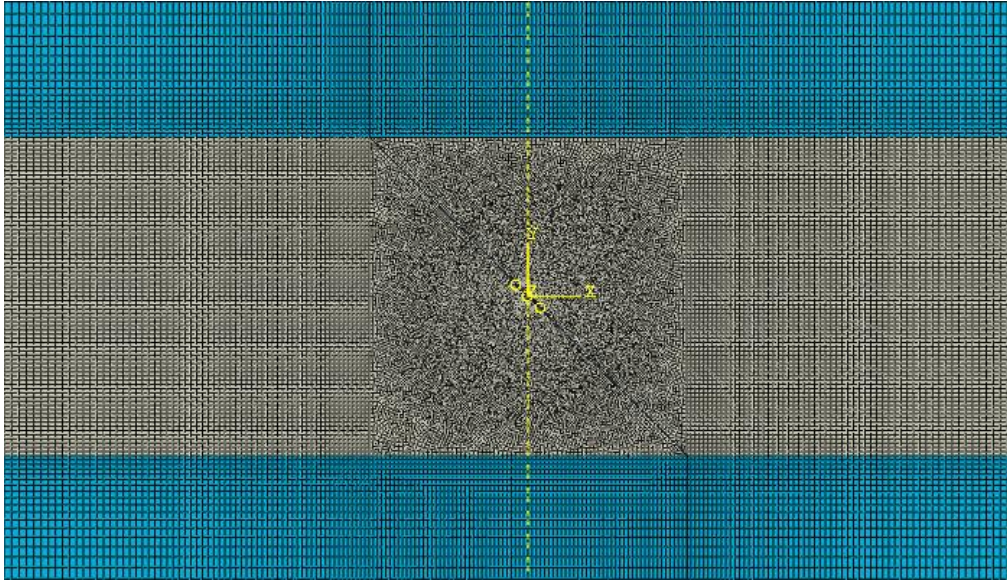


Figura 3.19. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45° . Vista general ampliada. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas

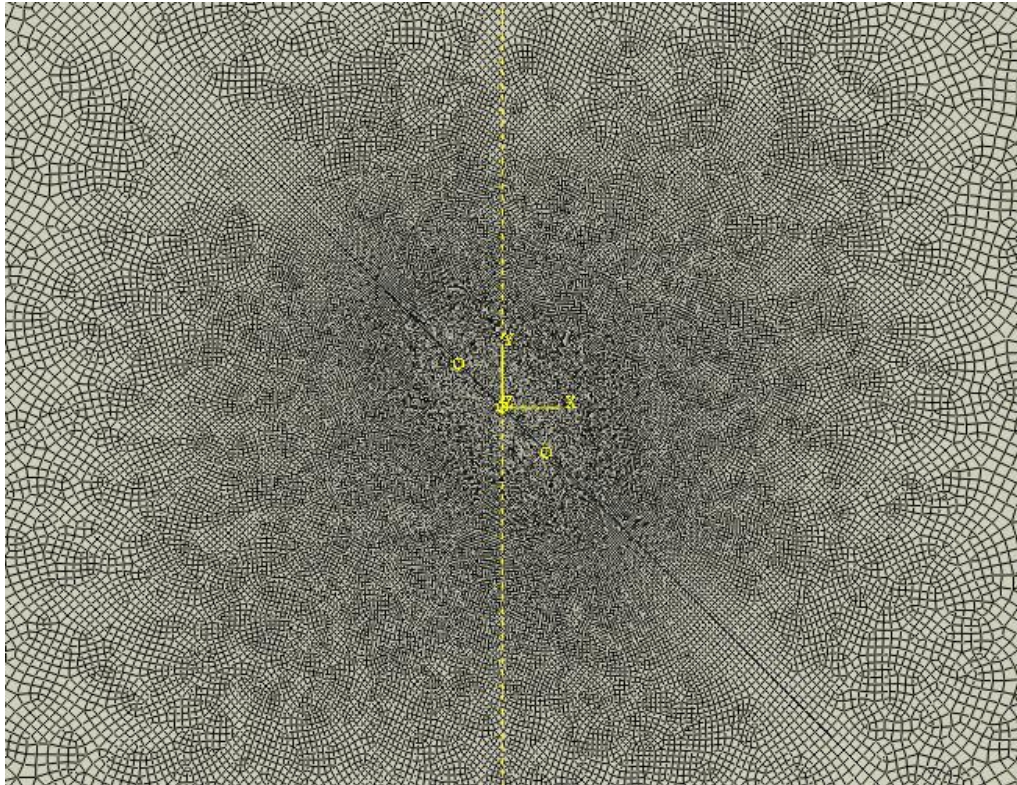


Figura 3.20. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45° . Vista de semidetalle. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas

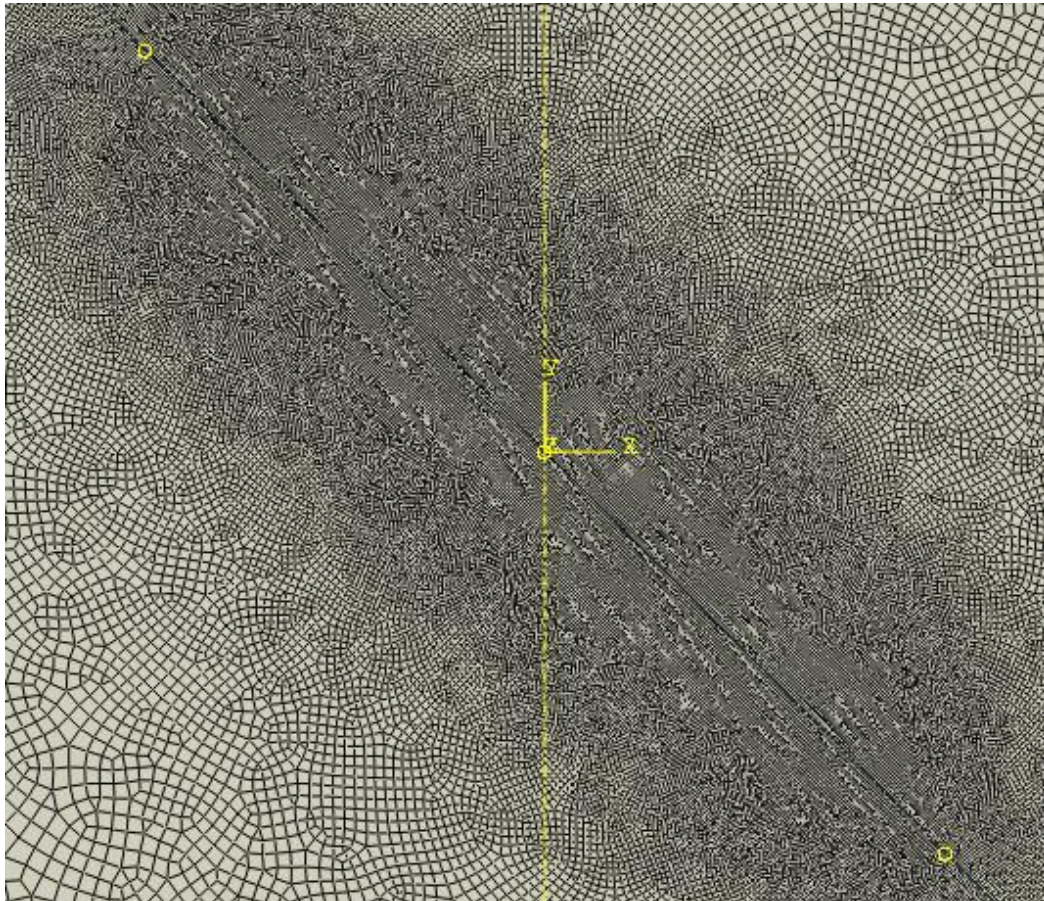


Figura 3.21. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45° . Vista de detalle. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas

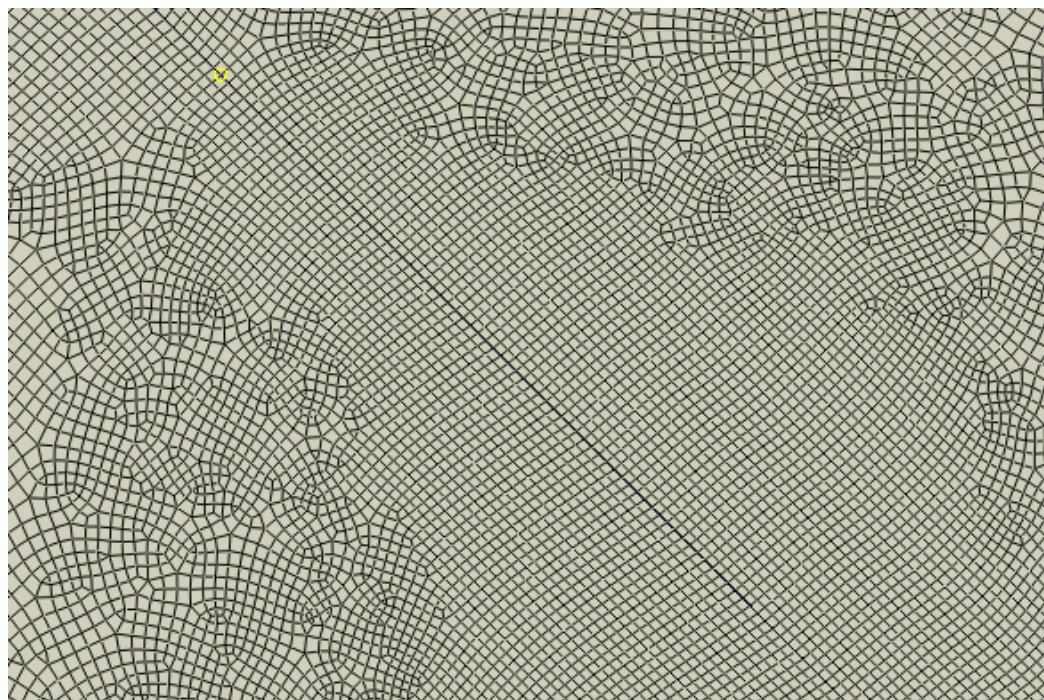


Figura 3.22. Mallado de Modelo 2 para ángulo α de 45° . Vista de detalle ampliada. La grieta se muestra limitada en la diagonal por las circunferencias amarillas. Se muestra el frente izquierdo

3.2.3 Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°

El objetivo de este modelo es obtener el índice de liberación de energía G (se describe en el Apartado 2.2.1.1) para el Modo I y II.

3.2.3.1 Geometría y modelado en Abaqus

En este modelo se simula la presencia de una grieta orientada a 45° respecto a la dirección longitudinal de la probeta, en el centro de la capa de 90° . Se estudia comparativamente su tendencia a propagarse calculando G_I y G_{II} para diferentes longitudes de grieta b . Se estudiarán las longitudes b de 0,02 mm; 0,04 mm; 0,08 mm; 0,12 mm; 0,16 mm y 0,20 mm. Estas longitudes modelan las situaciones desde un daño muy pequeño, hasta uno que atraviesa la capa de 90 casi totalmente transversalmente. Se asume un crecimiento simétrico de la grieta. Se muestra en la Figura 3.23.

El espesor de la capa de 90° es de 0,19 mm.

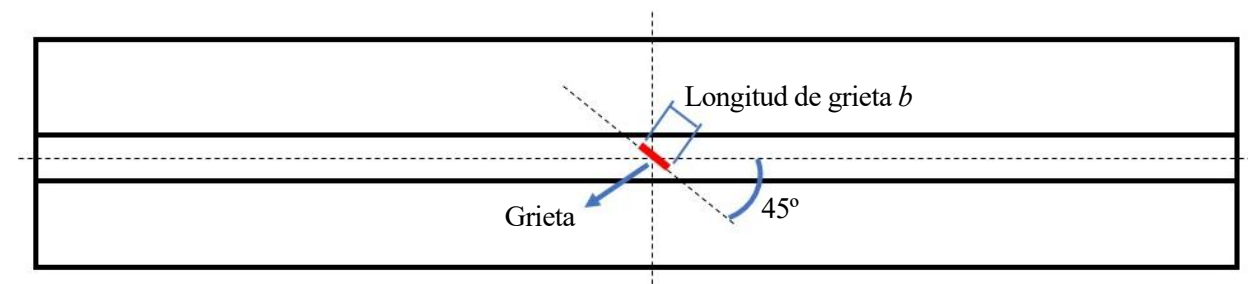


Figura 3.23. Esquema general Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°

El uso de los diferentes *Part* y la interacción entre ellos es el mismo que el usado en el Modelo 2 y se describe en el Apartado 3.2.2.1.

3.2.3.2 Mallado

En primer lugar, para facilitar la comprensión del mallado, en la Figura 3.24, se muestran las particiones que se han realizado geoméricamente como base para el mallado.

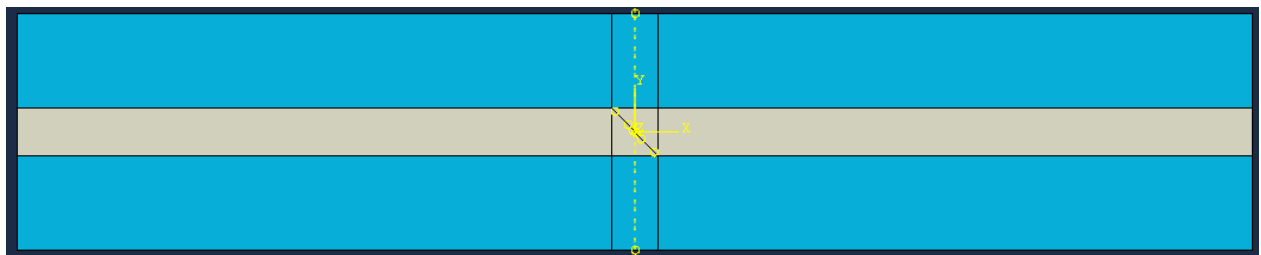


Figura 3.24. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 3

A continuación, se muestra el mallado para el Modelo 3 a diferentes escalas. Se ha optado por un mallado con el tamaño de elemento constante en toda la diagonal de $5E-5$ mm para que sea idéntico para todos los modelos independientemente de la longitud de grieta b que se considere y, consecuentemente, los resultados sean comparables. El número de elementos es de 1.351.099.

El mallado consiste en cuadriláteros en general, con un mallado *Free* con cuadriláteros y triángulos en la región central de la grieta. Se muestran en la Figura 3.25, Figura 3.26, Figura 3.27, Figura 3.28.

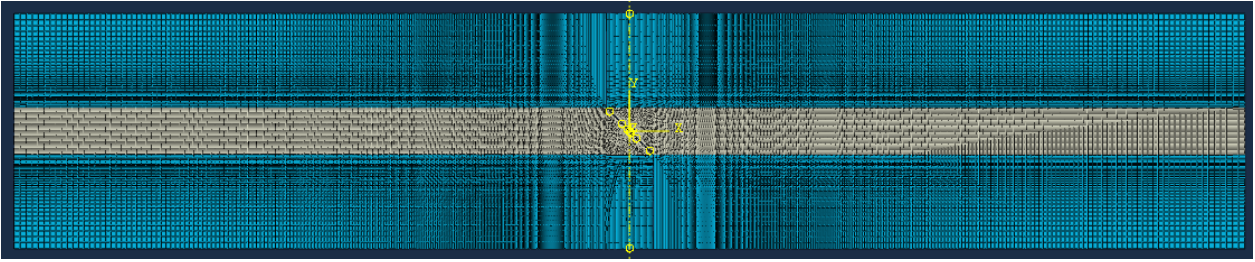


Figura 3.25. Mallado de Modelo 3. Vista general

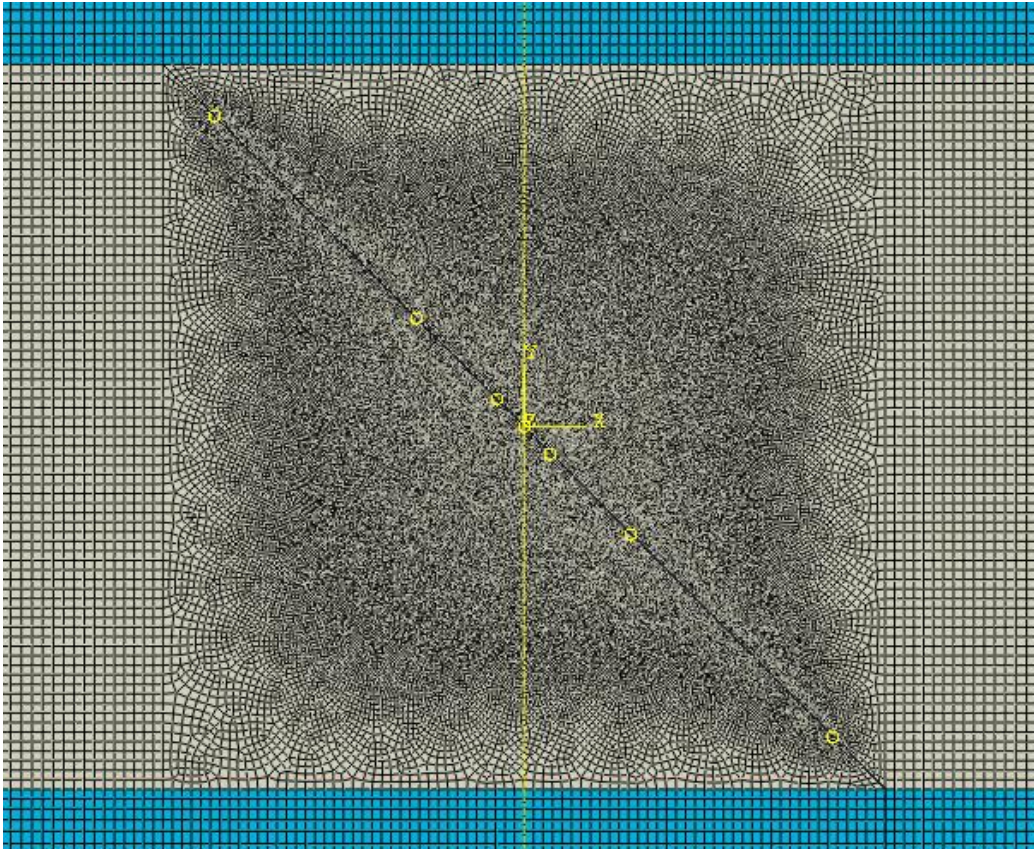


Figura 3.26. Mallado de Modelo 3. Vista general ampliada



Figura 3.27. Mallado de Modelo 3. Vista de detalle

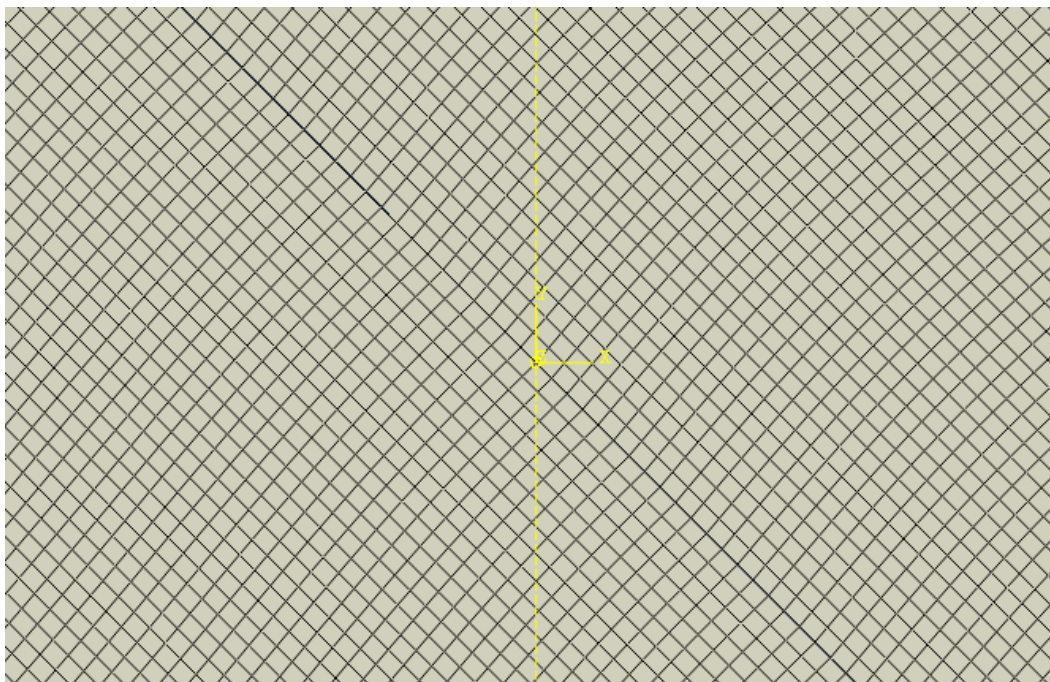


Figura 3.28. Mallado de Modelo 3. Vista de detalle ampliada

3.2.4 Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central

El objetivo de este modelo es obtener el índice de liberación de energía G (se describe en el Apartado 2.2.1.1) para el Modo I y II.

3.2.4.1 Geometría y modelado en Abaqus

En este modelo se simula la presencia de una grieta de 0,02 mm orientada a 45° respecto a la dirección longitudinal de la probeta, en el centro de la capa de 90° . Se estudia comparativamente su tendencia a propagarse calculando G_I y G_{II} para diferentes espesores de la capa de 90° e . Se estudiarán los espesores e de 0,095 mm

(mitad del espesor para el que se ha observado el fallo); 0,19 mm (espesor para el que se ha observado el fallo) y 0,38 mm (doble del espesor para el que se ha observado el fallo). Se muestra en la Figura 3.29.

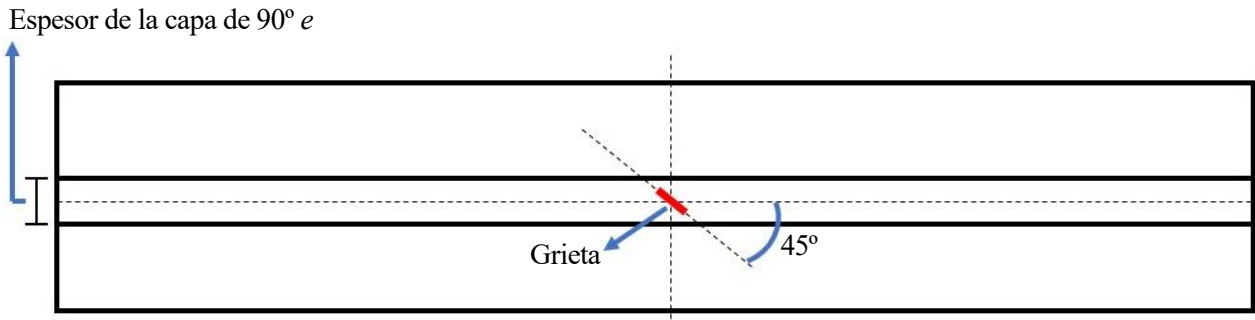


Figura 3.29. Esquema Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central. La longitud de la grieta se ha exagerado para hacerla visible

El uso de los diferentes *Part* y la interacción entre ellos es el mismo que el usado en el Modelo 2 y se describe en el Apartado 3.2.2.1.

3.2.4.2 Mallado

En primer lugar, para facilitar la comprensión del mallado, en la Figura 3.30, Figura 3.31 y Figura 3.32, se muestran las particiones que se han realizado geoméricamente como base para el mallado para los diferentes espesores.

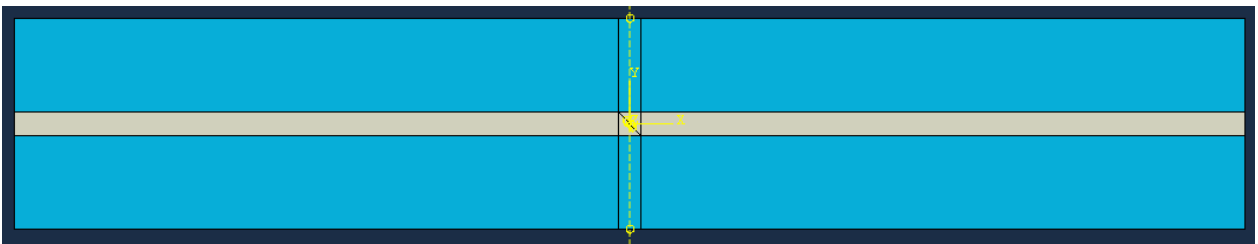


Figura 3.30. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de $90^\circ e$ de 0,095 mm

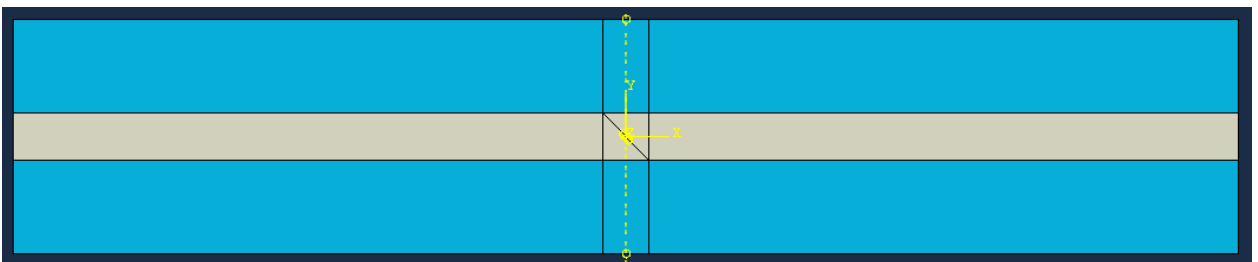


Figura 3.31. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de $90^\circ e$ de 0,19 mm

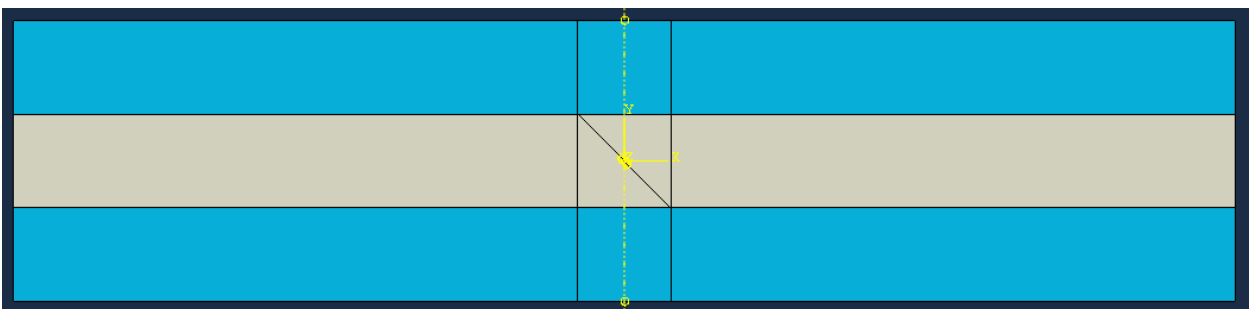


Figura 3.32. Particiones geométricas de base de mallado para el Modelo 4 con un espesor de la capa de $90^\circ e$ de 0,38 mm

A continuación, se describe el mallado para el Modelo 4. Se ha optado por un mallado con el tamaño de elemento constante en toda la diagonal de 5E-5 mm independientemente del espesor de la capa de 90° e que se considere y, consecuentemente, los resultados sean comparables. El número de elementos es de 1.351.099.

El mallado consiste en cuadriláteros en general, con un mallado *Free* con cuadriláteros y triángulos en la región central de la grieta. Como se observa, el mallado es el mismo que el empleado en el Modelo 3 y, por tanto, se muestra el mallado para un espesor de la capa de 90° e de 0,19 mm en el Apartado 3.2.3.2. Para otros espesores, el mallado es equivalente.

3.2.5 Modelo 5. Estudio de variación de W en daño explosivo con el espesor de la capa de 90° y con el ángulo de la grieta

El objetivo de este modelo es obtener el trabajo liberado en el daño explosivo por unidad de longitud (se describe en el Apartado 2.2.1.2) para las componentes normal y tangencial.

3.2.5.1 Geometría y modelado en Abaqus

En este modelo se estudiará la generación de un daño explosivo en la capa de 90°, para lo que se modelará una diagonal atravesando la capa de 90° que podrá ser una grieta abierta o cerrada (véase el Apartado 2.2.1.2). El esquema general de este modelo se muestra en la Figura 3.33. Se estudiarán los espesores de la capa de 90° h de 0,095 mm; 0,19 mm y 0,38 mm; y unos ángulos de la diagonal β de 30°, 45°, 60° y 90°.

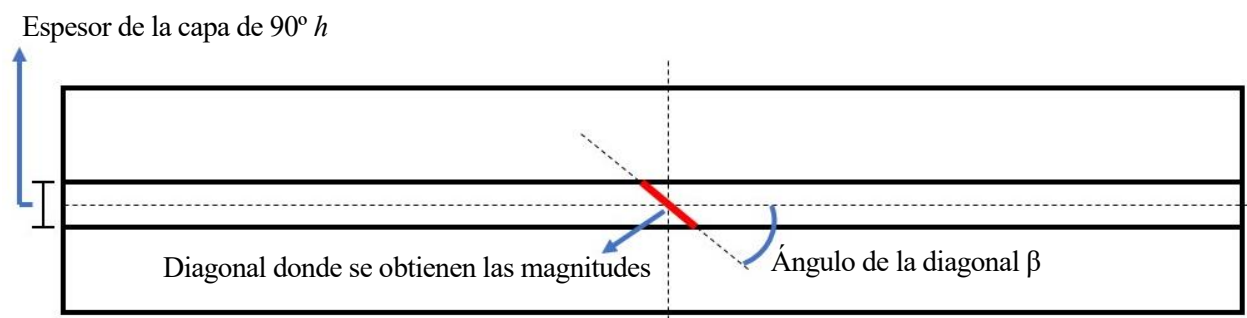


Figura 3.33. Esquema de Modelo 5. Estudio de variación de W en daño explosivo con el espesor de la capa de 90° h y el ángulo de la diagonal β

Dentro de este Modelo se han realizado diferentes submodelos, que recogen las diferentes combinaciones de espesores y de ángulos, y para cada uno de ellos las situaciones descritas en el Apartado 2.2.1.2 necesarias para el cálculo de W . En ellos se obtienen diferentes magnitudes en los nodos de la diagonal que atraviesa la zona central de la capa de 90°. Los submodelos y sus nombres se muestran en la Tabla 3.5, junto con los valores de los espesores de la capa de 90° y los ángulos de grieta que se han considerado.

Tabla 3.5. Nomenclatura de los Submodelos del Modelo 5

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	Submodelo 5.0095.30	Submodelo 5.019.30	Submodelo 5.038.30
	45°	Submodelo 5.0095.45	Submodelo 5.019.45	Submodelo 5.038.30
	60°	Submodelo 5.0095.60	Submodelo 5.019.45	Submodelo 5.038.45
	90°	Submodelo 5.0095.90	Submodelo 5.019.90	Submodelo 5.038.90

Además, para cada submodelo, se recogerán las siguientes situaciones:

- Submodelo 5.(...)A, grieta cerrada: cálculo de tensiones. El material está físicamente fusionado en la

diagonal. Se ha hecho uso de la herramienta *Merge* del módulo *Assembly*, generando un único *Part* con el que se trabaja.

- Submodelo 5.(...)B, grieta abierta: cálculo de apertura entre los labios de la grieta. Existe una grieta en toda la diagonal que atraviesa la capa de 90° . Para su introducción en Abaqus se ha hecho uso de dos *Part*, como se muestra en la Figura 3.34 en diferentes colores. En el módulo de ensamblaje (*Assembly* en Abaqus) se ha dejado el material sin ninguna interacción en la diagonal central (capa de 90°) y una restricción de *Tie* en las intersecciones verticales (capas de 0°) entre ambos *Part*.

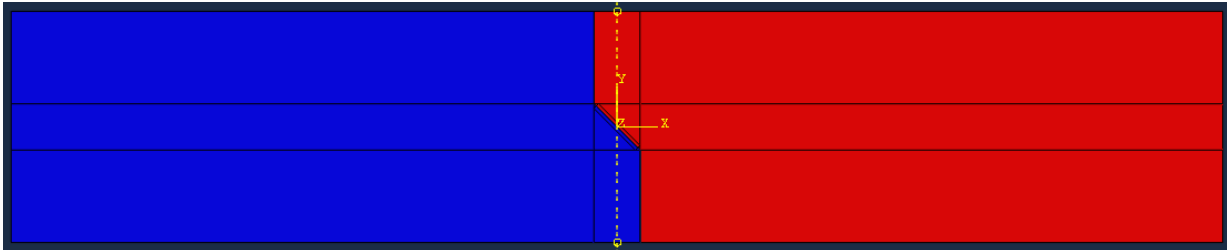


Figura 3.34. Esquema de los *Part* empleados en el Modelo 5

Una vez obtenidos las magnitudes descritas en ambos submodelos en ambas componentes normales y tangenciales, se hace uso de las expresiones descritas en el Apartado 2.2.1.2 para obtener el trabajo liberado W .

3.2.5.2 Mallado

Para que los resultados sean comparables, se ha buscado en todos los modelos que los elementos a un lado y a otro de la diagonal (material pegado en el submodelo 5A y grieta en el submodelo 5B) sean de un tamaño constante de $6,718E-3$ mm y que estos sean perfectamente cuadrados. Para conseguirlo, y teniendo en cuenta el mallado irregular que se produce inevitablemente en las particiones adyacentes a la diagonal por sus formas triangulares, se ha optado por realizar unas nuevas particiones paralelas a la diagonal y a una distancia igual al tamaño del elemento.

Se muestra las particiones geométricas para una mejor comprensión. En la Figura 3.35, Figura 3.36 y Figura 3.37 se muestra la vista general de las particiones para los diferentes ángulos de la diagonal β y un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm; y en la Figura 3.38 la vista de detalle para el caso de un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm y un ángulo de 45° . Para el resto de espesores y ángulos la geometría es equivalente.

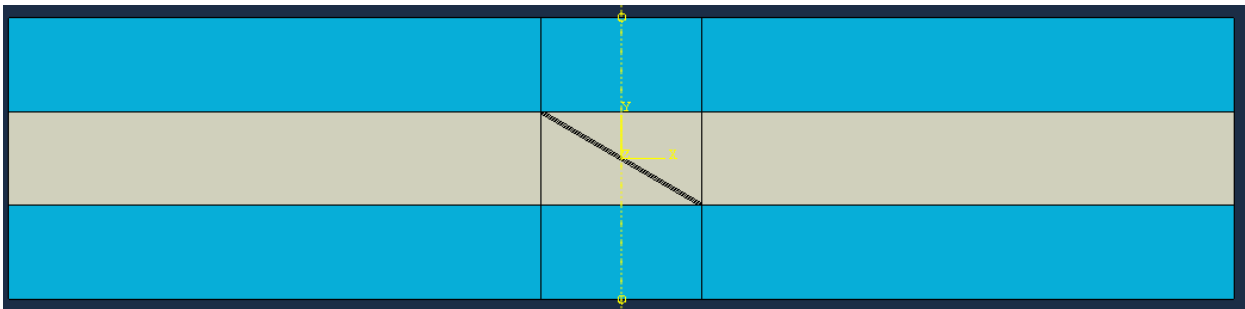


Figura 3.35. Particiones geométricas del Modelo 5.038.30 Vista general

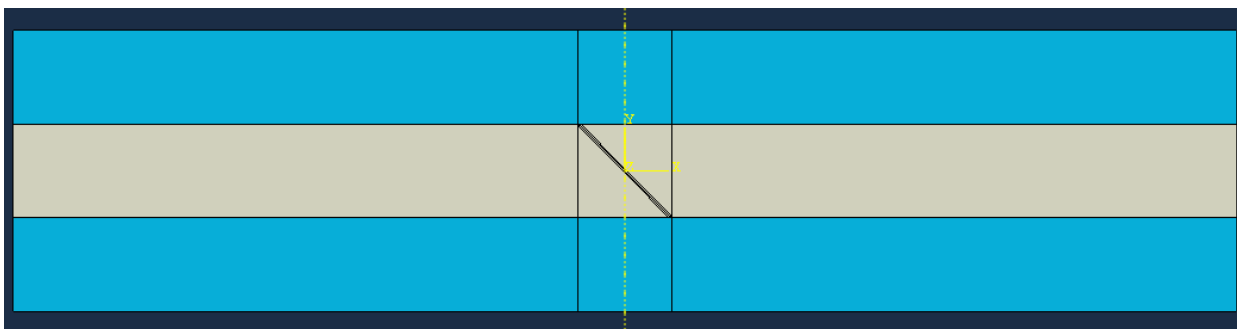


Figura 3.36. Particiones geométricas del Modelo 5.038.45 Vista general

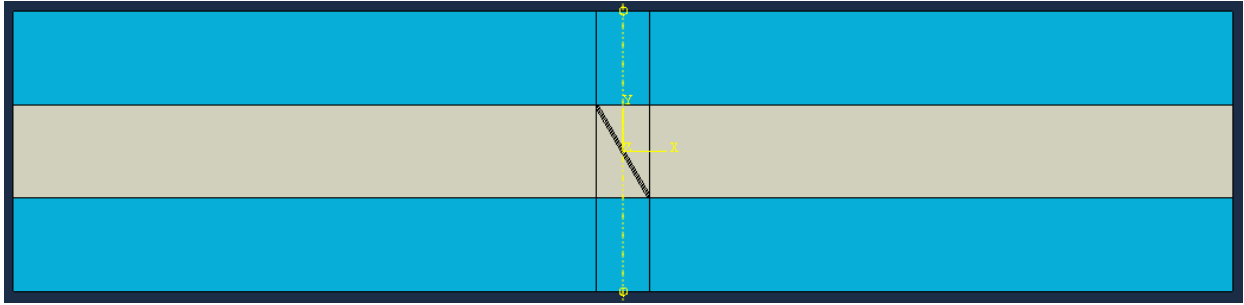


Figura 3.37. Particiones geométricas del Modelo 5.038.60 Vista general

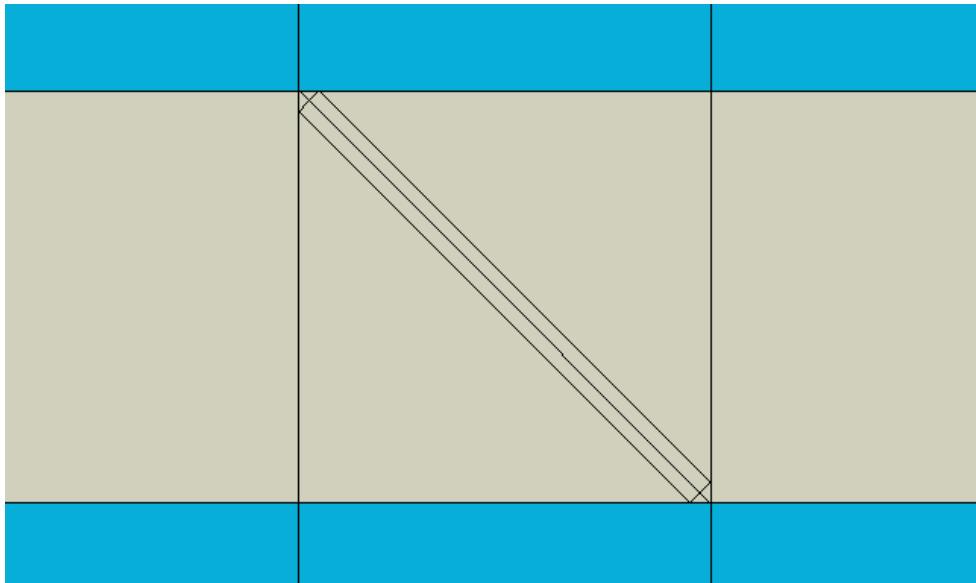
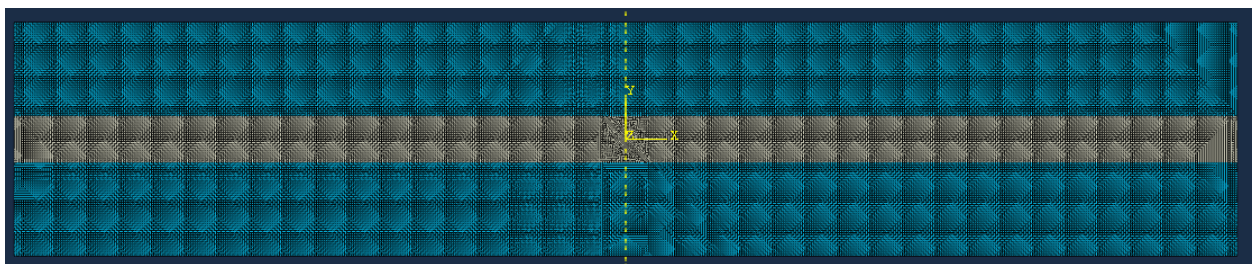


Figura 3.38. Particiones geométricas del Modelo 5.019.45. Vista de detalle

El mallado consiste en cuadriláteros en general, con un mallado *Free* con cuadriláteros y triángulos en la región central de la grieta, salvo en las bandas inmediatas a la diagonal. Se muestra el mallado para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm y un ángulo de 45° en la Figura 3.39 y Figura 3.40. Para otros espesores y ángulos, el mallado es equivalente. El número de elementos es de 52.862.

Figura 3.39. Mallado del Modelo 5 para un espesor de la capa de 90° h de 0,19 mm. Vista general

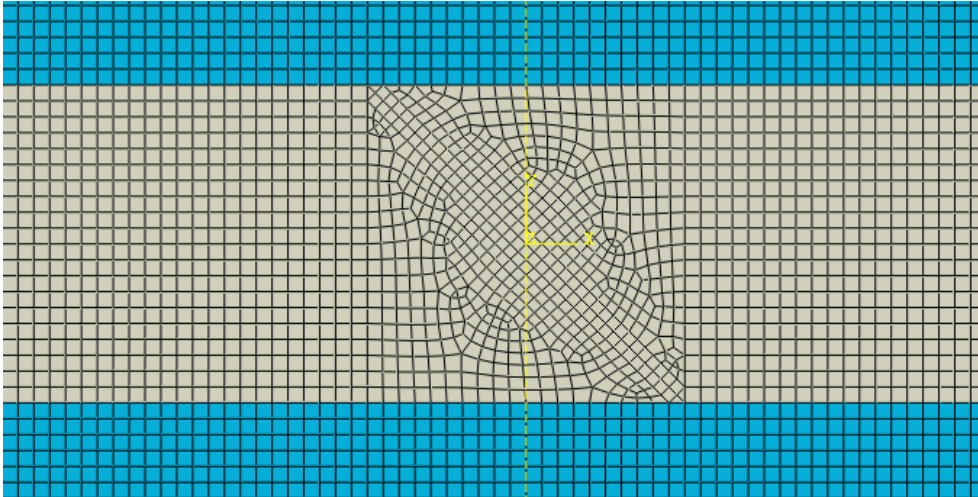


Figura 3.40. Mallado del Modelo 5 para un espesor de la capa de 90° h de 0,19 mm. Vista de detalle

3.2.6 Efecto de la temperatura de curado

Se ha hecho un estudio del efecto de la temperatura de curado para todos los modelos anteriores. Por tanto, las geometrías y las mallas son exactamente iguales que las anteriormente descritas.

4 RESULTADOS

En el presente capítulo se hace una recopilación de los resultados obtenidos de los modelos descritos en el Capítulo 3 y las decisiones que se han ido tomando, de cara al modelado, teniéndolos en cuenta.

4.1. Modelo 1. Estudio de variación de G con la longitud de grieta de delaminación en la interfase 0°-90°

Se muestran los resultados del modelo cuya geometría y malla se describen en el Apartado 3.2.1. Como se comenta en ese apartado, experimentalmente se observan unas grietas de delaminación grandes, que se tratan de modelar en este apartado. Se han modelado con diferentes tamaños para ver si en alguno de ellos aparecen indicios que sugieran la formación del daño a 45 grados observado.

Como se ha mencionado, las longitudes de grieta de delaminación estudiadas son de 0,02 mm; 0,625 mm; 1,25 mm; 1,875 mm y 2,5 mm. Estas longitudes van desde una delaminación muy pequeña hasta una que ocupa la mitad de la probeta. Se recuerda que la longitud de la probeta es de 5 mm.

Se han obtenido los resultados de los índices de liberación de energía en la punta de la grieta para ver la tendencia de la grieta de delaminación a progresar, y la tensión circunferencial máxima en la capa de 90 grados con respecto a la punta de la grieta para ver la tendencia a la generación del daño transversal a partir de la grieta de delaminación.

En primer lugar, se ha modelado el ensayo de tracción con la condición de contorno en desplazamientos (coherente con el ensayo experimental con control en desplazamientos). Sin embargo, los resultados obtenidos han sido numéricamente nulos y poco significativos por lo que también se ha hecho el estudio con control en carga.

Para los resultados del índice de liberación de energía, se han diferenciado tres situaciones, que se describen en el Apartado 3.2.1.1 y se recuerdan aquí:

- *Frente derecho*. Se ha modelado como VCCT la grieta (abierta) y lo que queda tras el frente derecho de esta (*Bonding*) y con una *Constraint* de *Tie* el frente izquierdo de la grieta.
- *Frente izquierdo*. Se ha modelado como VCCT la grieta (abierta) y lo que queda tras el frente izquierdo de esta (*Bonding*) y con una *Constraint* de *Tie* el frente derecho de la grieta.
- *Ambos frentes*. Se han modelado ambos frentes izquierdo y derecho como VCCT.

Los resultados obtenidos han sido los mismos, independientemente de estas tres definiciones, por lo que se muestran únicamente los resultados para el VCCT en ambos frentes para la condición de contorno en desplazamientos, y en el frente derecho para la condición de contorno en tensiones.

Es destacable que este modelo no es el objetivo fundamental del trabajo, sino que con él se buscaba la familiarización y comprensión de la herramienta VCCT. Además, el contenido de este modelo se ha realizado conjuntamente con otro trabajo [7].

4.1.1 Condición de contorno en desplazamientos

Debido a que el ensayo se ha hecho con control en desplazamientos, en primera instancia se ha optado por modelarlo como una condición de contorno en desplazamientos.

En primer lugar, se muestran imágenes de la indeformada (Figura 4.1) junto con la deformada (Figura 4.2). Se

muestran para una longitud de grieta a de 0,02 mm. El comportamiento cualitativo para el resto de longitudes de grieta es equivalente.



Figura 4.1. Indeformada del Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos



Figura 4.2. Deformada del Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos

4.1.1.1 Índice de liberación de energía

Los resultados de G_I y G_{II} se han calculado para ambos frentes de la grieta en los que se ha introducido VCCT. Se muestran en la Tabla 4.1. Los resultados se pueden considerar numéricamente nulos, por lo que no son significativos, ya que, o bien directamente tienen un valor de cero o bien son distintos de cero, pero tienen un valor muy próximo. Estos resultados eran esperables ya que, bajo las circunstancias modeladas, la grieta no se ve afectada por la carga mecánica, e indican que la grieta de delaminación no tiene tendencia a crecer en ninguno de los modos de fractura.

Tabla 4.1. G_I y G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos y VCCT en ambos frentes

Longitud de la grieta a (mm)	Frente izquierdo		Frente derecho	
	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)
0,02	3,421E-29	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
0,625	0,000E+00	9,342E-28	0,000E+00	4,162E-27
1,25	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,491E-26
1,875	1,256E-28	3,541E-25	0,000E+00	7,801E-26

4.1.1.2 Tensión circunferencial máxima

A continuación se analiza la tensión circunferencial máxima como una medida de la tendencia a aparecer un daño transversal a partir de la grieta de delaminación.

En la Figura 4.3 se muestra un mapa de la tensión circunferencial en la capa de 90° tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Se muestran para una longitud de grieta a de 0.02 mm. El comportamiento cualitativo para el resto de longitudes de grieta es similar.

Como se observa, la distribución de las tensiones circunferenciales máximas a tracción se da perpendicularmente a la grieta de delaminación modelada, de forma que no explicaría el crecimiento de la grieta observado a 45° .

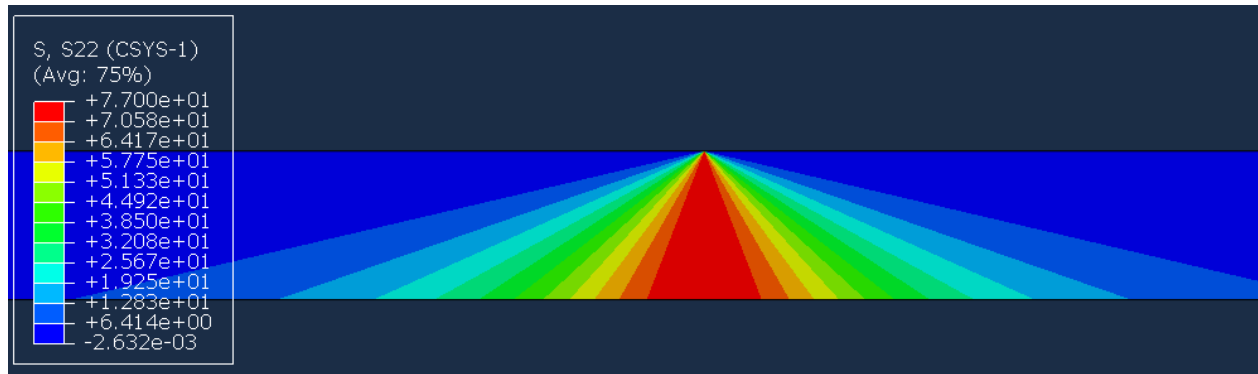


Figura 4.3. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm

En cuanto al comportamiento cuantitativo, se muestra en la Tabla 4.2. Se observa que no existe un cambio significativo en la tensión circunferencial máxima, de forma que esta permanece constante con el crecimiento de la grieta. Se observa, por tanto, que no existe un aumento de la tendencia al daño transversal con el crecimiento de la grieta de delaminación.

Tabla 4.2. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1 con condición de contorno en desplazamientos

Longitud de la grieta a (mm)	Tensión circunferencial máxima (MPa)
0,02	7,70016E+01
0,625	7,70002E+01
1,25	7,70001E+01
1,875	7,70001E+01
2,5	7,70000E+01

Esta evolución de los resultados era esperable ya que, bajo las condiciones modeladas, la grieta no está trabajando de ninguna forma y los resultados no se ven alterados por el crecimiento de esta.

Además, cabe destacar que los valores introducidos en el modelo de desplazamientos son, aproximadamente, aquellos que se han observado experimentalmente para el momento en el que se ha producido el fallo. Bajo estas condiciones, se observa que se obtiene una tensión circunferencial máxima de 77 MPa. Por otro lado, la resistencia transversal de la capa de 90 grados, obtenida experimentalmente, es de $Y_T = 60$ MPa. Por tanto, bajo estas condiciones existe una tensión superior en la capa de 90 que la resistencia, y se produciría la rotura de esta, hecho coherente con la observación del fallo.

4.1.2 Condición de contorno en tensiones

Debido a que, como se ha visto en el Apartado 4.1.1, los resultados con la condición de contorno en desplazamientos no han sido significativos, se ha modelado la condición de contorno en tensiones de cara a una mejor comprensión de la herramienta VCCT y sabiendo que este modelado se aleja más de la realidad del ensayo. En este caso, debido a las diferentes propiedades elásticas de las capas, una misma tracción genera deformaciones diferentes para las diferentes capas y da lugar a una deformada como la que se muestra en la imagen. Por lo tanto, en este caso, debido a la diferente deformación de las capas, genera un índice de liberación de energía mayor.

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada. Se muestran para una longitud de grieta a de 0,02 mm. El comportamiento cualitativo para el resto de longitudes de grieta es equivalente.

En la Figura 4.4 se muestra la deformada del Modelo 1.



Figura 4.4. Deformada de Modelo 1 con una longitud de grieta a de 0,02 mm con condición de contorno en tensiones

4.1.2.1 Índice de liberación de energía

A continuación se presentan los resultados obtenidos del índice de liberación de energía en la punta de la grieta para este modelo, en el que se ha introducido el VCCT en el frente derecho. Se muestran los resultados de G_I y G_{II} en la Tabla 4.3 y G_{II} se representa en la Figura 4.5. G_I no se representa al ser nulo, salvo para la grieta de 2,5 mm, hecho que se destacará más tarde.

Tabla 4.3. G_I y G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y VCCT en frente derecho

Longitud de la grieta a (mm)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)
0,02	0,000E+00	2,709E-12
0,625	0,000E+00	8,943E-08
1,25	0,000E+00	1,564E-06
1,875	0,000E+00	2,772E-05
2,5	6,12E-02	1,050E+00

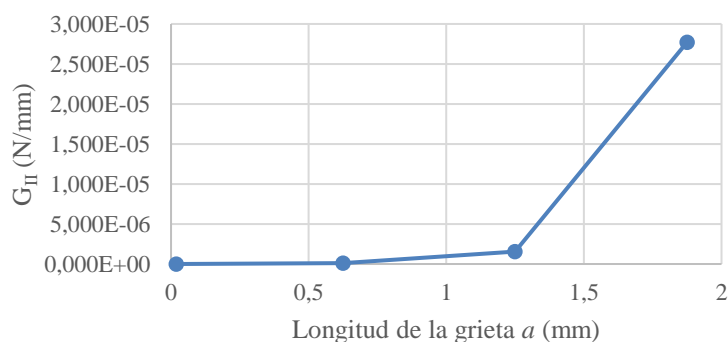


Figura 4.5. G_{II} con la longitud de grieta a para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y VCCT en frente derecho

Se observa que G_{II} es creciente con la longitud de la grieta y que alcanza unos valores mucho más significativos que con la condición de contorno en desplazamientos, aunque siguen siendo muy pequeños hasta que la grieta de delaminación no tiene una longitud significativa. Esta tendencia creciente del índice de liberación de energía en modo II supone que el crecimiento de la grieta de delaminación sería inestable en modo II una vez que este se iniciase. De esta forma, si se forman pequeñas delaminaciones, estas se podrían extender y crear grandes delaminaciones como las observadas experimentalmente.

4.1.2.2 Tensión circunferencial máxima

A continuación, se analiza la tensión circunferencial máxima como una medida de la tendencia a aparecer un daño transversal a partir de la grieta de delaminación.

En la Figura 4.6 se muestra un mapa de la tensión circunferencial en la capa de 90° tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Se muestran para una longitud de grieta a de 0,02 mm. El comportamiento cualitativo para las longitudes de 0,625 mm y 1,25 mm de grieta es equivalente.

Como se observa, la distribución de las tensiones circunferenciales máximas a tracción se da perpendicularmente a la grieta de delaminación modelada, de forma que no explicaría el crecimiento de la grieta observado a 45°.

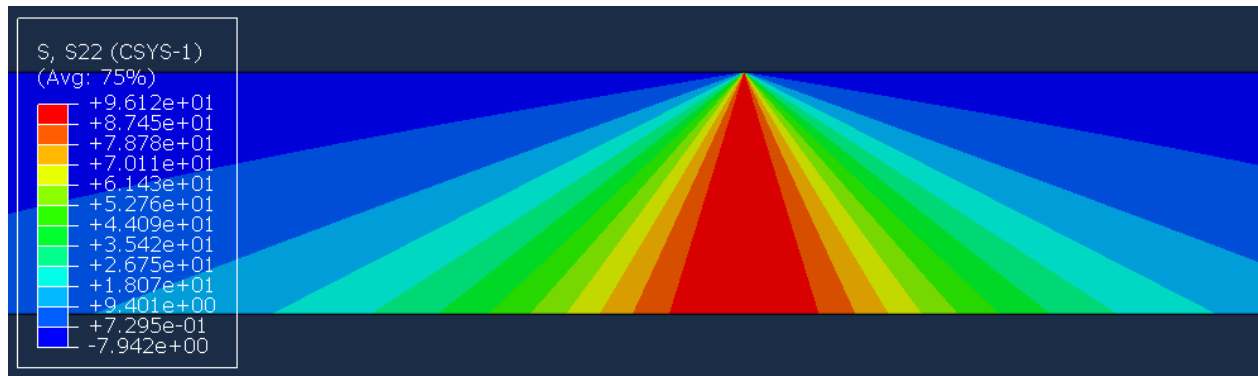


Figura 4.6. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm

En cuanto al comportamiento cuantitativo, se muestra en la Tabla 4.4 y se representa en la Figura 4.7 con una vista global y en la Figura 4.8 con una visión de detalle. Se observa que, aunque en general el comportamiento es bastante plano, existe un comportamiento ligeramente creciente de la tensión circunferencial con la longitud de grieta. Por tanto, existe un cierto aumento de la tendencia a la generación del daño transversal con el crecimiento de la grieta de delaminación. Nótese que esto no se producía para el caso de la condición de contorno en desplazamientos.

Tabla 4.4. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones

Longitud de la grieta a (mm)	Tensión circunferencial máxima (MPa)
0,02	9,61209E+01
0,625	9,65977E+01
1,25	9,81144E+01
1,875	1,04500E+02

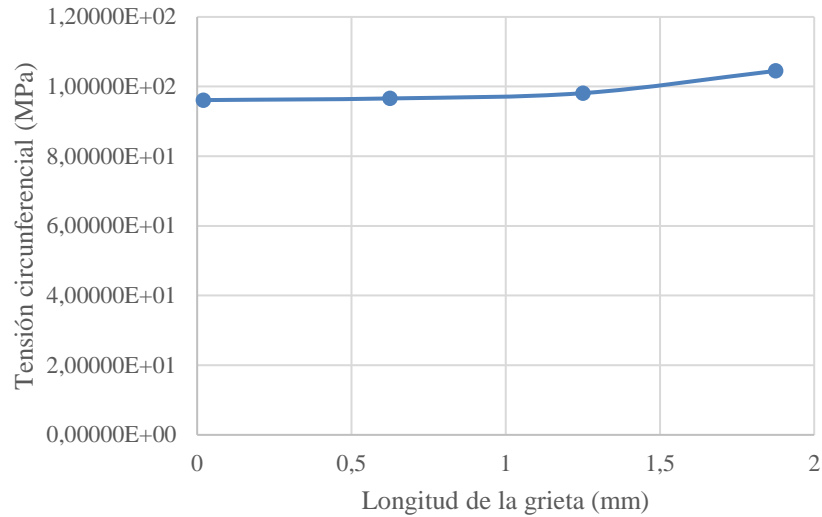


Figura 4.7. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones. Vista global

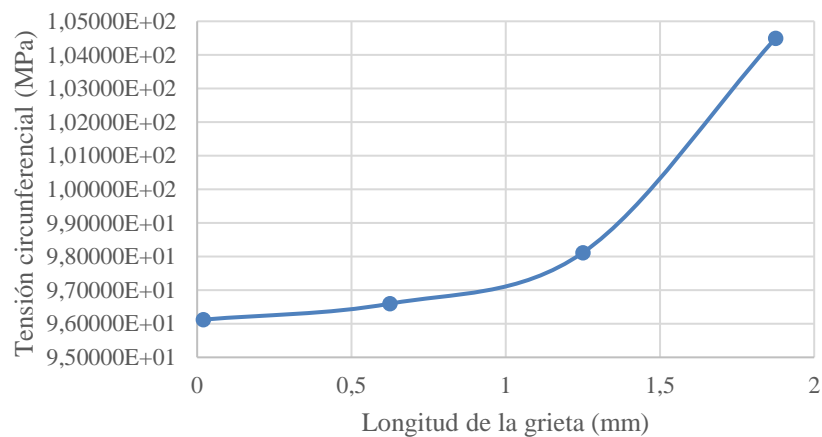


Figura 4.8. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1 con condición de contorno en tensiones. Vista ampliada

Además, cabe destacar que, los valores introducidos en el modelo de desplazamientos son, aproximadamente, aquellos que se han observado experimentalmente para el momento en el que se ha producido el fallo. Bajo estas condiciones, se observa que se obtiene una tensión circunferencial máxima de 96 MPa para una grieta de 0,02 mm e incluso más para longitudes de grieta mayores. Por otro lado, la resistencia transversal de la capa de 90 grados, obtenida experimentalmente, es de $Y_T = 60$ MPa. Por tanto, bajo estas condiciones existe una tensión superior en la capa de 90 que la resistencia, y se produciría la rotura de esta, hecho coherente con la observación del fallo.

Cabe hacer una mención especial de dos casos concretos: el de una longitud de grieta a de 1,875 mm y 2,5 mm. En el caso de una longitud de grieta de 1,875 mm la deformada se muestra en la Figura 4.9 y Figura 4.10.

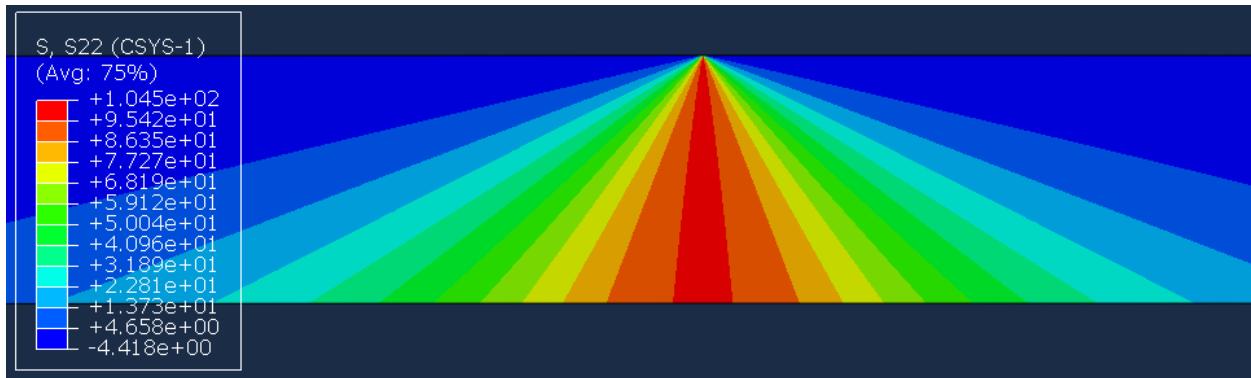


Figura 4.9. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 1,875 mm. Vista general

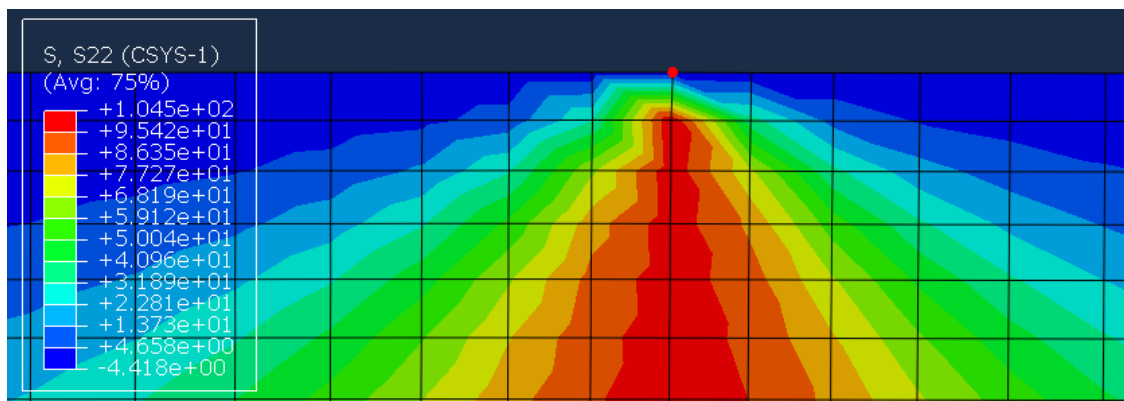


Figura 4.10. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 1,875 mm. Vista de detalle

En primer lugar, se observa que la región de tensiones circunferenciales máximas de tracción (representada en rojo) es más estrecha que para el caso de longitudes de grieta menor, representando el color rojo la misma amplitud del rango de variación de tensiones que en la Figura 4.6, Esto supone que existe una mayor concentración de la tensión. Además, en la imagen de detalle se muestra una ligera desviación de la tensión circunferencial máxima de la dirección de 90 grados, hecho que sugiere la aparición de una grieta con un determinado ángulo.

Sin embargo, esta desviación afecta a una distancia muy pequeña desde el fondo de grieta donde la hipótesis mesomecánica del modelo dejaría de ser válida por lo que la representatividad de este resultado es cuestionable.

El segundo caso es el de la grieta de una longitud de 2,5 mm. En este caso la grieta va desde el centro de la probeta hasta el final del modelo por la izquierda, ya que la longitud total de la probeta modelada es de 5 mm. De esta forma, la grieta está abierta por su frente izquierdo, quedando inconexas por esta zona del modelo la capa de 0° y 90°. La deformada de esta situación se muestra en la Figura 4.11. En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se muestran mapas de tensión circunferencial en la capa de 90° tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta.

Como se observa, en este caso, siguiendo la tendencia del caso de la grieta de 1,875 mm, la dirección en la que aparecen las tensiones máximas no es perpendicular a la grieta, sino que forma cierto ángulo con respecto a dicha perpendicular, hecho que sugiere la aparición de una grieta con un determinado ángulo. Este caso, junto con el anterior, ha sido estudiado con mayor profundidad en [7] no dando lugar a resultados que fundamenten suficientemente, y con las hipótesis asumidas, la generación de una grieta a 45° a partir de la delaminación.



Figura 4.11. Deformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm

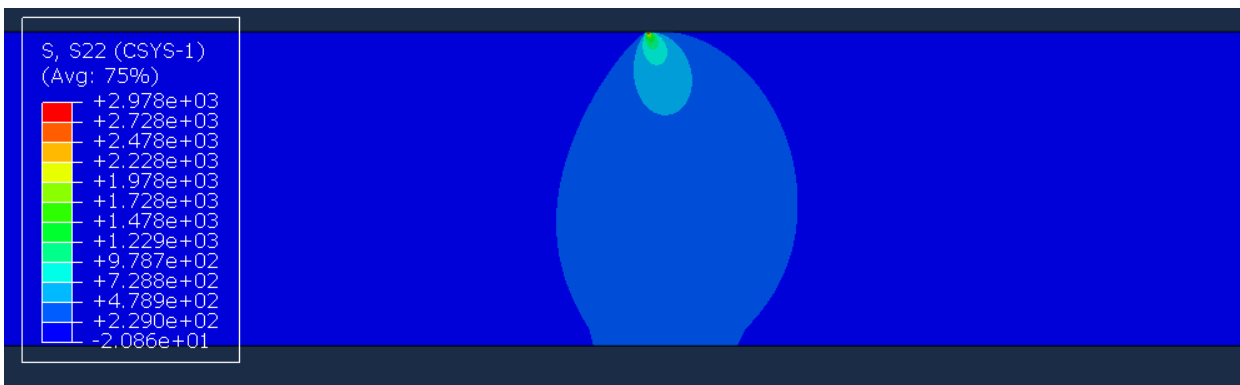


Figura 4.12. Mapa de tensiones circunferenciales (MPa) sobre indeformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Vista general

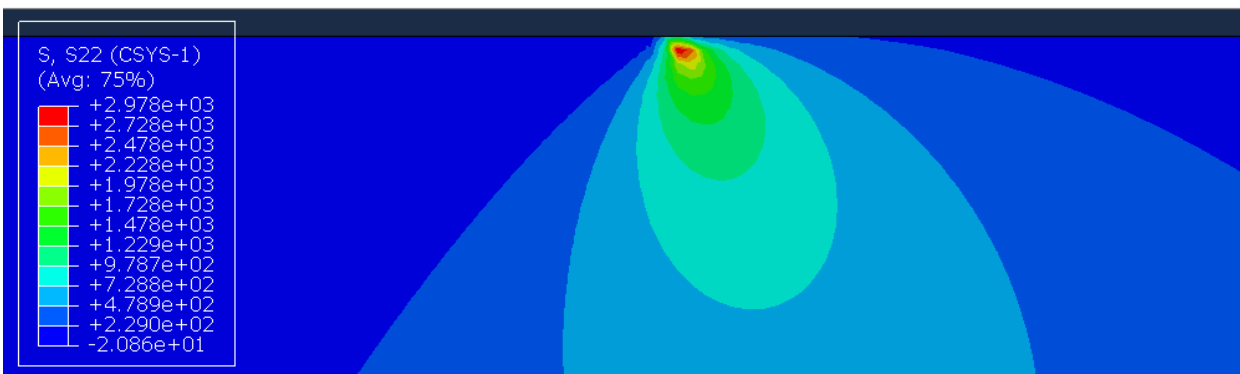


Figura 4.13. Mapa de tensiones circunferenciales (MPa) sobre indeformada de Modelo 1 con condición de contorno en tensiones y con grieta de longitud a de 2,5 mm tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Vista de detalle

4.2. Modelo 2. Estudio de variación de G con el ángulo de la grieta centrada en la capa de 90°

Una vez estudiado el caso de la grieta de delaminación, se abandona esta línea, que se continua en otro trabajo realizado paralelamente a este [7], y pasa a abordarse el objetivo fundamental del proyecto, en el que se modela la situación en la que se haya producido previamente una pequeña grieta centrada en la capa de 90 grados, como origen del daño observado experimentalmente en las microfotografías. En primer lugar, se busca, bajo esta premisa, estudiar el efecto del ángulo de esta pequeña grieta, que se ha modelado con una longitud de 0,02 mm, para tratar de explicar la aparición del daño a 45 grados. Se muestran los resultados del modelo cuya geometría y

mallado se describen en el Apartado 3.2.2.

Se ha modelado con la condición de contorno en desplazamientos (coherente con el ensayo experimental con control en desplazamientos). En cuanto al VCCT, este se ha modelado para ambos frentes de la grieta y se muestran los correspondientes resultados por separado, hecho que se aclarará más tarde.

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada y los mapas de tensiones en esta. Se muestran para un ángulo de la grieta α de 45° . El comportamiento cualitativo para el resto de ángulos es equivalente.

Se muestran imágenes de la deformada de la grieta en la Figura 4.14 y Figura 4.15. Se muestra el mapa de tensiones tangenciales a la grieta en la Figura 4.16, Figura 4.17 y Figura 4.18; y el mapa de tensiones normales a la grieta en la Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21, todos sobre el sólido deformado, para dar una idea de la distribución de estas y del orden de magnitud de estas.

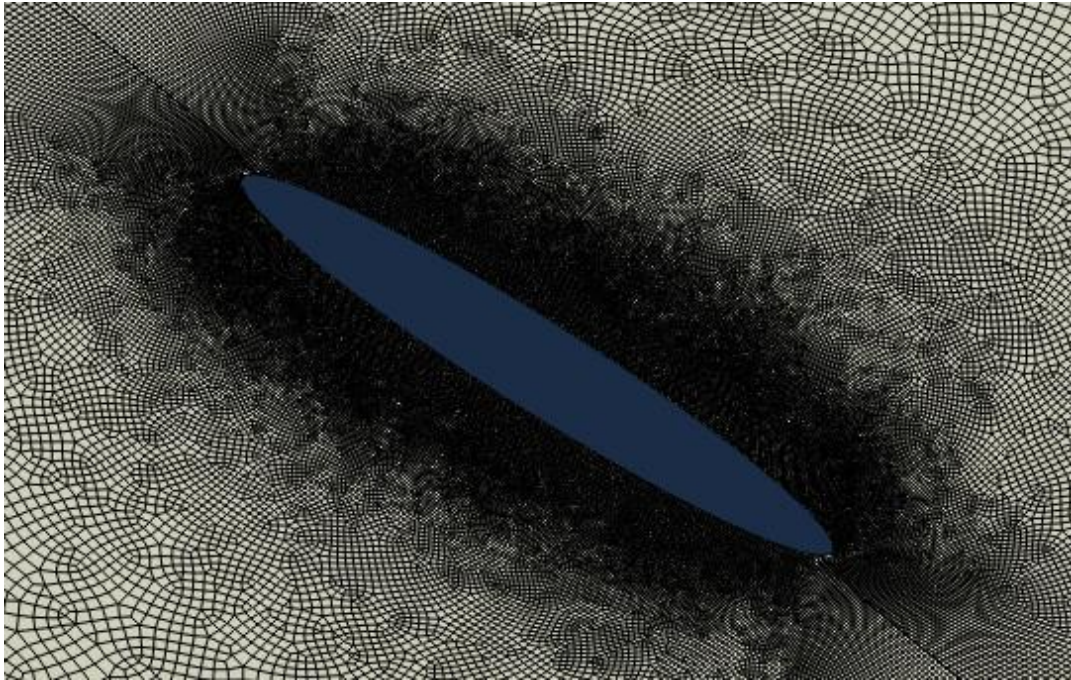


Figura 4.14. Deformada de la grieta del Modelo 2 para un ángulo de la grieta α de 45° . Vista de detalle de la grieta

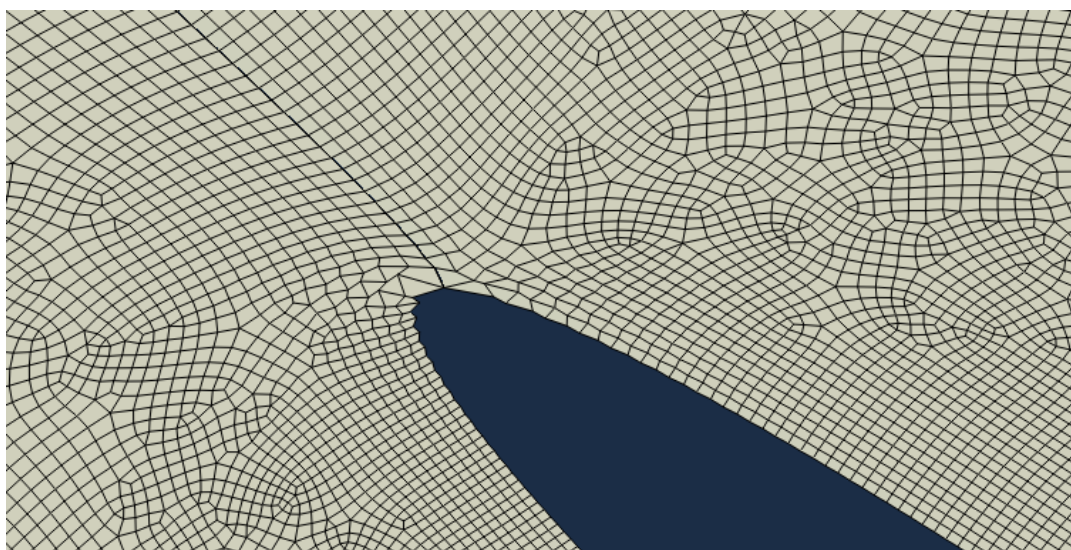


Figura 4.15. Deformada de la punta de la grieta para Modelo 2 para un ángulo de la grieta α de 45° . Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta

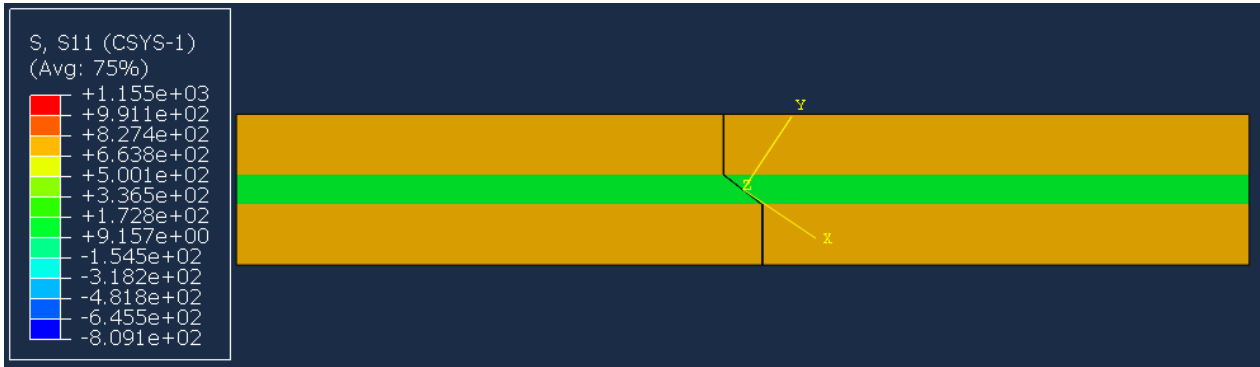


Figura 4.16. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45° . Vista general

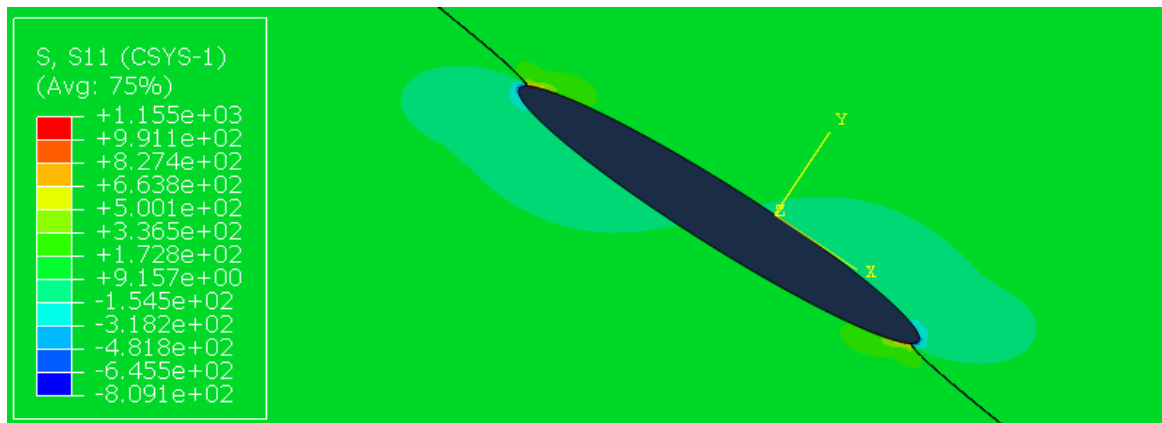


Figura 4.17. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45° . Vista de detalle de la grieta

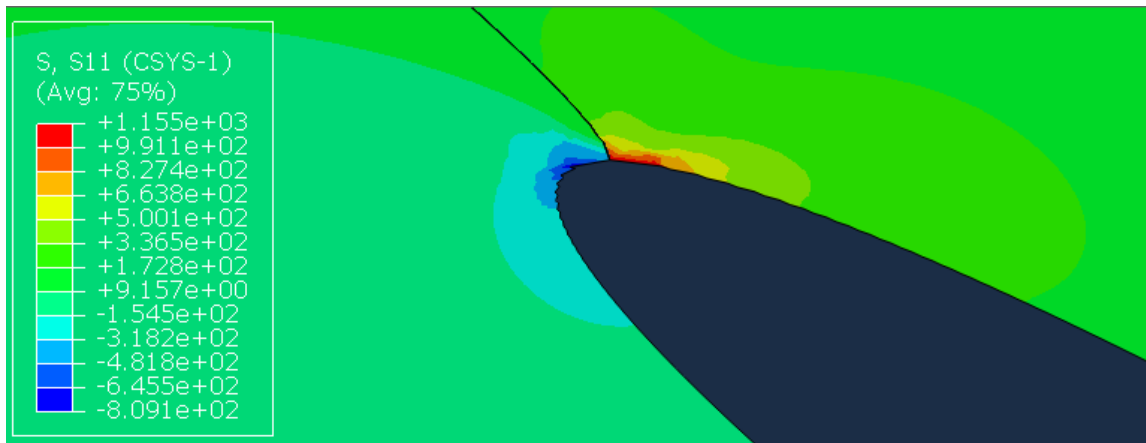


Figura 4.18. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45° . Visión de detalle de la punta de la grieta. Frente izquierdo

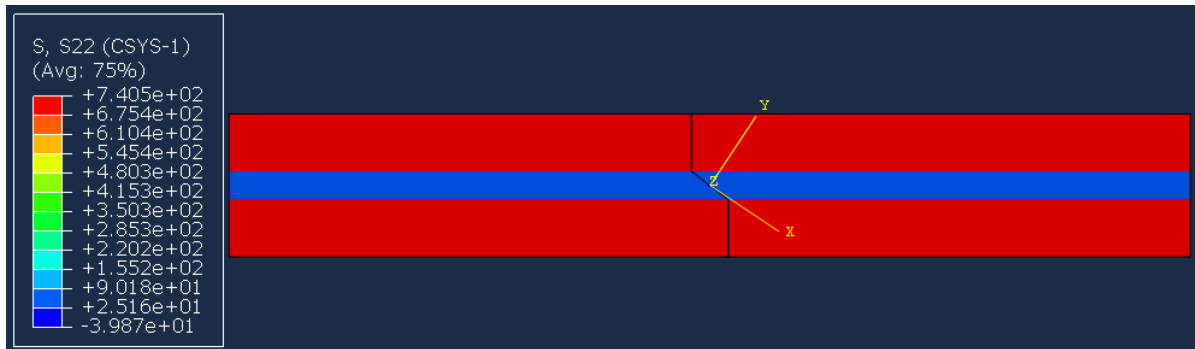


Figura 4.19. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista general

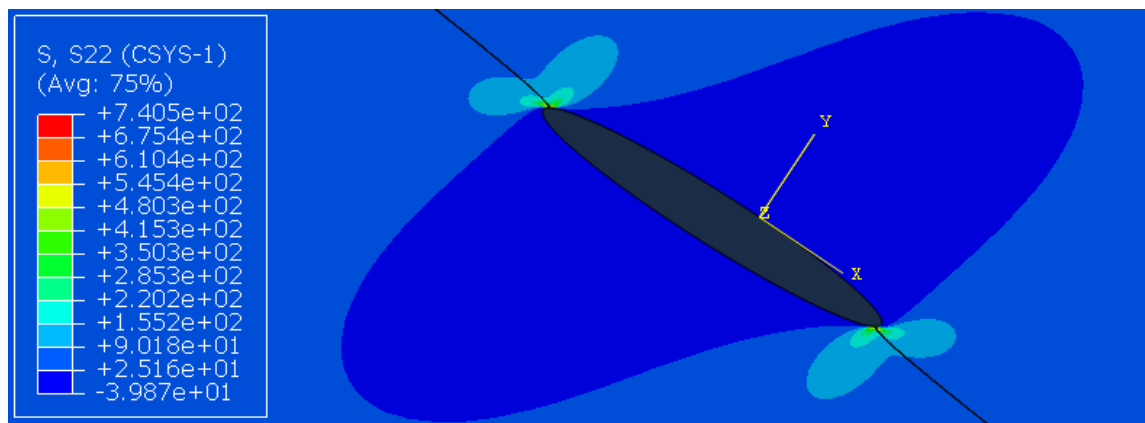


Figura 4.20. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la grieta

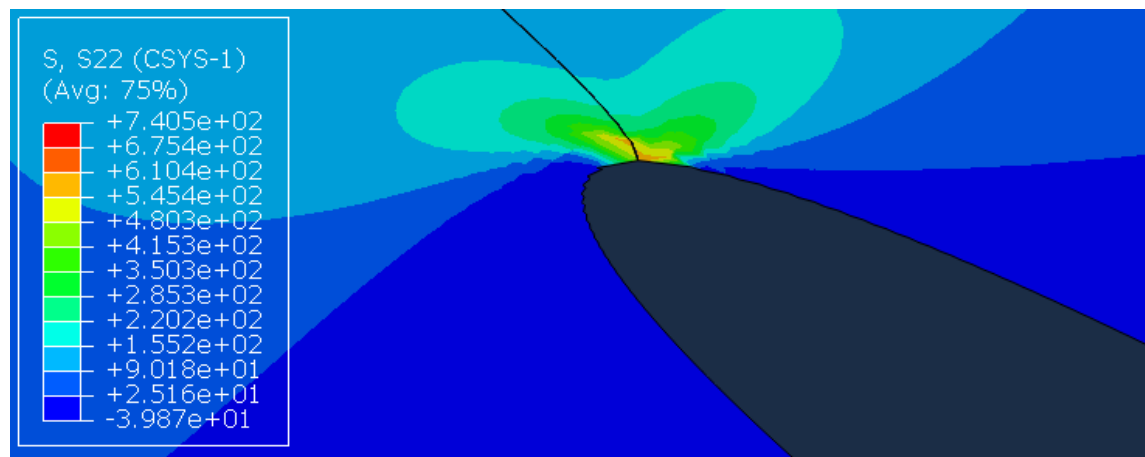


Figura 4.21. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Modelo 2 con un ángulo de la grieta α de 45°. Vista de detalle de la punta de la grieta

Se han obtenido los resultados del índice de liberación de energía como una muestra de la energía disponible para que la grieta progrese en los diferentes modos, así como la suma de estos. Además, se ha representado la mixicidad como $\psi_G = \arctan\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right)$ como un indicativo de la importancia de cada modo de grieta.

En primer lugar, cabe hacer un comentario sobre el hecho significativo y, que a priori no se esperaba de que los resultados obtenidos del índice de liberación de energía son diferentes para el frente izquierdo y el derecho. Como se observa en la Figura 4.18, en la deformada de detalle de la grieta, la punta de la grieta no coincide con el frente definido mediante la interacción de contacto de VCCT por la que se ha modelado que debe progresar la grieta.

Además, como se muestra en la Figura 4.18 y Figura 4.21, esta posición no simétrica del frente definido como

VCCT para la progresión de la grieta, hace que aparezca una discontinuidad de las tensiones a un lado y otro del frente del VCCT, que tienen posiciones opuestas en un frente y otro de la grieta, como se observa en la Figura 4.17 o en la Figura 4.20.

El VCCT en Abaqus se define mediante la interacción de contacto, que se hace definiendo una de las dos superficies involucradas como esclava, y la otra como maestra. El VCCT queda referido a la superficie esclava y, en vista de los resultados, parece que calcula el índice de liberación de energía únicamente con la tensión del primer nodo del elemento de esta superficie.

Por todo esto, el resultado del índice de liberación de energía que se obtiene en un frente y otro de la grieta son diferentes (Figura 4.26), ya que la superficie esclava es común para ambos frentes, pero la distribución de las tensiones es opuesta para una superficie y otra, y por ello se representan por separado. Además, a modo de comprobación, se ha estudiado el efecto de invertir dicha definición de superficie esclava y maestra, obteniéndose exactamente los resultados opuestos: los que se obtuvieron en el frente derecho, ahora se obtienen en el izquierdo, y viceversa.

Cabe hacer especial énfasis de que se ha planteado que el motivo de esta no coincidencia sea una asimetría de la malla respecto de la grieta a una distancia algo alejada de esta. Sin embargo, en el entorno local la malla es perfectamente simétrica y la semilla de mallado en los dos *Part* se ha hecho exactamente simétrica en todo el modelo, por lo que, si existe alguna pequeña asimetría, esta se puede deber al mallado *Free*, aunque en principio cabría pensar que la malla es perfectamente simétrica o que la asimetría es muy pequeña en cualquier caso.

Debido a esta dependencia de la definición del VCCT a través de una superficie esclava a un lado o a otro, y al planteamiento cualitativo del estudio, no se ha hecho especial énfasis en el cálculo que realiza del índice de liberación de energía en valores absolutos, si no que se ha usado para comparar unas situaciones con otras. Es destacable, por otro lado, que las mixicidades sí prácticamente iguales para ambos frentes.

4.2.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran G_I , G_{II} , G_{total} y la mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) en la Tabla 4.5 y se representan G_I , G_{II} y G_{total} en la Figura 4.22 y la mixicidad en la Figura 4.23. Los resultados se comentan más tarde.

Tabla 4.5. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) para Modelo 2 en frente izquierdo

Ángulo de la grieta α (°)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I	ψ_G
0	2,45E-25	1,3870E-27	2,4649E-25	5,66E-03	0,32
15	1,511E-04	2,1040E-03	2,2551E-03	1,39E+01	85,89
30	2,281E-03	6,8390E-03	9,1200E-03	3,00E+00	71,56
45	9,222E-03	9,2810E-03	1,8503E-02	1,01E+00	45,18
60	1,893E-02	6,3590E-03	2,5289E-02	3,36E-01	18,57
75	2,581E-02	1,8320E-03	2,7642E-02	7,10E-02	4,06
90	2,667E-02	3,8530E-24	2,6670E-02	1,44E-22	0,00

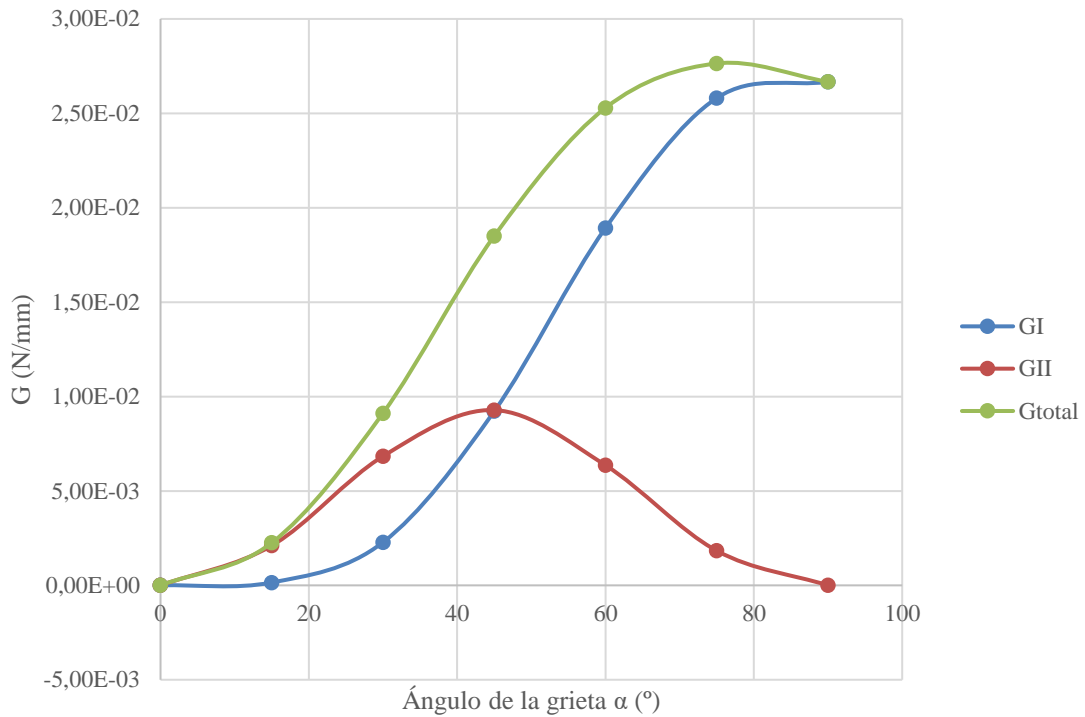


Figura 4.22. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 2 en frente izquierdo

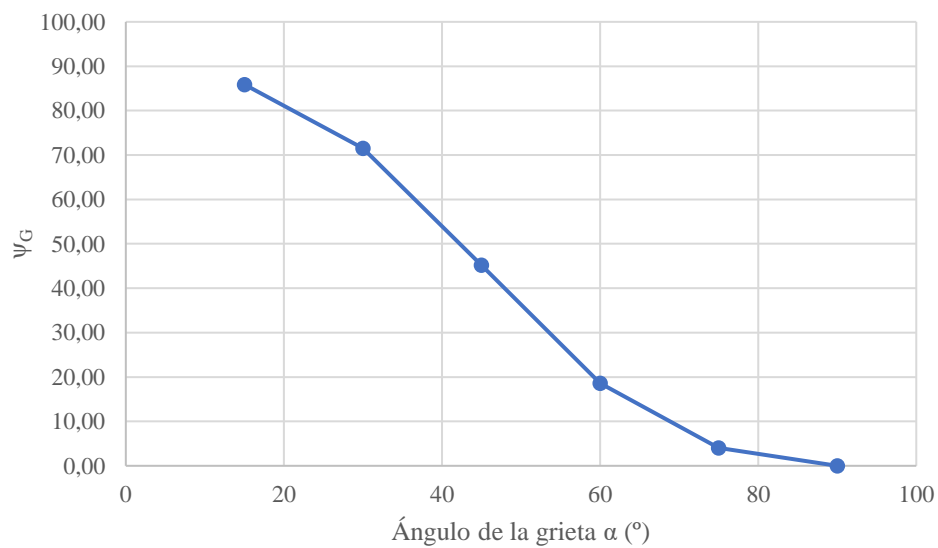


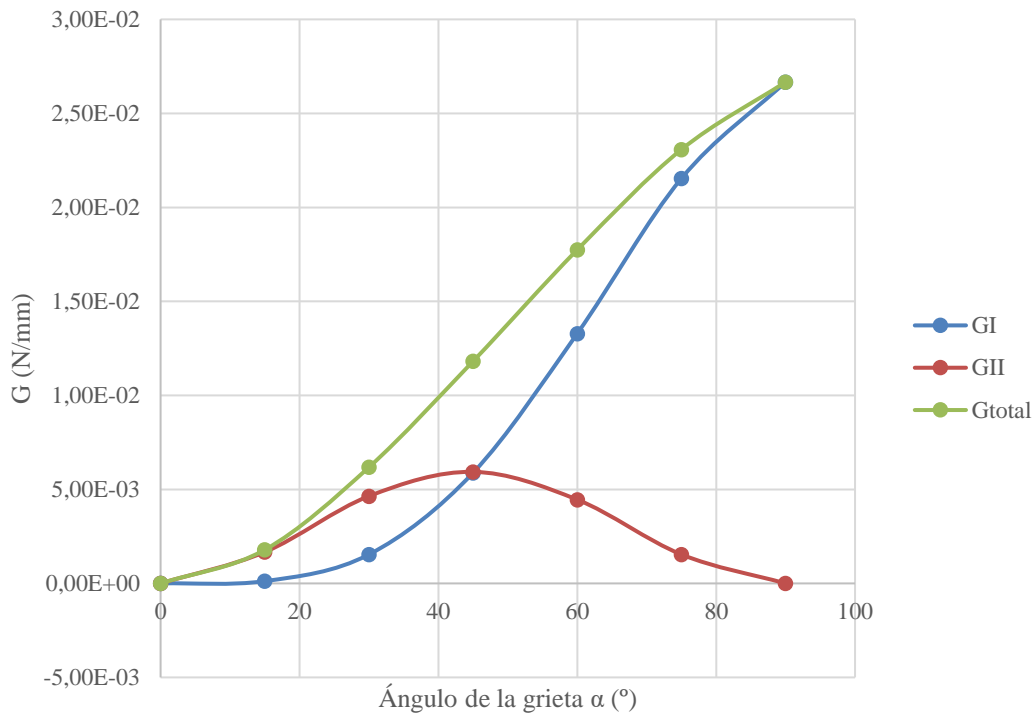
Figura 4.23. Mixicidad para Modelo 2 en frente izquierdo

4.2.2 Resultados frente derecho

Se muestran G_I , G_{II} , G_{total} y la mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) en la Tabla 4.6 y se representan G_I , G_{II} y G_{total} en la Figura 4.24 y la mixicidad en. Los resultados se comentan más tarde.

Tabla 4.6. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) para Modelo 2 en frente derecho

Ángulo de la grieta α (°)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I	ψ_G
0	2,32E-25	0	2,3160E-25	0,00E+00	0,00
15	1,194E-04	1,666E-03	1,7854E-03	1,40E+01	85,90
30	1,537E-03	4,640E-03	6,1770E-03	3,02E+00	71,67
45	5,884E-03	5,934E-03	1,1818E-02	1,01E+00	45,24
60	1,329E-02	4,455E-03	1,7745E-02	3,35E-01	18,53
75	2,154E-02	1,539E-03	2,3079E-02	7,14E-02	4,09
90	2,667E-02	3,232E-24	2,6670E-02	1,21E-22	0,00

Figura 4.24. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 2 en frente derecho

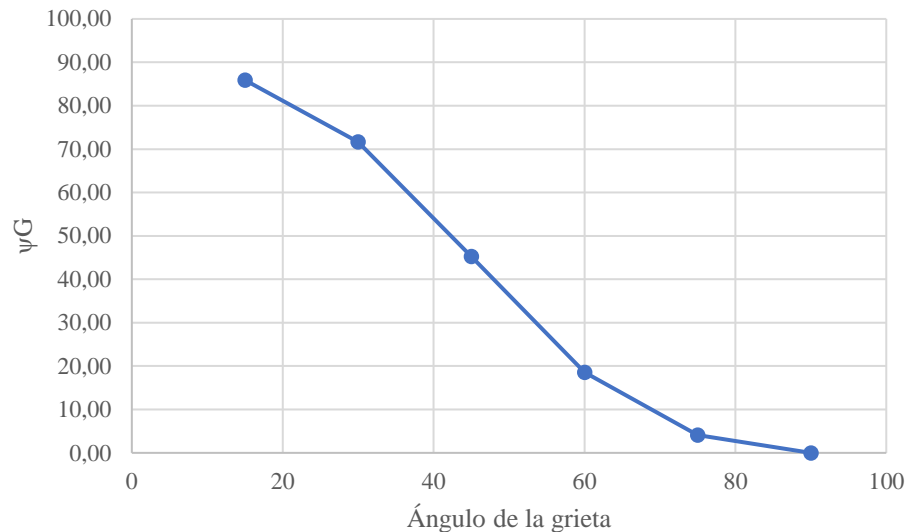


Figura 4.25. Mixicidad para Modelo 2 en frente derecho

4.2.3 Comparación de resultados de frente izquierdo y derecho

Se muestran los resultados conjuntos de G_I , G_{II} y G_{total} para ambos frentes en la Figura 4.26. Se hace énfasis de que el objetivo de esta gráfica no es llevar a cabo una comparación de los valores, si no estudiar si su comportamiento cualitativo es similar para ambos frentes (se recuerda que no se entrará en profundidad en el estudio cuantitativo como se explica al principio del presente apartado).

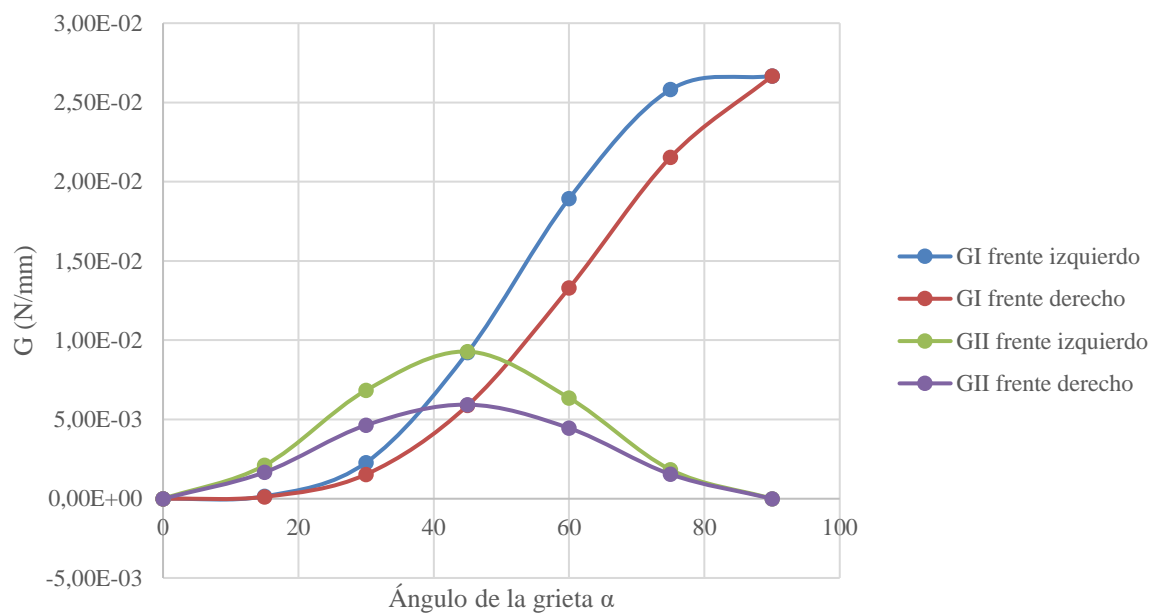


Figura 4.26. Comparación de resultados de G_I y G_{II} en Modelo 2 para ambos frentes de grieta

Por otro lado, se hacen algunos comentarios sobre los resultados. Tanto en un frente como en el otro (Figura 4.22 y Figura 4.24) se observa que existe un máximo del índice de liberación de energía en modo I a 90 grados, hecho esperable al ser una situación de modo I puro, y en modo II a 45 grados, hecho también esperable. En cuanto a la suma de ambas, el máximo aparece aproximadamente a 75 grados para el frente izquierdo, y a 90 grados para el frente derecho.

En cuanto a la mixicidad medida como ψ_G , se observa para ambos frentes (Figura 4.23 y Figura 4.25) que es de 45° para un ángulo de 45° (la G es igual para los dos modos) y que es de 0° para un ángulo de 90° (modo I puro).

Se concluye, por tanto, que a 45 grados se produce la mayor tendencia de la grieta a crecer en modo II, lo que podría estar asociado a la dirección de la grieta transversal observada experimentalmente. Sin embargo, hay que tomar esta conclusión con mucha cautela, ya que, como se describe en el Apartado 2.2.1, los criterios de crecimiento de grieta bajo modo mixto (combinación de modo I y II en este caso), que se da en el caso de estudio, no están claramente definidos ni hay consenso sobre estos actualmente, por lo que sería necesario en cualquier caso aplicar un criterio de rotura fiable asociado al crecimiento en la capa de 90° que contemplase la mixicidad. En general podría decirse que este hecho sería relevante en el caso de que $G_{IIcrítica}$ fuera mucho menor que $G_{Icrítica}$ para este material a falta de un criterio de crecimiento.

Además, se observa que los resultados son cualitativamente equivalentes para cada frente, por lo que en los Modelos 3 (Apartado 4.3) y 4 (Apartado 4.4), se mostrarán únicamente los resultados del frente izquierdo.

4.3. Modelo 3. Estudio de variación de G con la longitud de la grieta centrada en la capa de 90°

A continuación, y sin haber encontrado una explicación clara que motive la aparición de la grieta a 45 grados frente a otros ángulos, se pasa a estudiar la estabilidad del crecimiento de esta grieta, con un ángulo de 45 grados. Para ello se modelan diferentes tamaños de grieta (0,02 mm; 0,04 mm; 0,08 mm; 0,12 mm; 0,16 mm y 0,2 mm), asumiendo un crecimiento simétrico de la misma, y se estudia la evolución del índice de liberación de energía. Se muestran los resultados del modelo cuya geometría y malla se describen en el Apartado 3.2.3.

Se ha modelado con la condición de contorno en desplazamientos. En cuanto al VCCT, este se ha modelado y se han obtenido los resultados para ambos frentes de la grieta, pero se muestran únicamente los resultados para el frente izquierdo como se explica en el Apartado 4.2.3, al ser los del frente derecho cualitativamente similares.

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada. Se muestran para una longitud de grieta b de 0,16 mm. El comportamiento cualitativo para el resto de longitudes es equivalente.

Se muestran imágenes de la deformada de la grieta en la Figura 4.27, Figura 4.28 y Figura 4.29. Las imágenes de la distribución general de tensiones y el orden de magnitud de estas se pueden ver para el Modelo 2, que es muy similar, en el Apartado 4.2.

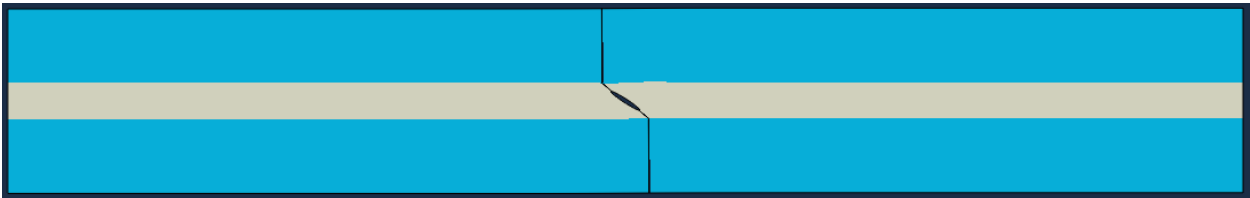


Figura 4.27. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista general



Figura 4.28. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista de detalle de la grieta

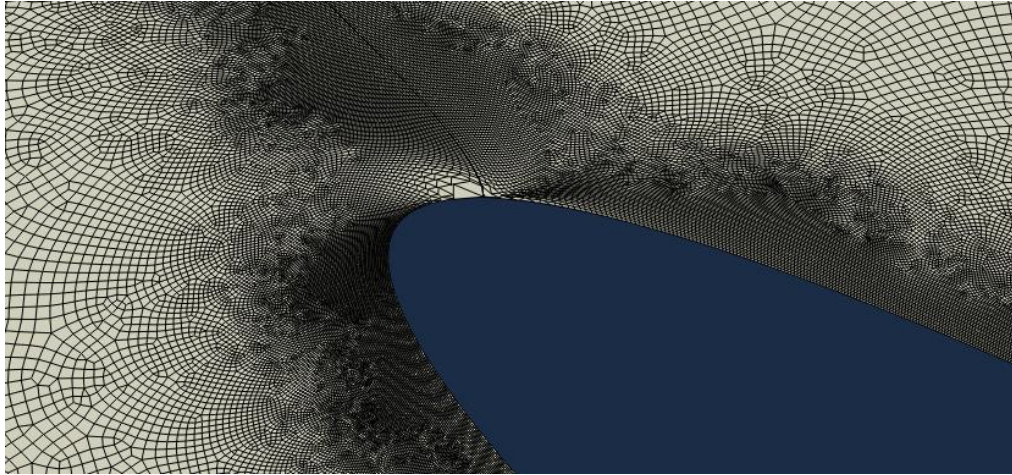


Figura 4.29. Deformada del Modelo 3 para una longitud de grieta b de 0,16 mm. Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta

4.3.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran G_I , G_{II} , G_{total} y la mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) en la Tabla 4.7 y se representan en la Figura 4.30.

Tabla 4.7. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I y ψ_G) para Modelo 3 en frente izquierdo

Longitud de la grieta b (mm)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I	ψ_G
0,02	9,206E-03	9,232E-03	1,844E-02	1,003E+00	45,08
0,04	1,929E-02	1,945E-02	3,874E-02	1,008E+00	45,24
0,08	3,818E-02	3,958E-02	7,776E-02	1,037E+00	46,03
0,12	5,336E-02	5,668E-02	1,100E-01	1,062E+00	46,73
0,16	6,428E-02	6,935E-02	1,336E-01	1,079E+00	47,17
0,2	6,983E-02	7,571E-02	1,455E-01	1,084E+00	47,31

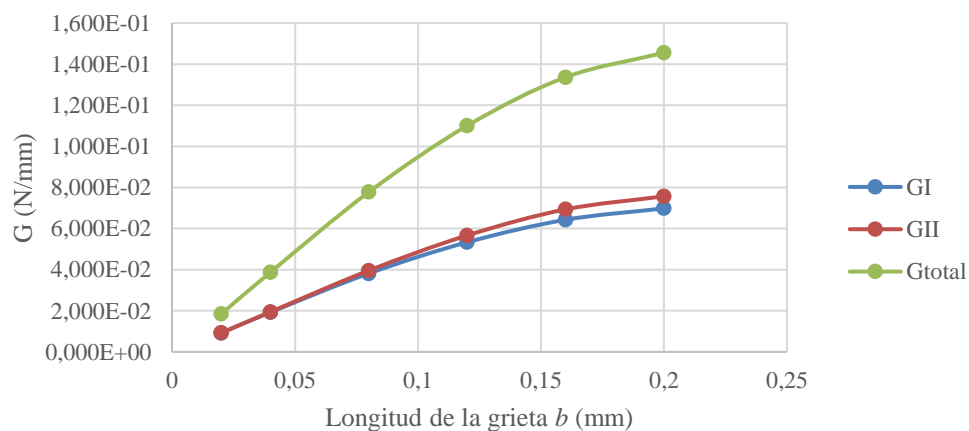


Figura 4.30. G_I , G_{II} y G_{total} para Modelo 3 en frente izquierdo

Se observa un índice de liberación de energía creciente con la longitud de la grieta b para el modo I, modo II y la suma de ambos. Esto quiere decir que, si la grieta progresase, se obtendría una energía disponible para la

propagación de la grieta cada vez mayor. Por lo tanto, asumiendo que la resistencia del material a la propagación de grietas es constante, y a expensas de un criterio de crecimiento, constituye un crecimiento de la grieta inestable. Además, un hecho que avala esta conclusión, al menos en los criterios que tienen en cuenta la mixicidad, es que ψ_G se mantiene bastante constante (como se observa en la Tabla 4.7) en el entorno de 45° para todos los ángulos.

4.4. Modelo 4. Estudio de variación de G con el espesor de la capa de 90° en presencia de una grieta central

Tras obtener estos resultados, se busca explicar por qué aparece el daño en este laminado en concreto y no para otros espesores (partiendo de la premisa de que el daño aparece a partir de una grieta pequeña en la capa de 90°). Para ello se estudia la evolución del índice de liberación de energía para un espesor del doble (0,38 mm) y la mitad (0,095 mm). Se muestran los resultados del modelo cuya geometría y malla se describen en el Apartado 3.2.4.

Se ha modelado con la condición de contorno en desplazamientos (coherente con el ensayo experimental con control en desplazamientos). En cuanto al VCCT, este se ha modelado para ambos frentes de la grieta pero, como el comportamiento cualitativo es similar, hecho en el que se profundiza en el Apartado 4.2.3, solo se muestran los resultados del frente izquierdo.

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada. Se muestran para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm. El comportamiento cualitativo para el resto de espesores es equivalente.

Se muestran imágenes de la deformada en la Figura 4.31, Figura 4.32 y Figura 4.33. Las imágenes de la distribución general de tensiones y el orden de magnitud de estas se pueden ver para el Modelo 2, que es muy similar, en el Apartado 4.2.

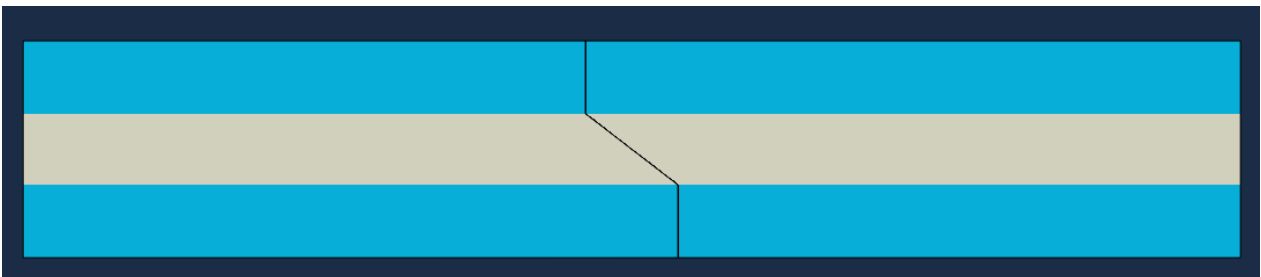


Figura 4.31. Deformada del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm. Vista general

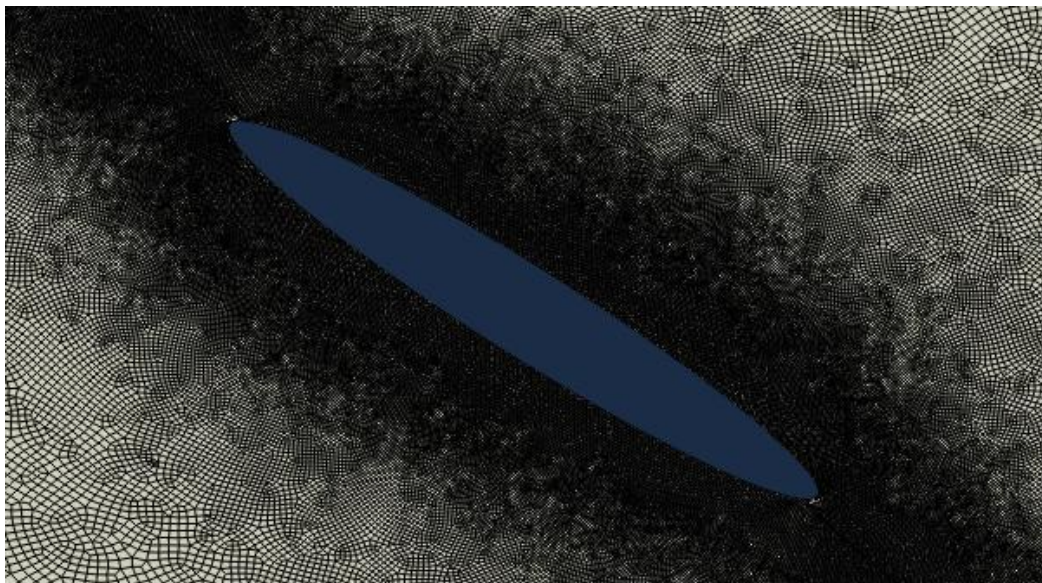


Figura 4.32. Deformada de la grieta del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm

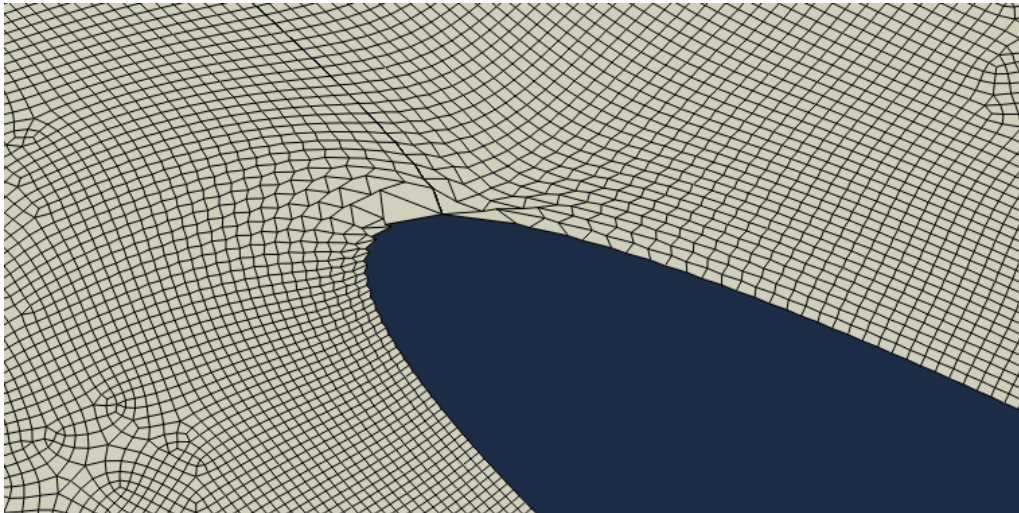


Figura 4.33. Deformada de la punta de la grieta del Modelo 4 para un espesor de la capa de 90° , e , de 0,38 mm

4.4.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran en la Tabla 4.8 y se representan en la Figura 4.36 y Figura 4.37.

Tabla 4.8. G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 4 en frente izquierdo

Espesor de la capa de 90° e	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I	ψ_G
0,095	8,807E-03	8,909E-03	1,772E-02	1,012E+00	45,33
0,19	9,202E-03	9,229E-03	1,843E-02	1,003E+00	45,09
0,38	8,977E-03	8,981E-03	1,796E-02	1,000E+00	45,01

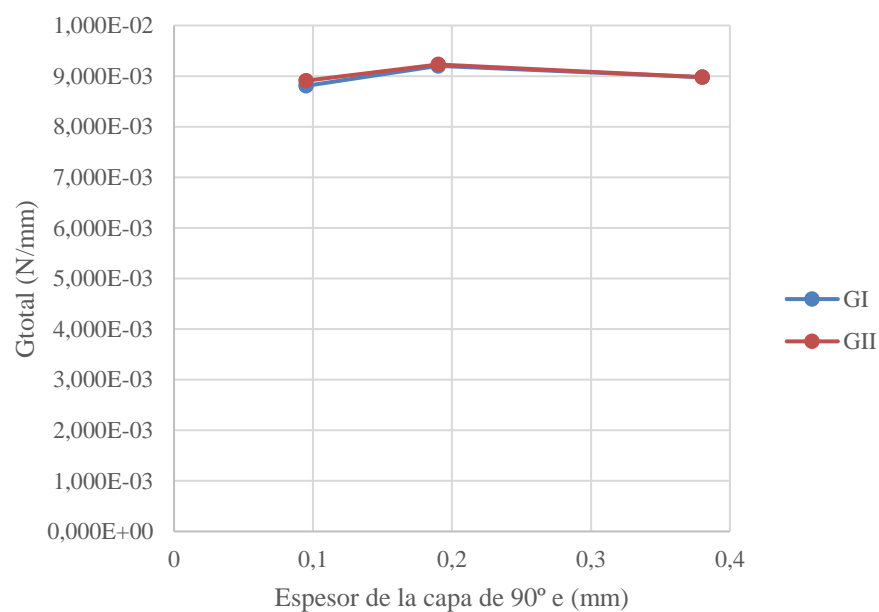


Figura 4.34. G_I y G_{II} para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista general

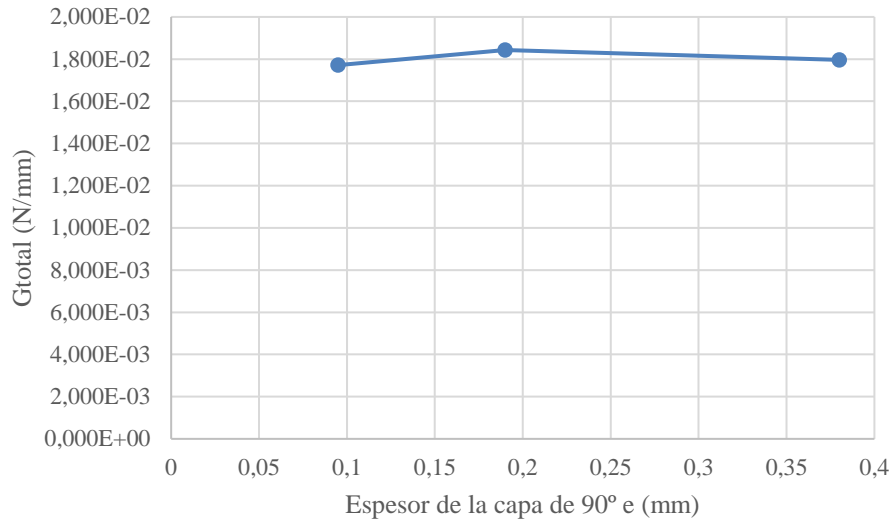


Figura 4.35. G_{total} y para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada

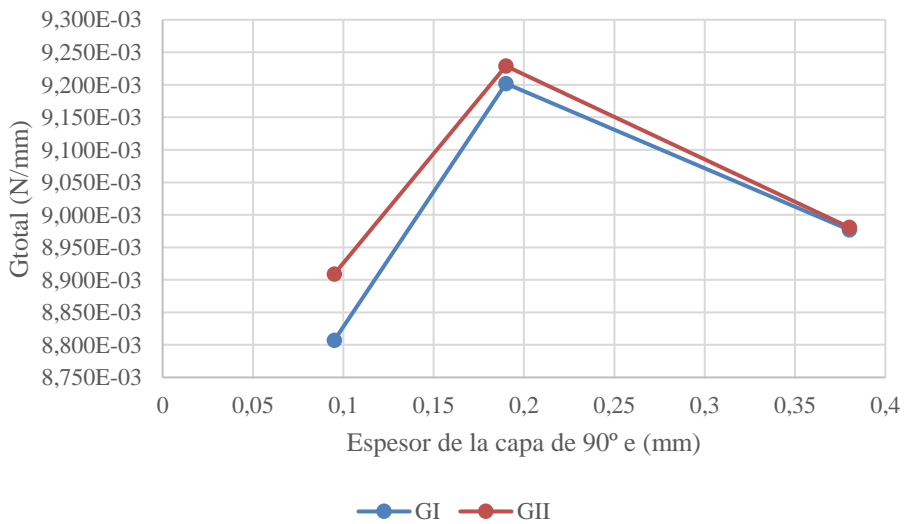


Figura 4.36. G_I y G_{II} para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada

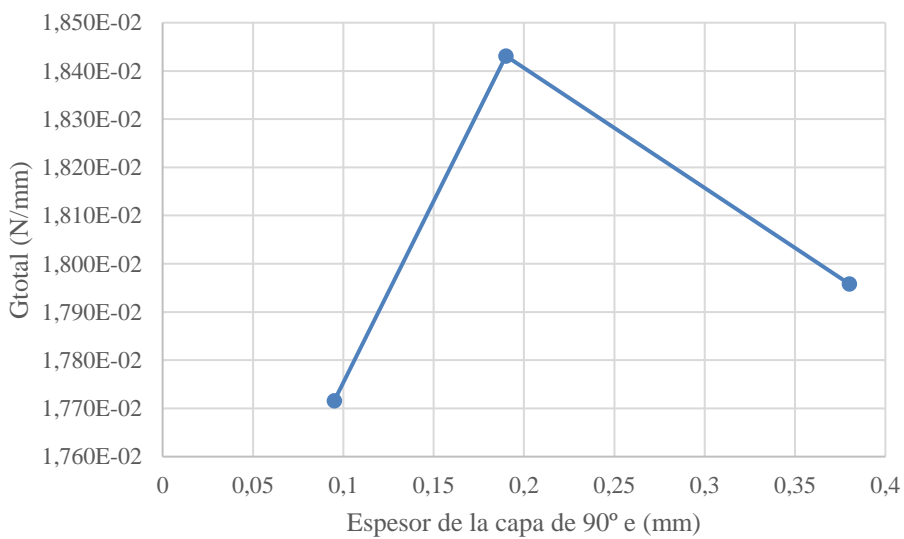


Figura 4.37. G_{total} y para Modelo 4 en frente izquierdo. Vista ampliada

Se observa que, aunque en términos absolutos los resultados son bastante planos, existe un máximo del índice de liberación de energía tanto en modo I, como modo II, como la suma de ambos, para el espesor de 0,19 mm. Es muy destacable el hecho de que este espesor es en el que se ha encontrado el fallo experimentalmente. Por lo tanto, y a expensas de un criterio de crecimiento, si existiera una grieta pequeña en la capa de 90, tendría una ligera mayor tendencia a progresar en el espesor que se ha observado. Cabe destacar que no se comprenden completamente los razonamientos físicos que hacen que este espesor de laminado sea más propenso a propagar el daño, pero así lo muestran los resultados de la simulación.

En cuanto a la mixicidad, se observa que esta se mantiene bastante constante a 45° por lo que no predomina un modo de crecimiento frente a otro.

4.5. Modelo 5. Estudio de variación de W por ud. de longitud de la grieta en daño explosivo con el espesor de la capa de 90°

A partir de ahora se abandonan los estudios de un daño progresivo y se considera la posibilidad de que el daño transversal haya aparecido explosivamente y previo a las delaminaciones. Se estudiará si existe una mayor tendencia a la aparición de este daño, a través del trabajo liberado por unidad de longitud de la grieta, para el ángulo y el espesor para el que se observa experimentalmente. Se muestran los resultados del modelo cuya geometría y malla se describen en el Apartado 3.2.5.

Se ha modelado con la condición de contorno en desplazamientos (coherente con el ensayo experimental con control en desplazamientos).

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada y las tensiones en ambos submodelos descritos en el Apartado 3.2.5. Se muestran para un espesor de la capa de 90°, h , de 0,19 mm y un ángulo de 45°. El comportamiento cualitativo para el resto de espesores y ángulos es equivalente.

Se muestran imágenes de la deformada de la grieta del Submodelo 5.019.45A en la Figura 4.38 y la del Submodelo 5.019.45B en la Figura 4.39 y Figura 4.40. Todas ellas se muestran para un espesor de la capa de 90° h de 0,19 mm y un ángulo de 45°. Para el resto de espesores y ángulos, la deformada es equivalente.



Figura 4.38. Deformada del Submodelo 5.019.45A

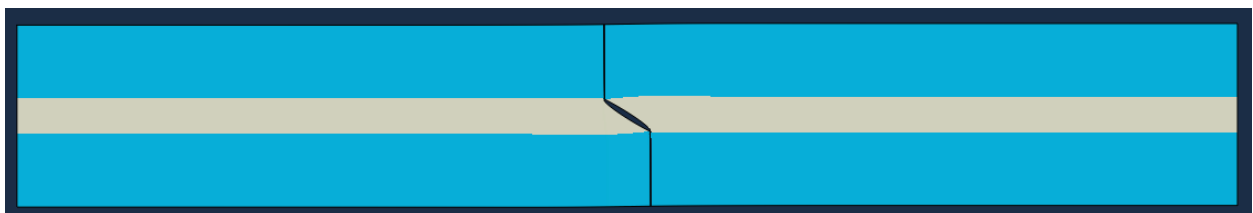


Figura 4.39. Deformada del Submodelo 5.019.45B. Vista general

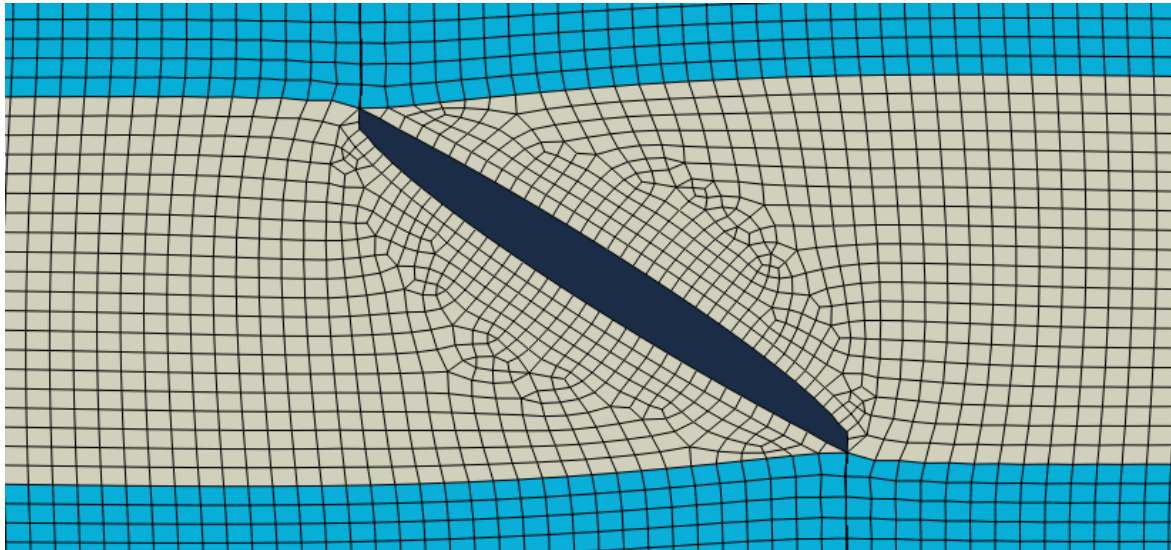


Figura 4.40. Deformada del Submodelo 5.019.45B. Vista de detalle

Para representar los mapas de tensiones (Figura 4.41, Figura 4.42 y Figura 4.43) y desplazamientos (Figura 4.44, Figura 4.45, Figura 4.46 y Figura 4.47), se ha aplicado un cambio del sistema de referencia para obtener las componentes normales (modo I) y tangenciales (modo II) a la diagonal. Todas ellas se muestran para un espesor de la capa de $90^\circ h$ de 0,19 mm y un ángulo de 45° . Para el resto de espesores y ángulos, las tensiones y desplazamientos son equivalentes. Se observa que las tensiones tienen un valor muy constante en todo el espesor en ambas componentes, mientras que en los desplazamientos si se observa una cierta distribución.

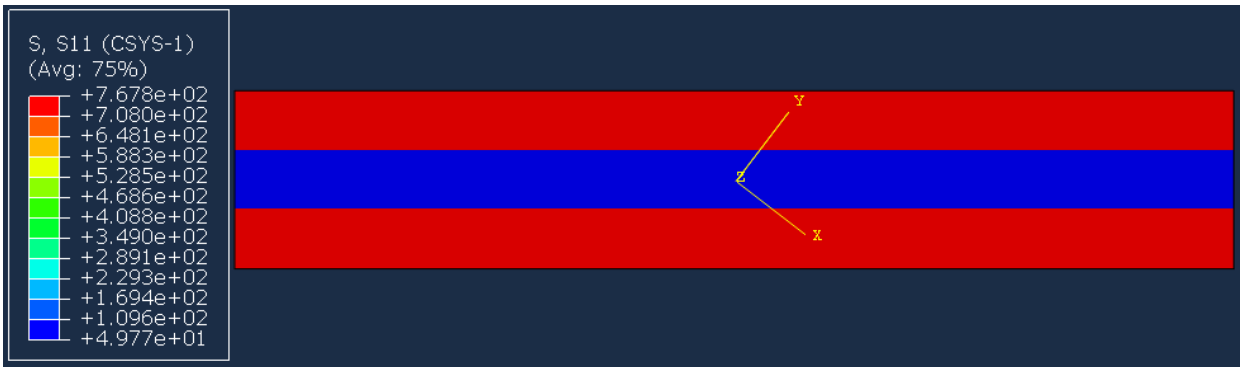


Figura 4.41. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista general

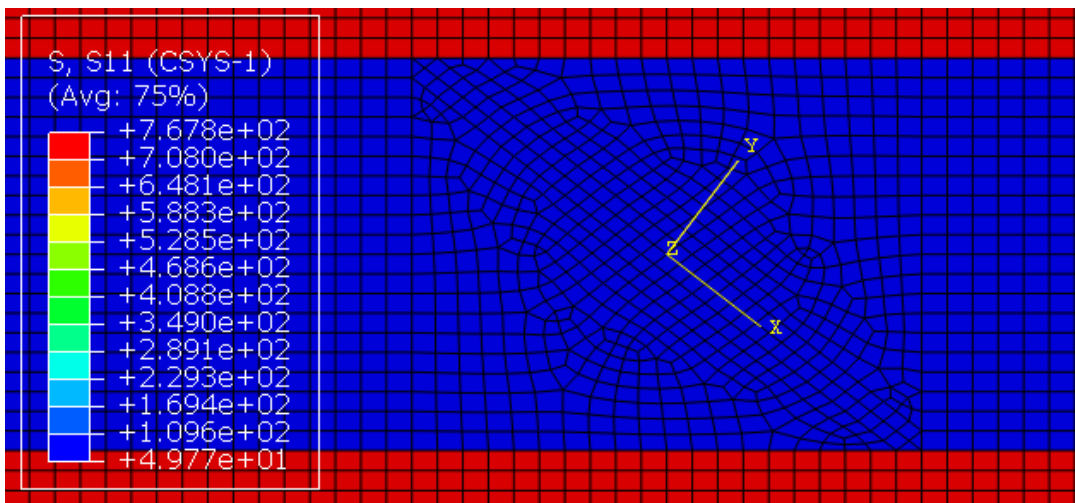


Figura 4.42. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista de detalle

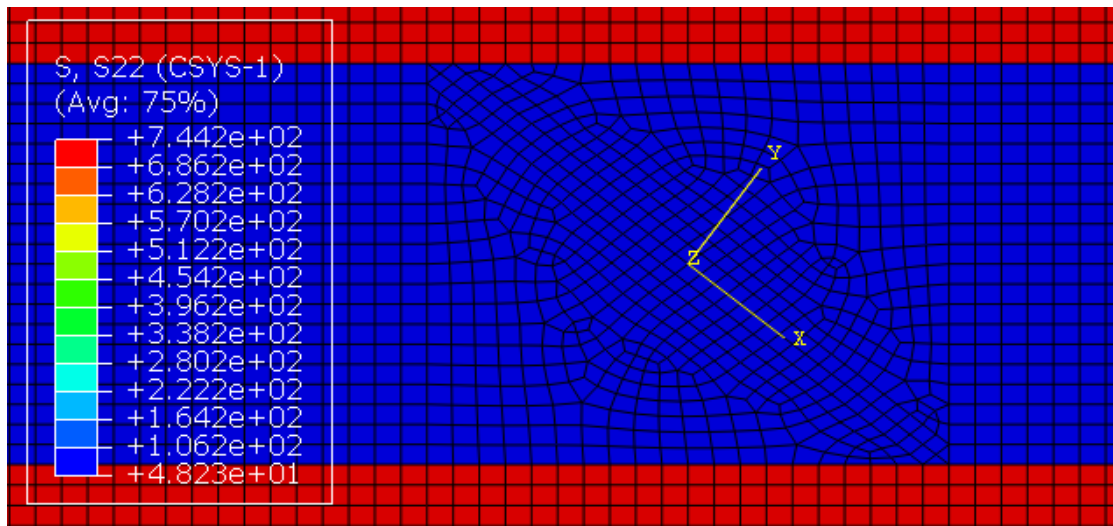


Figura 4.43. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A. Vista de detalle



Figura 4.44. Mapa de desplazamientos tangenciales u_r (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista general

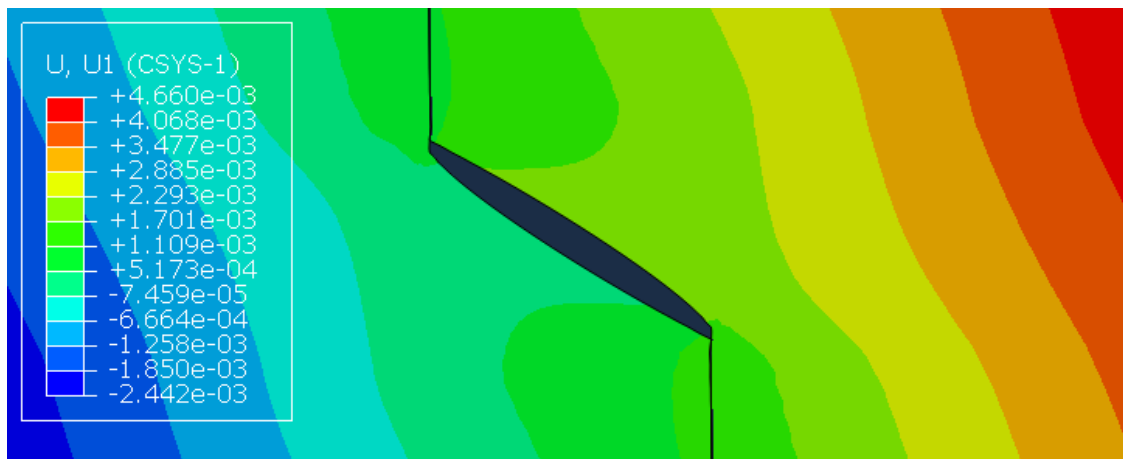


Figura 4.45. Mapa de desplazamientos tangenciales u_r (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista de detalle



Figura 4.46. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista general



Figura 4.47. Mapa de desplazamientos normales u_n (mm) sobre sólido deformado para SubModelo 5.019.45B. Vista de detalle

4.4.2 Resultados de la componente tangencial de W

Los resultados del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en la componente tangencial para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo (MPa*mm) por unidad de longitud de la grieta para el Modelo 5

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	0,064236445	0,133676867	0,283283566
	45°	0,037965355	0,078024829	0,156544352
	60°	0,013022741	0,028180748	0,055675356
	90°	0	8,83933E-18	0

4.4.3 Resultados de la componente normal de W

Los resultados del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en la componente normal para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	0,010456921	0,023235632	0,055645254
	45°	0,033056674	0,069126199	0,148563304
	60°	0,059760233	0,130980972	0,268837278
	90°	0,098137653	0,203289212	0,418869427

4.4.4 Resultado de la suma de componentes de W

Los resultados de la suma del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.11. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	0,074693366	0,1569125	0,33892882
	45°	0,071022029	0,147151029	0,305107656
	60°	0,072782974	0,15916172	0,324512635
	90°	0,098137653	0,203289212	0,418869427

4.4.5 Comparación de resultados

En primer lugar, en la Figura 4.48, Figura 4.49, Figura 4.50 y Figura 4.51 se comparan, para cada ángulo de grieta, la evolución del trabajo liberado con el espesor. Se observa que para todos los ángulos el trabajo liberado (en sus dos componentes y en la suma de estas) aumenta proporcionalmente con el espesor.

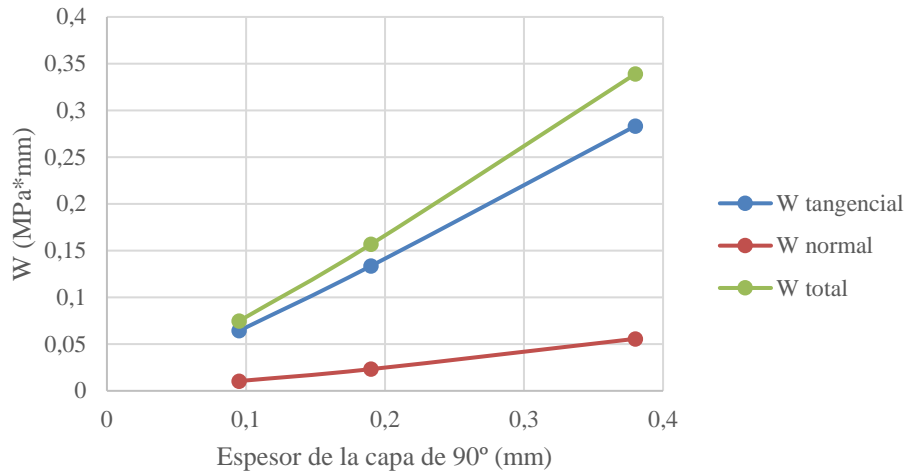


Figura 4.48. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 30° para diferentes espesores para el Modelo 5

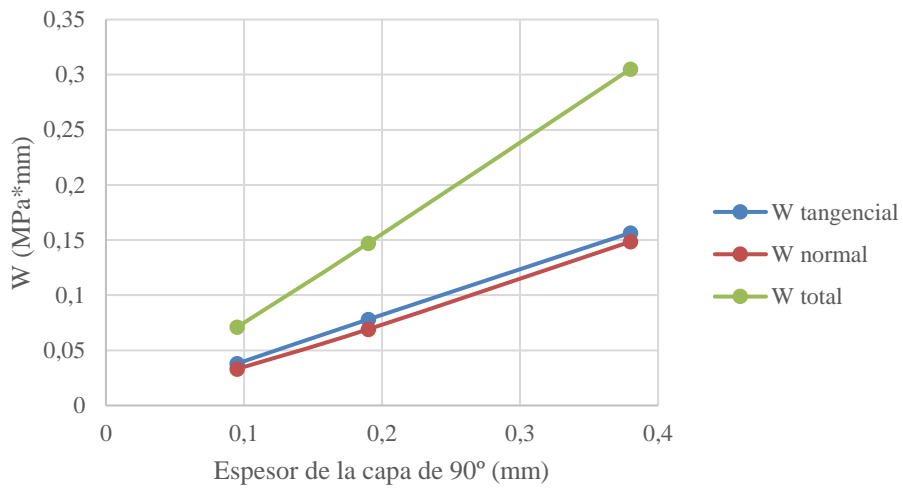


Figura 4.49. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5

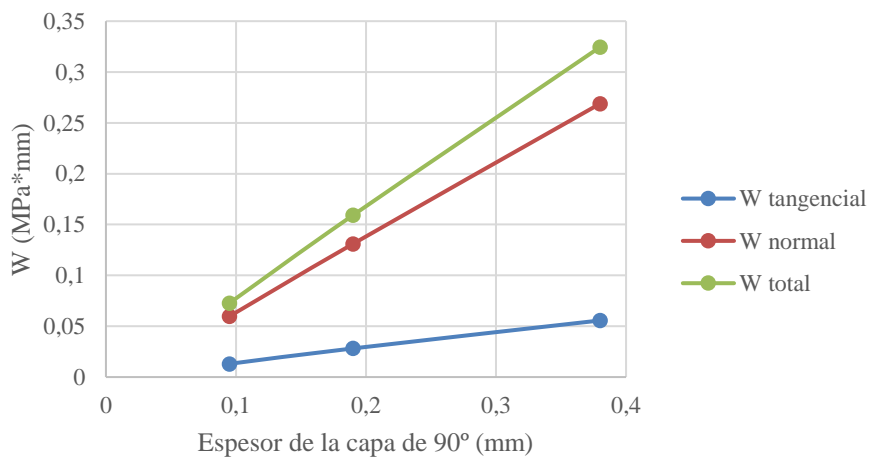


Figura 4.50. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 60° para diferentes espesores para el Modelo 5

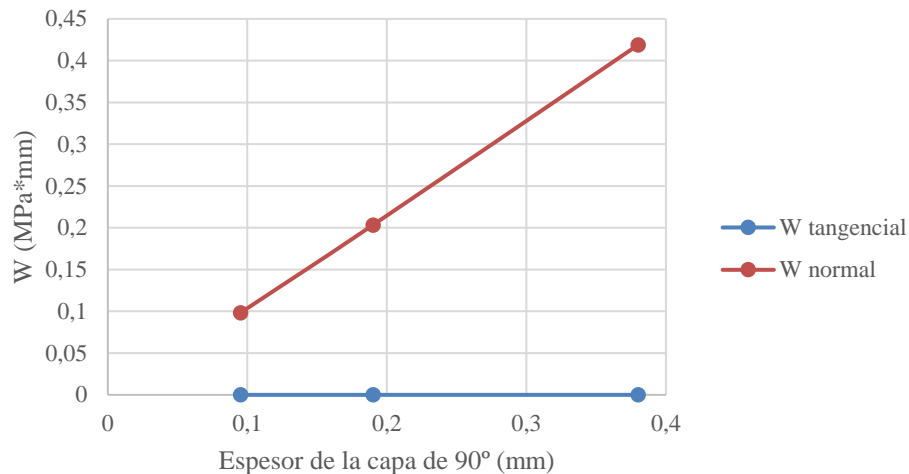


Figura 4.51. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 90° para diferentes espesores para el Modelo 5

Como se observa, la distribución de los resultados es la esperada y no se encuentra una explicación para que este daño aparezca en el espesor para el que se ha observado (0,19 mm), ya que la tendencia a aparición del daño será mayor cuanto mayor sea el trabajo liberado y, por tanto, cuanto mayor sea el espesor de la capa de 90.

Cabe destacar que se ha estudiado el trabajo total liberado, sin dividir por la longitud de la grieta, pero las conclusiones obtenidas no cambian sustancialmente: pierde la proporcionalidad pero el comportamiento sigue siendo creciente, por lo que no se representa.

En las Figura 4.52, Figura 4.53 y Figura 4.54 se representa, para cada espesor de la capa de 90° , la evolución el trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para los diferentes ángulos de grieta. En todos los espesores se observa un comportamiento cualitativo parecido: la componente tangencial del trabajo disminuye para ángulos mayores; la componente normal del trabajo aumenta para ángulos menores; la suma de las componentes del trabajo presenta en todos los casos un mínimo para el ángulo de 45° .

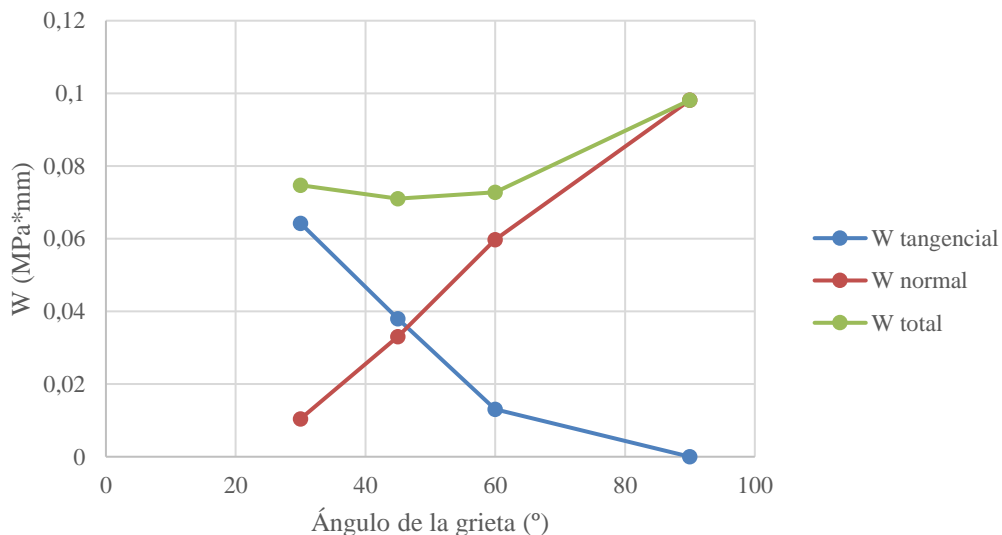


Figura 4.52. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,095 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5

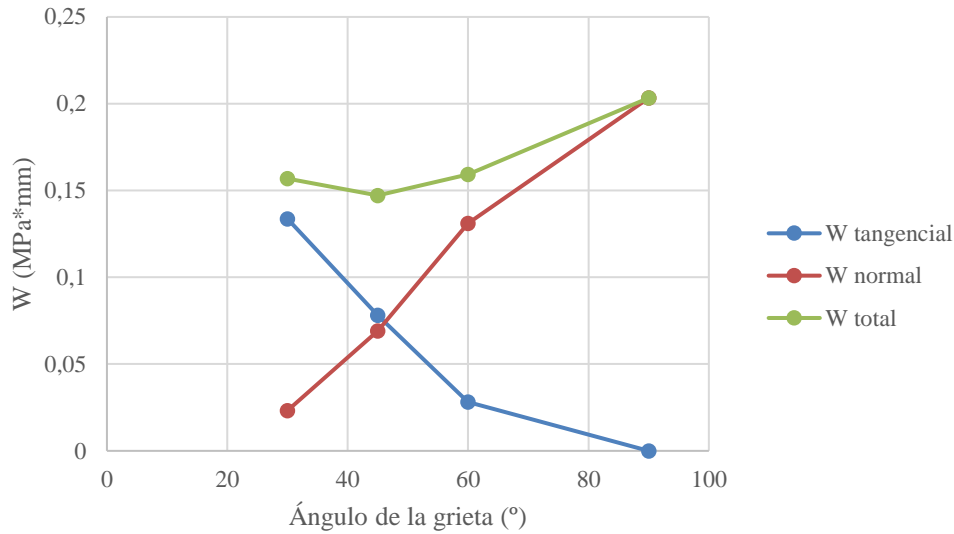


Figura 4.53. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5

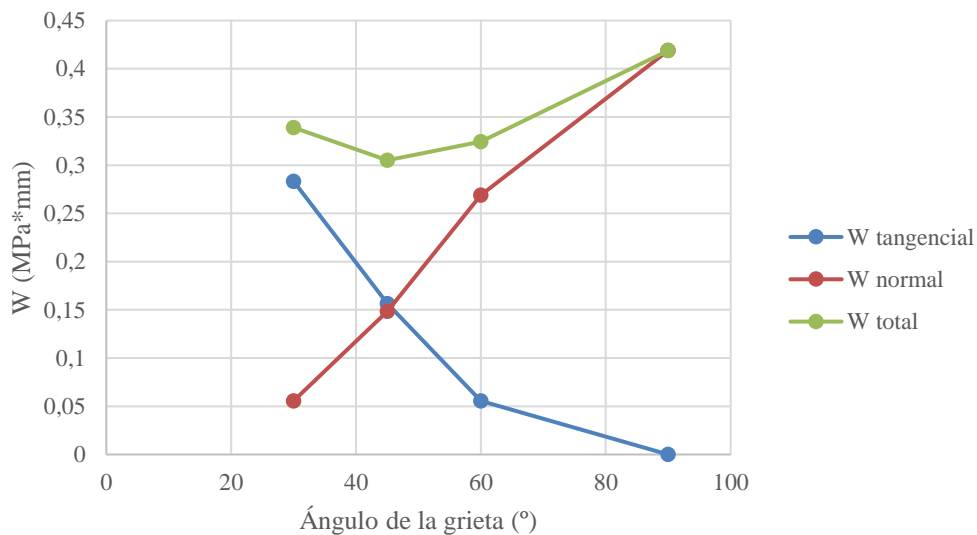


Figura 4.54. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5

Por tanto, no se observa ningún indicio que indique que sea más favorable la aparición de este daño a 45° y la evolución de las componentes normal y tangencial es la esperada. De hecho, observando la suma de los trabajos, es en el que aparece un mínimo y, por lo tanto, se libera menos trabajo y es menos propenso a suceder, quedando el máximo para un ángulo de 90°.

Cabe destacar que se ha estudiado el trabajo total liberado, sin dividir por la longitud de la grieta, como se muestra en la Figura 4.55. Se observa un cambio interesante en el comportamiento de la suma de las componentes de W con respecto a los resultados anteriores. El máximo ahora está en un ángulo 30°, hecho por otro lado esperable al ser para este caso la longitud de grieta mayor. En cualquier caso, sigue sin observarse ningún comportamiento diferencial para un ángulo de 45°.

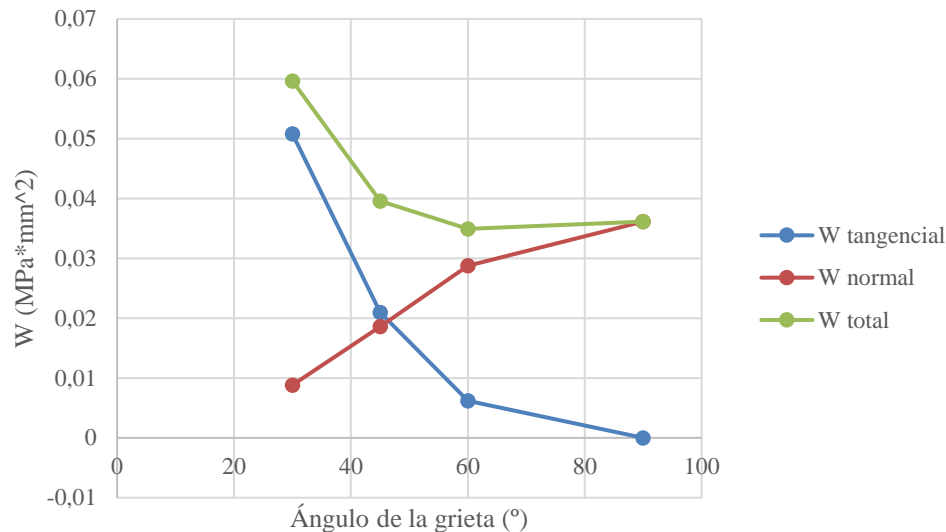


Figura 4.55. Trabajo liberado por daño explosivo para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5

4.6. Efecto de la temperatura de curado

Una vez realizados todos los modelos, se busca introducir en todos ellos el efecto de la temperatura de curado que aparece siempre en los materiales compuestos y que, en ocasiones, modifica sustancialmente el comportamiento de estos. Con ello se busca observar si alguna de las conclusiones y resultados obtenidos se modifica.

A continuación, se muestran los resultados mediante imágenes, tablas y gráficos del efecto de la temperatura de curado para los modelos anteriormente mencionados.

4.7.1 Efecto de la temperatura de curado en Modelo 1

Se muestran los resultados del efecto de la temperatura del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.1. Todos los resultados que se muestran son para un modelado con el VCCT en el frente derecho.

Debido a que se han modelado las condiciones de contorno en desplazamientos y en tensiones, los Submodelos que se han considerado para el estudio del efecto de la temperatura de curado son los siguientes:

- *Submodelo 1.T+Desp.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en desplazamientos
- *Submodelo 1.T+Tens.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en tensiones

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada (Figura 4.56) y los mapas de tensiones (Figura 4.57 y Figura 4.58) para el Submodelo T para una longitud de grieta de 0,625 mm. Para el resto de longitudes de grietas el comportamiento cualitativo es equivalente. Se observa un comportamiento diferente de las capas, asociado a sus propiedades térmicas distintas para la misma dirección, que generan tensiones y deformaciones residuales de curado.

Con la dirección longitudinal se refiere a la dirección de la longitud más larga de la probeta y se denominará σ_{xx} ; y con la dirección transversal se refiere a la dirección de la longitud más corta de la probeta y se denominará σ_{yy} , todos ellos referidos, por tanto, a los ejes globales de la probeta.

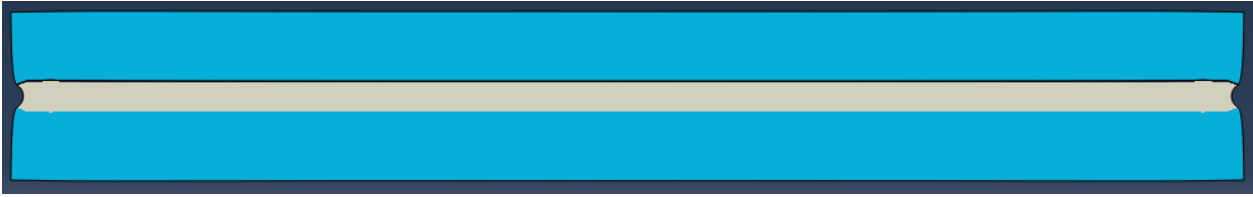


Figura 4.56. Deformada del Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm



Figura 4.57. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm. Vista general



Figura 4.58. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 1.T para una longitud de grieta a de 0,625 mm. Vista general

En la tensión longitudinal σ_{xx} se observa un comportamiento diferente entre las capas de 0°, a compresión y 90°, a tracción. Para la tensión transversal σ_{yy} , sin embargo, se observa un comportamiento similar para todas las capas. Se ahondará en la explicación física de este fenómeno más adelante (Apartado 4.7.2)

Se estudian ahora los resultados de la tensión circunferencial máxima en la capa de 90°.

4.7.1.1 Resultados Submodelo 1.T+Desp

En la Figura 4.3 se muestra un mapa de la tensión circunferencial en la capa de 90° tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Se muestran para una longitud de grieta a de 0.02 mm. El comportamiento cualitativo para las longitudes de grieta de 0,625 mm y 1,25 mm es equivalente.

Como se observa, la distribución de las tensiones circunferenciales máximas a tracción se da perpendicularmente a la grieta de delaminación modelada, de forma que no se modifica en absoluto respecto al modelo sin temperatura, y no explicaría el crecimiento de la grieta observado a 45°.

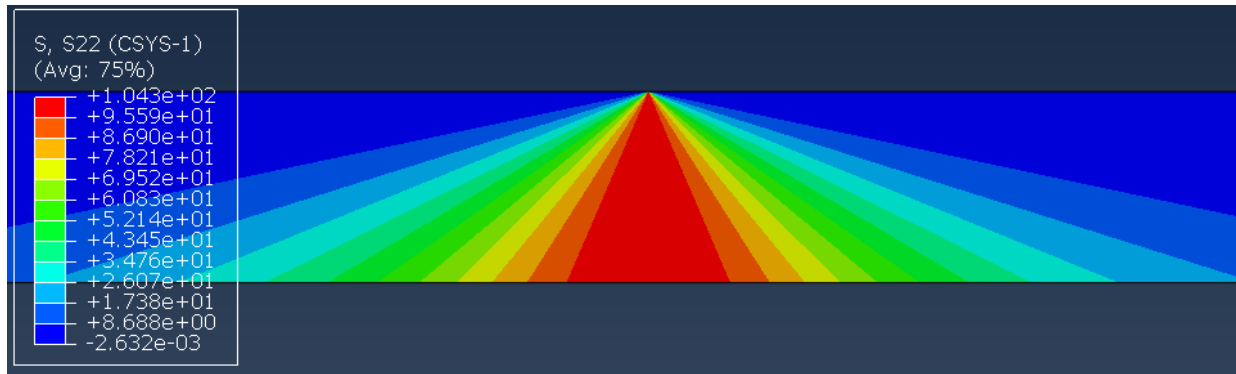


Figura 4.59. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1.T+Desp. y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm

En cuanto a los modelos de una longitud de grieta de 1,875 mm y 2,5 mm, el comportamiento cualitativo tampoco se ve modificado al incluir la temperatura.

En cuanto al comportamiento cuantitativo, se muestra en la Tabla 4.12. Se observa que la tensión circunferencial máxima permanece prácticamente constante con el crecimiento de la grieta. Se observa, por tanto, que no existe un aumento de la tendencia a la aparición del daño transversal con el crecimiento de la grieta de delaminación.

Tabla 4.12. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1.T+Desp.

Longitud de la grieta a (mm)	Tensión circunferencial máxima (MPa)
0,02	1,04279E+02
0,625	1,04278E+02
1,25	1,04278E+02
1,875	1,04278E+02
2,5	1,04278E+02

4.7.1.2 Resultados Submodelo 1.T+Tens

En la Figura 4.60 se muestra un mapa de la tensión circunferencial en la capa de 90° tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Se muestran para una longitud de grieta a de 0.02 mm. El comportamiento cualitativo para las longitudes de grieta de 0,625 mm y 1,25 mm es equivalente.

Como se observa, la distribución de las tensiones circunferenciales máximas a tracción se da perpendicularmente a la grieta de delaminación modelada, de forma que no se modifica en absoluto con respecto al modelo sin temperatura, y no explicaría el crecimiento de la grieta observado a 45°.

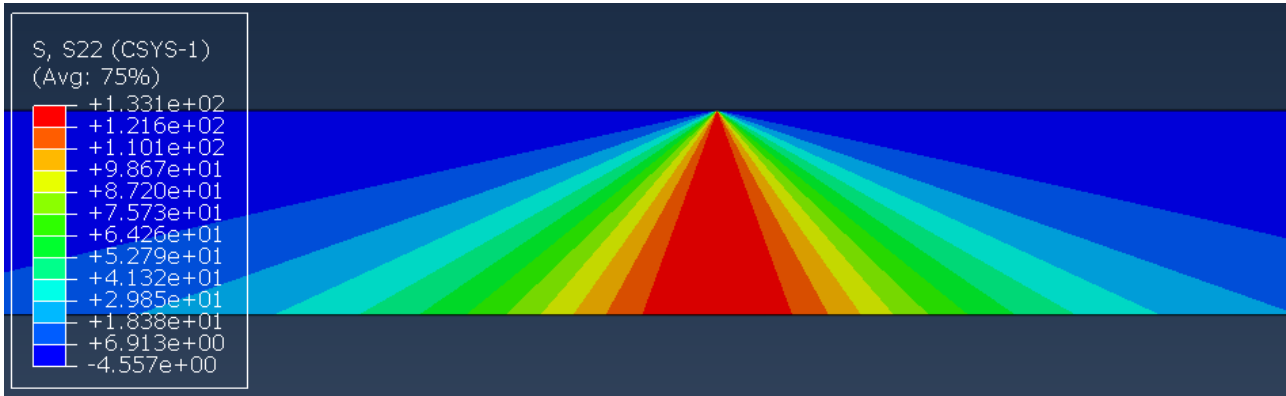


Figura 4.60. Mapa de tensión circunferencial (MPa) en la capa de 90° sobre sólido deformado para Modelo 1.T+Tens. y tomando como referencia un sistema de coordenadas cilíndrico centrado en la punta derecha de la grieta. Grieta de 0,02 mm

En cuanto a los modelos de una longitud de grieta de 1,875 mm y 2,5 mm, el comportamiento cualitativo tampoco se ve modificado al incluir la temperatura.

En cuanto al comportamiento cuantitativo, se muestra en la Tabla 4.13 y se representa en la Figura 4.61. Se observa de nuevo que la tensión circunferencial crece con la longitud de la grieta de delaminación. Se observa, por tanto, que existe un aumento de la tendencia al daño transversal con el crecimiento de la grieta de delaminación, aunque si se tiene en cuenta la escala, este aumento es bastante moderado.

Tabla 4.13. Tensión circunferencial máxima en la capa de 90° en el Modelo 1.T+Tens.

Longitud de la grieta a (mm)	Tensión circunferencial máxima (MPa)
0,02	1,33080E+02
0,625	1,33540E+02
1,25	1,35005E+02
1,875	1,41177E+02

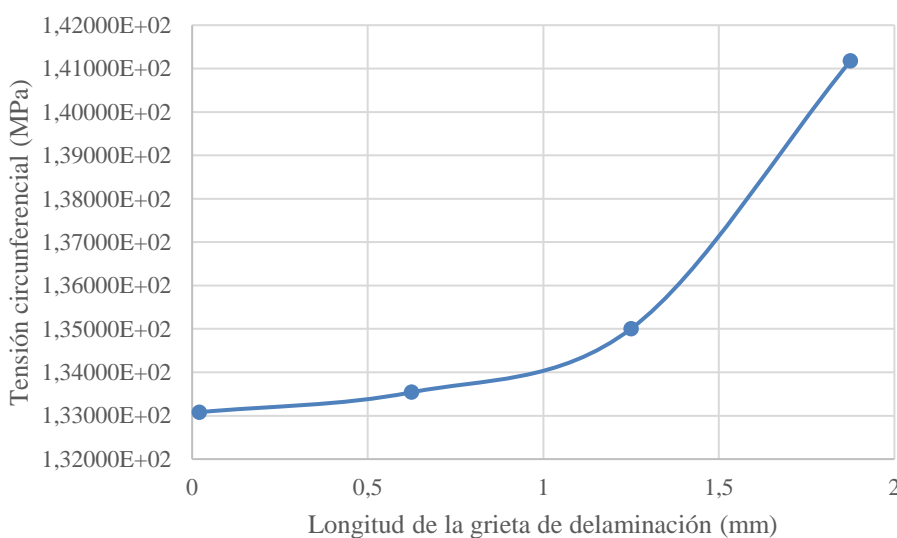


Figura 4.61. Tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° para el Modelo 1.T+Tens.

4.7.1.3 Comparación de modelos

En el presente apartado se busca comparar los resultados del efecto del decremento térmico con los de las condiciones de contorno en desplazamientos y tensiones para estudiar si alguna de las conclusiones obtenidas se ve modificada.

4.7.1.3.1 Condición de contorno en desplazamientos

La tensión circunferencial máxima en la capa de 90°, se representan en la Figura 4.62. Se observa que, aunque cuantitativamente la tensión circunferencial máxima aumenta al incluir el efecto de la temperatura (hecho esperable), el comportamiento cualitativo no cambia.

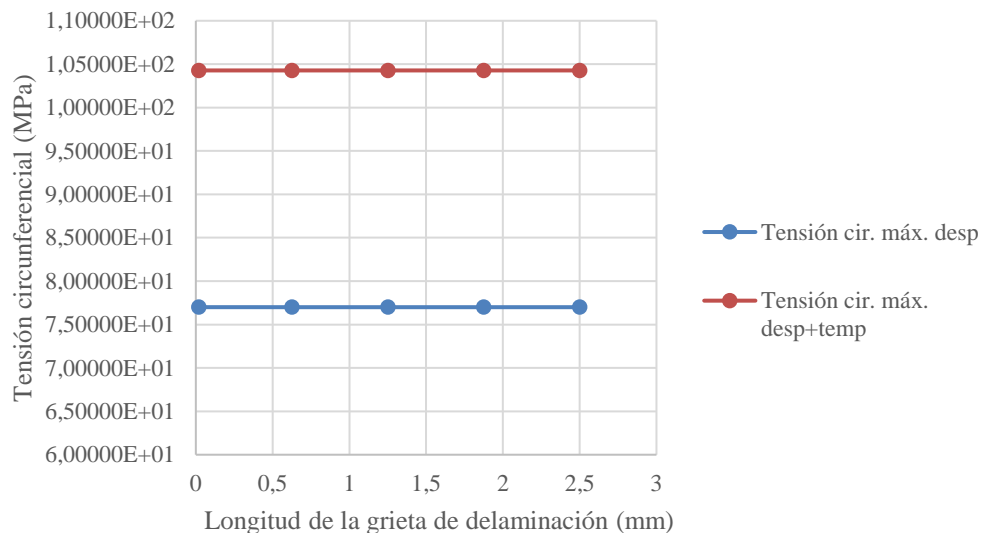


Figura 4.62. Comparación de la tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° entre el Modelo 1 y el Modelo 1.T+Desp.

4.7.1.3.2 Condición de contorno en tensiones

Se compara la tensión circunferencial máxima en la capa de 90°, se representan en la Figura 4.63. Se observa que, aunque cuantitativamente la tensión circunferencial máxima aumenta (hecho esperable), el comportamiento cualitativo no cambia.

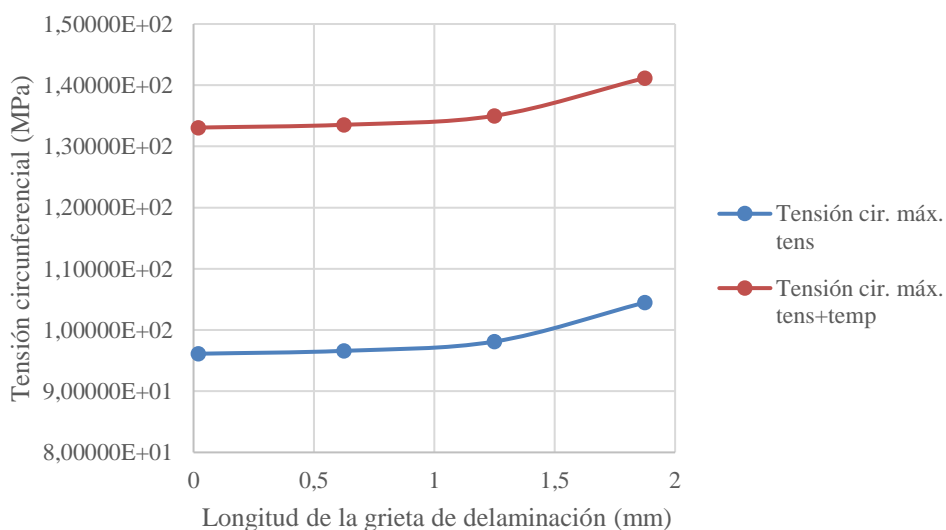


Figura 4.63. Comparación de la tensión circunferencial máxima (MPa) en la capa de 90° entre el Modelo 1 y el Modelo 1.T+Tens.

Además, se hace el mismo comentario que en el caso sin temperatura, aplicable tanto para la condición de contorno en tensiones como en desplazamientos. Los valores introducidos en el modelo de desplazamientos y tensiones son, aproximadamente, aquellos que se han observado experimentalmente para el momento en el que se ha producido el fallo. Bajo estas condiciones, se observa que se obtiene una tensión circunferencial máxima de 105 MPa para la condición de contorno en desplazamientos, y de 133 MPa para el caso de la condición de contorno en tensiones, aumentando este valor cuando crece la grieta de delaminación. Por otro lado, la resistencia transversal de la capa de 90 grados, obtenida experimentalmente, es de $Y_T = 60$ MPa. Por tanto, bajo estas condiciones existe una tensión superior en la capa de 90 que la resistencia, y se produciría la rotura de esta, hecho coherente con la observación del fallo, de una forma incluso más clara que en el caso si temperatura, ya que el valor de esta tensión aumenta.

4.7.2 Efecto de la temperatura de curado en Modelo 2

Se muestran los resultados del efecto de la temperatura del Modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.2.

Los Submodelos que se han considerado para el estudio del efecto de la temperatura de curado son los siguientes:

- *Submodelo 2.T*: efecto del decremento térmico exclusivamente
- *Submodelo 2.T+Desp.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en desplazamientos

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada (Figura 4.64) y los mapas de tensiones (Figura 4.65, Figura 4.66, Figura 4.67, Figura 4.68, Figura 4.69 y Figura 4.70) para el Submodelo T para un ángulo de la grieta α de 45° . Para el resto de ángulos de grieta el comportamiento cualitativo es equivalente. Esto se hace para dar una idea del orden de magnitud de las tensiones que aparecen y de la distribución de estas.

Con la dirección longitudinal se refiere a la dirección de la longitud más larga de la probeta y se denominará σ_{xx} ; y con la dirección transversal se refiere a la dirección de la longitud más corta de la probeta y se denominará σ_{yy} , todos ellos referidos, por tanto, a los ejes globales de la probeta.

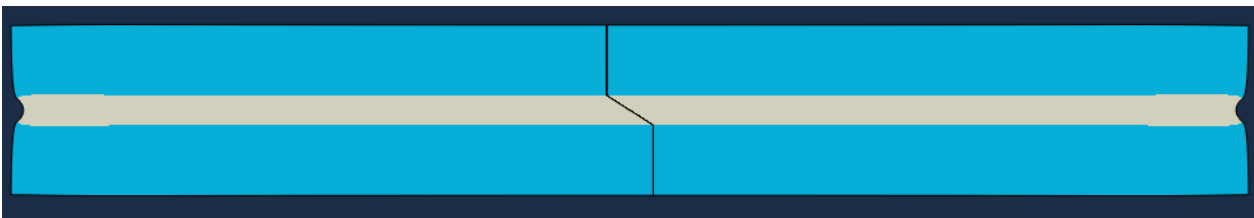


Figura 4.64. Deformada del Submodelo 2.T para un ángulo α de 45°



Figura 4.65. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista general

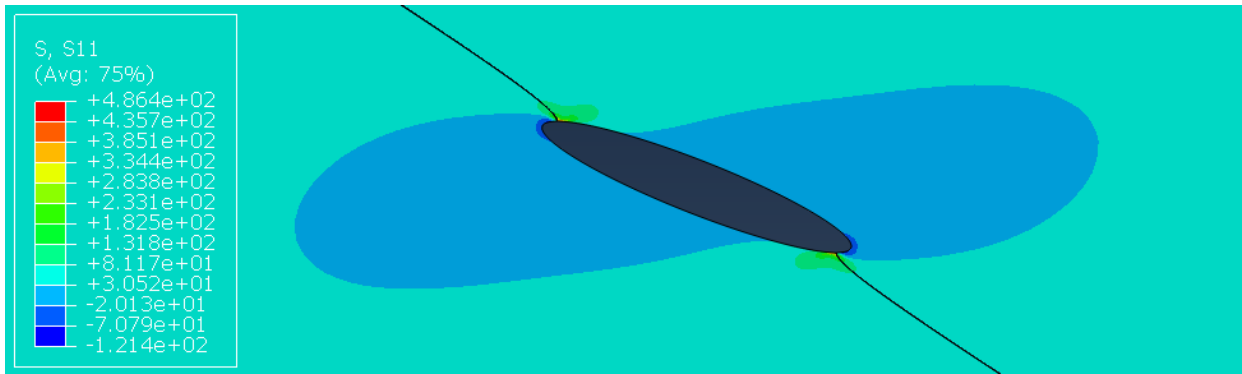


Figura 4.66. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista de detalle de la grieta

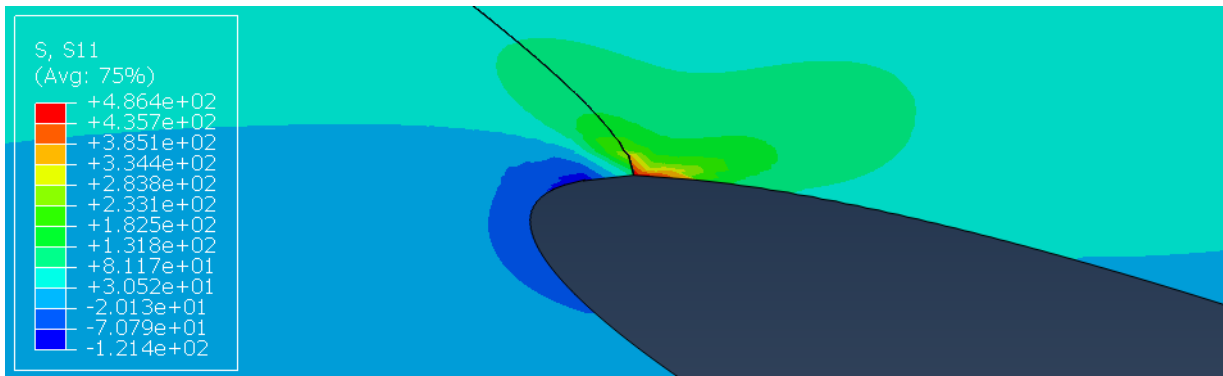


Figura 4.67. Mapa de tensiones longitudinales σ_{xx} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta



Figura 4.68. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista general

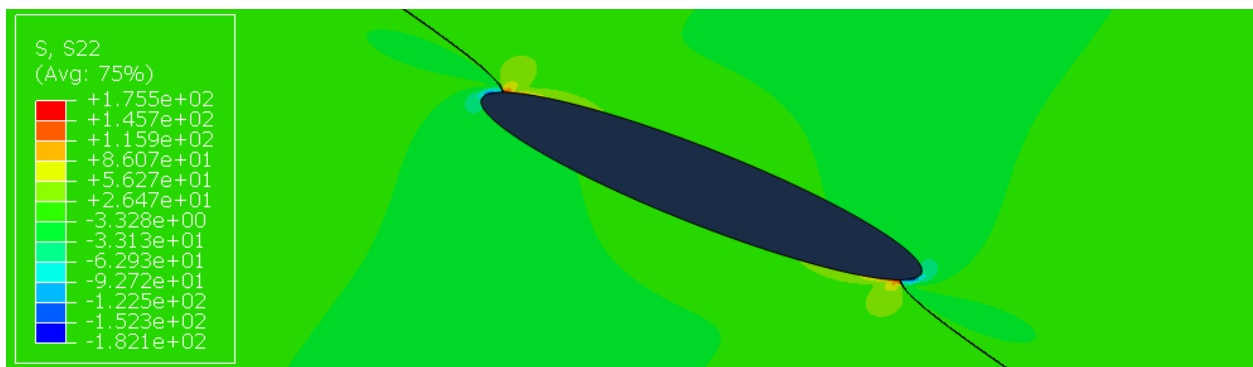


Figura 4.69. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista de detalle de la grieta

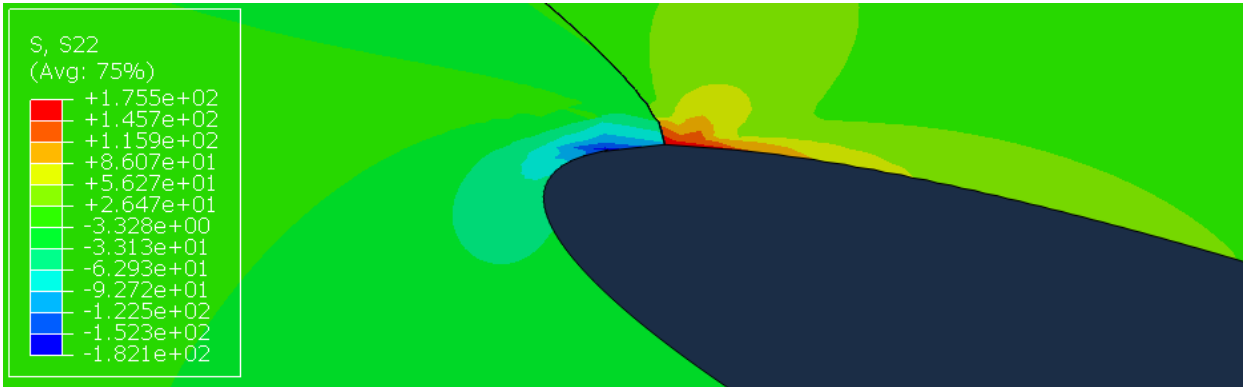


Figura 4.70. Mapa de tensiones transversales σ_{yy} (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 2.T para un ángulo α de 45° . Vista de detalle del frente izquierdo de la grieta

En la tensión longitudinal σ_{xx} se observa un comportamiento diferente entre las capas de 0, a compresión y 90° , a tracción. Para la tensión transversal σ_{yy} , sin embargo, se observa un comportamiento similar para todas las capas. Se ahondará en la explicación física de este fenómeno más adelante en este apartado.

Además, se observa que aparece una concentración de tensiones en las puntas de la grieta, como era de esperar.

Debido a que el comportamiento cualitativo es el mismo en ambos frentes, hecho en el que se profundiza en el Apartado 4.2.3, solo se muestran los resultados del frente izquierdo.

4.7.2.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran, para el frente izquierdo, los resultados del Submodelo 2.T en la Figura 4.71, los del Submodelo 2.T+Desp. en la Figura 4.72 y una comparación de este último con la condición de contorno en desplazamientos únicamente (cuyos resultados se utilizan del Apartado 4.2.1) en la Figura 4.73.

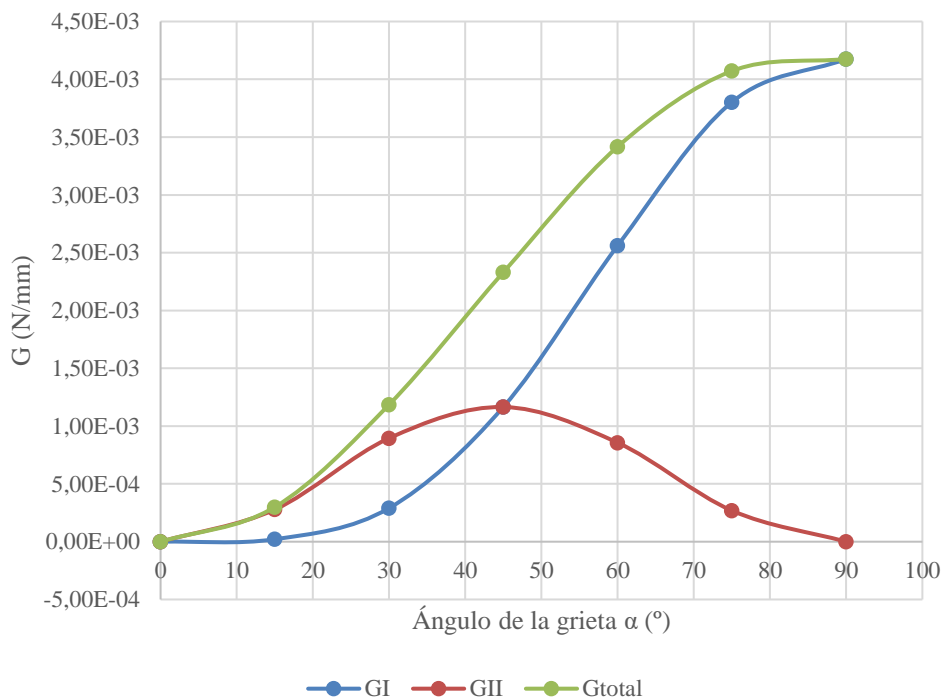


Figura 4.71. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 2.T en frente izquierdo

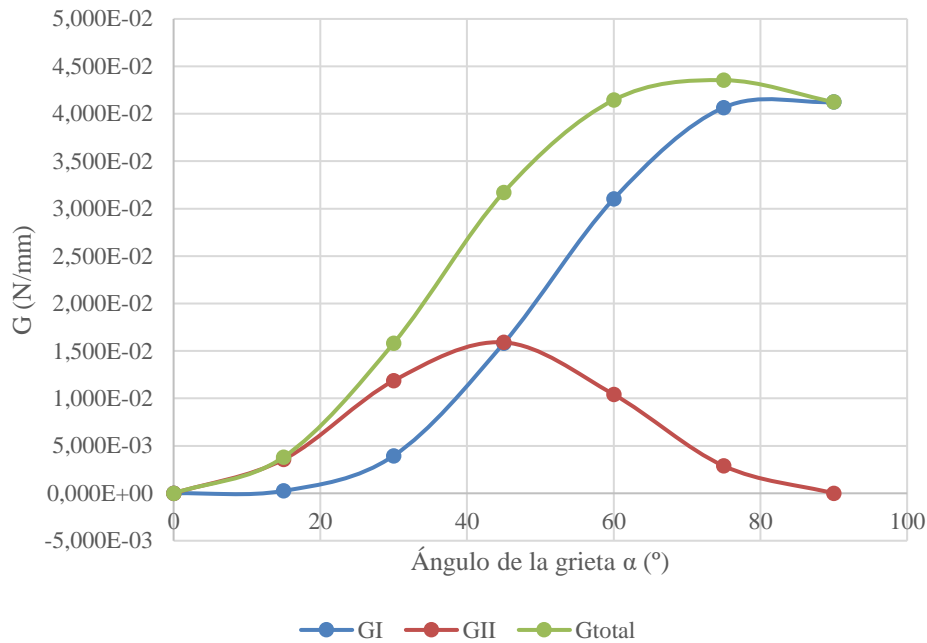


Figura 4.72. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 2.T+Desp. en frente izquierdo

Se observa para ambos casos un comportamiento cualitativo similar al observado en el caso sin temperatura, con un máximo de G_{II} para 45° , punto para el que las G en modo I y II se igualan, y un máximo de G_I para 90° , punto para el que se da modo I puro.

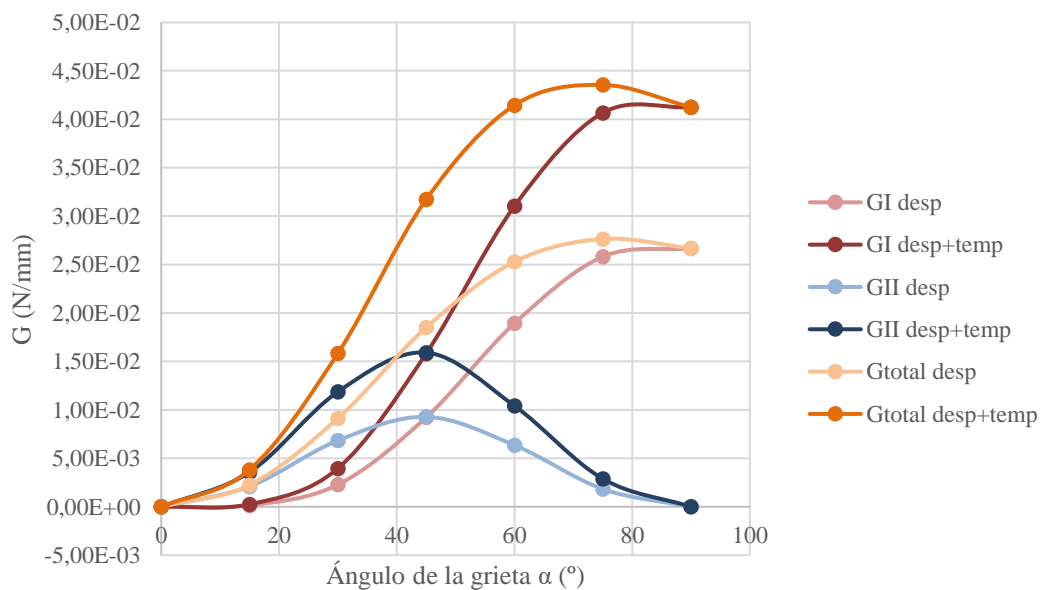


Figura 4.73. Comparación de G_I y G_{II} y G_{total} entre Modelo 2 y Submodelo 2.T+Desp. en frente izquierdo

Analizando estas gráficas puede verse que la forma de las evoluciones de las diferentes energías se mantiene igual para el caso con decremento térmico y sin él. Sin embargo, los valores sí que aumentan, lo cual representa que independientemente de la orientación, el modelado del enfriamiento asociado al curado aumentará la probabilidad de crecimiento de grieta.

A continuación, se busca dar una explicación desde el punto de vista cualitativo y físico de este fenómeno.

En primer lugar, se busca razonar sobre el modelo con efecto únicamente de la temperatura (Modelo 2.T), en el que hay un decremento térmico ($\Delta T < 0$). En este modelo, la capa de 90° tiende a contraerse en la dirección longitudinal y transversal, ya que α_1 y α_2 son positivas. Por otra parte, la capa de 0° tiende a contraerse en la dirección transversal, ya que α_2 es positiva, pero tiende a dilatarse en la dirección longitudinal, ya que α_1 es

negativa. Por tanto, vemos una tendencia opuesta en la dirección longitudinal, con la capa de 90° tendiendo a contraerse y la capa de 0° tendiendo a dilatarse. Estas deformaciones opuestas tienen que regularizarse para cumplir compatibilidad y surge la pregunta de qué fenómeno es predominante a nivel global en la dirección longitudinal de la probeta.

Esto se comprende con la observación de la Figura 4.74, en la que se muestra la deformación longitudinal y se observa que en la práctica totalidad de la probeta aparece una deformación positiva, una dilatación, salvo en los extremos de la capa de 90° donde lógicamente predomina la contracción. Por ello lo que se observa que predomina el efecto de la capa de 0° , lo que hace que aparezca una compresión en la lámina de 0° y una tracción en la lámina de 90° en la zona central, como se muestra en la Figura 4.65 mostrada anteriormente.



Figura 4.74. Deformación longitudinal E_{xx} del Modelo 2.T para un ángulo de la grieta de 45°

En el caso de la Figura 4.75 se muestra la deformación transversal. En este caso no hay efectos opuestos en las capas, y la contracción de ambas capas da lugar a una deformación negativa, una contracción de la probeta, quedando los valores de la dilatación en el entorno local de la grieta. Esto hace que no aparezca una tensión significativa en ninguna de las capas en la zona central, hecho que se observa en la Figura 4.68, en la que se ve que la tensión es prácticamente nula.

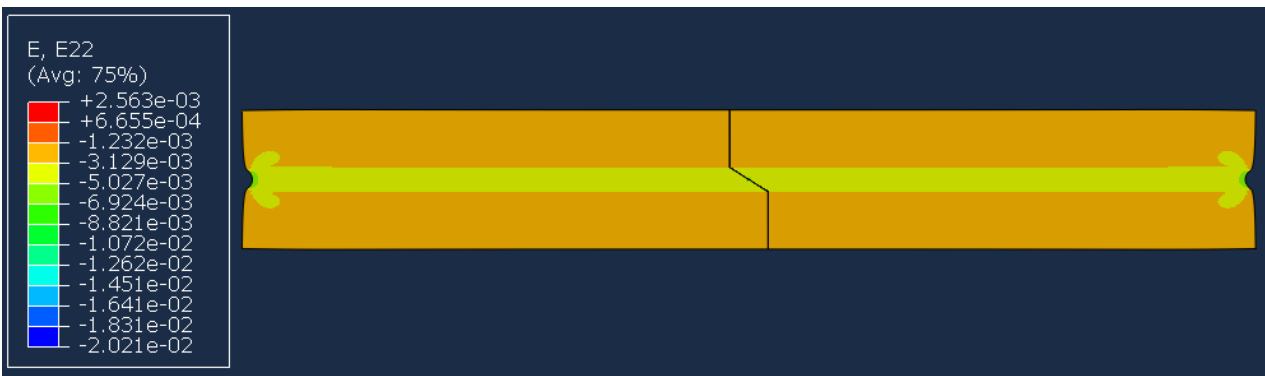


Figura 4.75. Deformación E_{yy} transversal del Modelo 2.T para un ángulo de la grieta de 45°

Por tanto, el efecto de la temperatura en las tensiones y deformaciones es el esperado.

Ahora se estudia cómo se traduce esto en el aumento del índice de liberación de energía. Para ello se estudia cómo afecta la temperatura a las variables implicadas en el cálculo del índice de liberación de energía. Por un lado, se estudian los desplazamientos relativos normales y tangenciales entre los nodos inmediatamente anteriores al fondo de la grieta, y por otro lado se estudia la tensión normal y tangencial justo en el fondo de la grieta. Se comparan para un ángulo de grieta de 45° en la Tabla 4.14. Se observa que todas las magnitudes implicadas en el cálculo de G , tanto para el modo II (tangencial) como para el modo I (normal), aumentan al incluir la temperatura, y, dado que estas se multiplican para obtener el índice de liberación de energía (véase el Apartado 2.2.2), este también debe aumentar, hecho coherente con los resultados obtenidos de la simulación. Para otros ángulos de grieta la comprobación sería equivalente y las conclusiones deben ser las mismas.

Tabla 4.14. Estudio de la variación de las magnitudes implicadas en el cálculo del índice de liberación de energía al introducir el decremento térmico en el modelo

Variable	Modelo sin temperatura	Modelo con temperatura	Variación
Deslizamiento relativo tangencial u_t	0,0000237	0,0000304	+28,23%
Tensión tangencial τ	1154,73	1479,98	+28,17%
Deslizamiento relativo normal u_n	0,00002359	0,00003007	+27,47%
Tensión normal σ	600,272	764,222	+27,31%

4.7.3 Efecto de la temperatura de curado en Modelo 3

Se muestran los resultados del efecto de la temperatura del Modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.3.

Los Submodelos que se han considerado para el estudio del efecto de la temperatura de curado son los siguientes:

- *Submodelo 3.T*: efecto del decremento térmico exclusivamente
- *Submodelo 3.T+Desp.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en desplazamientos

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada (Figura 4.76) para el Submodelo 3.T para una longitud de grieta de 0,02 mm. Para el resto de longitudes de grieta el comportamiento cualitativo es equivalente. Los mapas de tensiones son muy similares a los del Modelo 2 por lo que no se repiten aquí.



Figura 4.76. Deformada del Submodelo 3.T para una longitud de grieta de 0,02 mm

Debido a que el comportamiento cualitativo en ambos frentes es el mismo, hecho en el que se profundiza en el Apartado 4.2.3, solo se muestran los resultados del frente izquierdo.

4.7.3.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran, para el frente izquierdo, los resultados del Submodelo 3.T en la Figura 4.77, los del Submodelo 3.T+Desp. en la Figura 4.78 y una comparación de este último con la condición de contorno en desplazamientos únicamente (cuyos resultados se utilizan del Apartado 4.3.1) en la Figura 4.79.

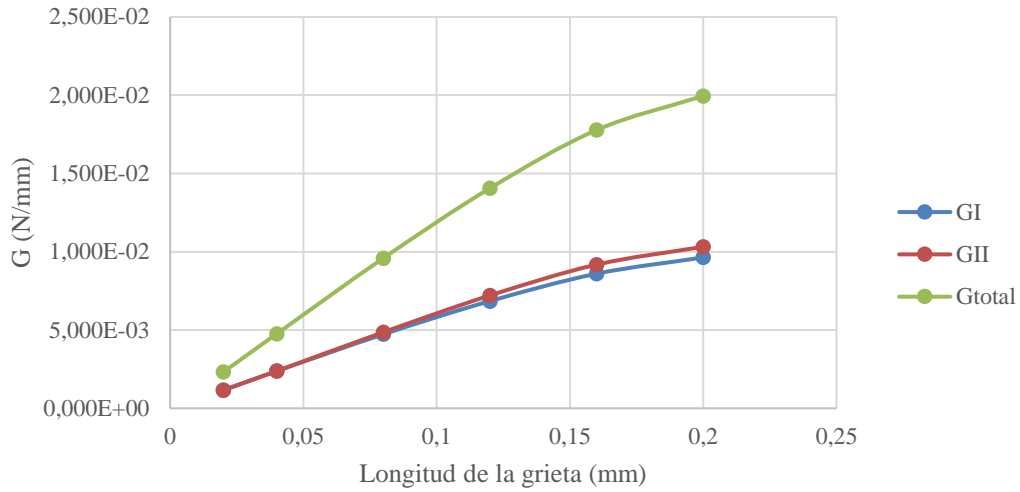


Figura 4.77. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 3.T en frente izquierdo

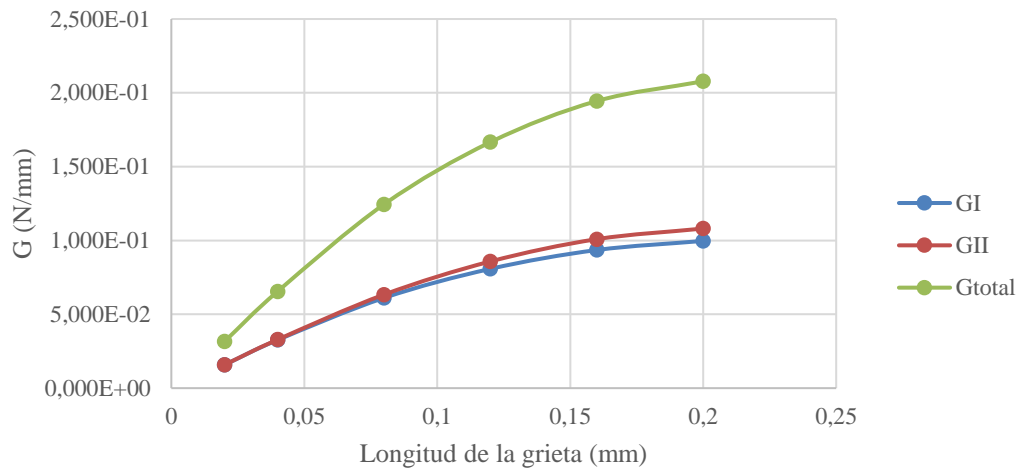


Figura 4.78. G_I , G_{II} y G_{total} para Submodelo 3.T+Desp. en frente izquierdo

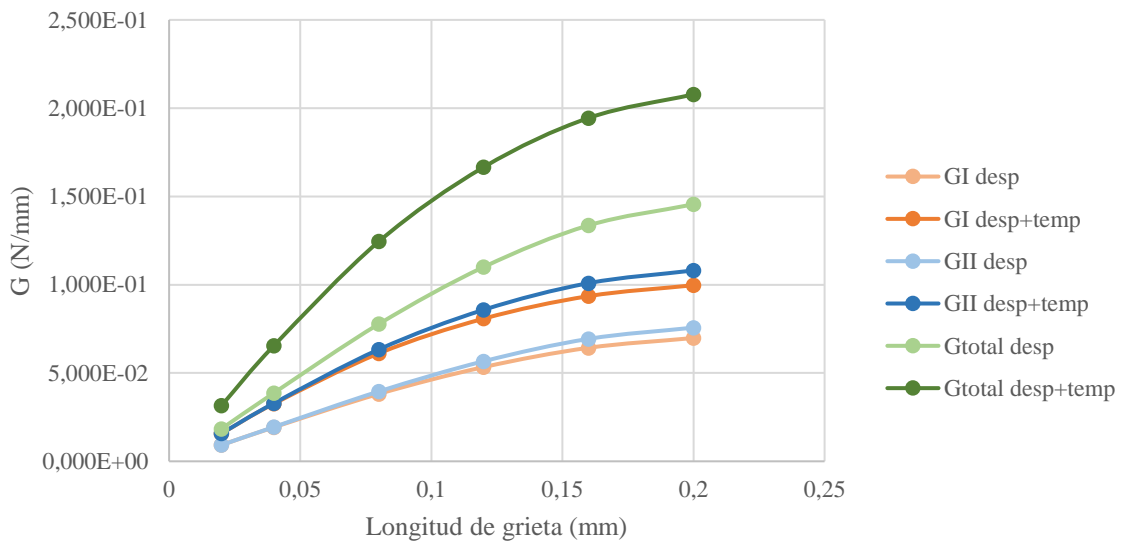


Figura 4.79. Comparación de G_I y G_{II} y G_{total} entre Modelo 3 y Submodelo 3.T+Desp. en frente izquierdo

Se observa que, aunque cuantitativamente hay un aumento de todas las G al incluir la temperatura, hecho esperable, no hay una gran diferencia del comportamiento cualitativo añadiendo la temperatura. La explicación desde un punto de vista cualitativo y físico, y las comprobaciones necesarias son las mismas que se dan en el Apartado 4.7.2.1.

4.7.4 Efecto de la temperatura de curado en Modelo 4

Se muestran los resultados del efecto de la temperatura del Modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.4.

Los Submodelos que se han considerado para el estudio del efecto de la temperatura de curado son los siguientes:

- *Submodelo 4.T*: efecto del decremento térmico exclusivamente
- *Submodelo 4.T+Desp.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en desplazamientos

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada (Figura 4.80) para el Submodelo 4.T para un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm. Para el resto de espesores, el comportamiento cualitativo es equivalente. Los mapas de tensiones son muy similares a los del Modelo 2 por lo que no se repiten aquí.

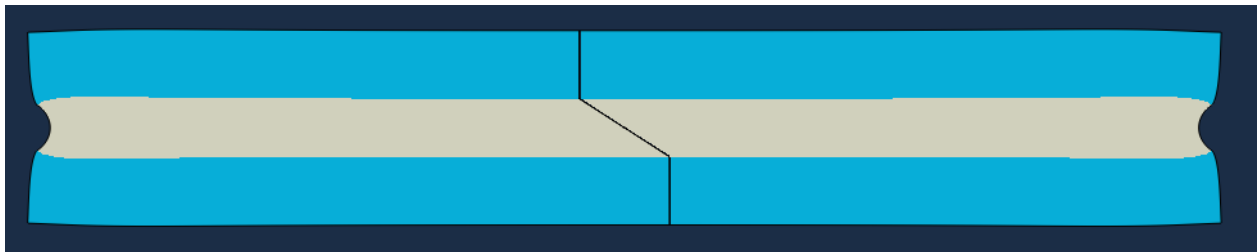


Figura 4.80. Deformada del Submodelo 4.T para un espesor de la capa de 90° de 0,38 mm

Debido a que el comportamiento cualitativo para ambos frentes es el mismo, hecho en el que se profundiza en el Apartado 4.2.3, solo se muestran los resultados del frente izquierdo.

4.7.4.1 Resultados frente izquierdo

Se muestran, para el frente izquierdo, los resultados del Submodelo 4.T en la Figura 4.81, los del Submodelo 3.T+Desp. en la Figura 4.82 y una comparación de este último con la condición de contorno en desplazamientos únicamente (cuyos resultados se utilizan del Apartado 4.4.1) en la Figura 4.83.

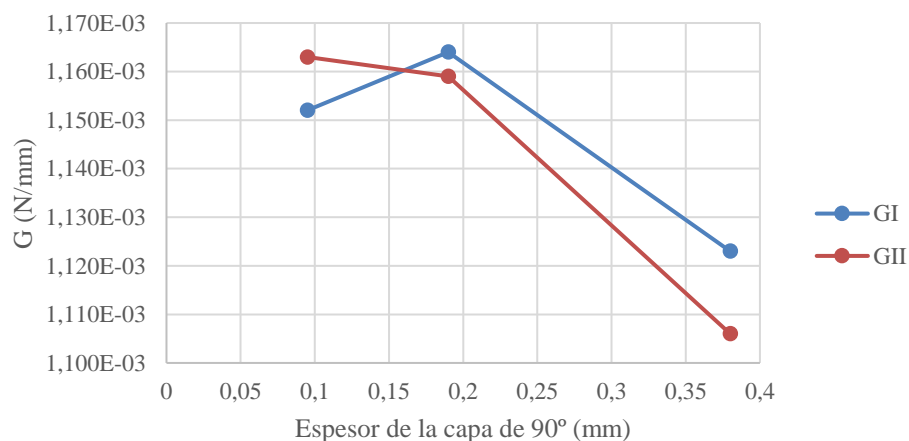


Figura 4.81. G_I y G_{II} para Submodelo 4.T en frente izquierdo. Vista de detalle

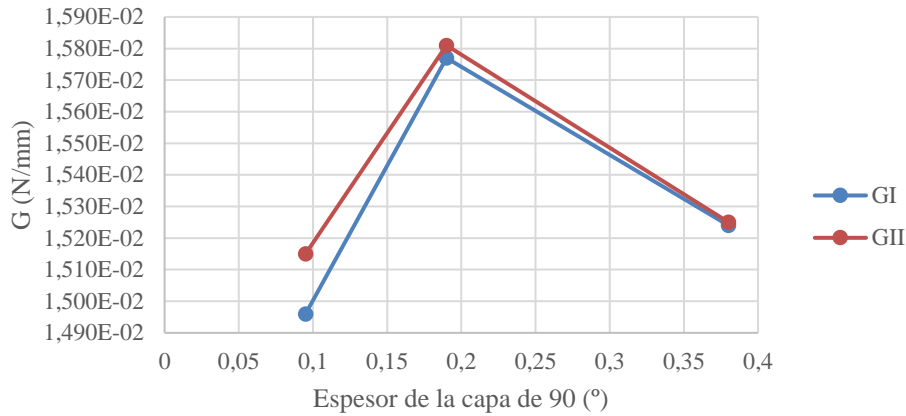


Figura 4.82. G_I y G_{II} para Submodelo 4.T+Desp. en frente izquierdo

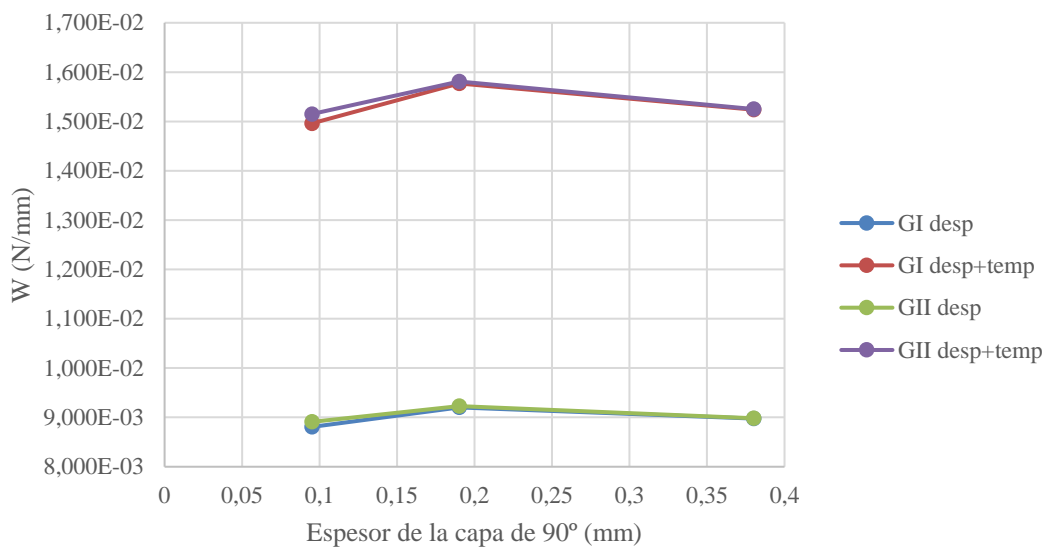


Figura 4.83. Comparación de G_I y G_{II} entre Modelo 4 y Submodelo 4.T+Desp. en frente izquierdo. Vista general

Se observa que, aunque cuantitativamente hay un aumento de todas las G al incluir la temperatura, hecho esperable, no hay una gran diferencia del comportamiento cualitativo añadiendo la temperatura. La explicación desde un punto de vista cualitativo y físico, y las comprobaciones necesarias son las mismas que se dan en el Apartado 4.7.2.1.

4.7.5 Efecto de la temperatura de curado en Modelo 5

Se muestran los resultados del efecto de la temperatura del Modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.5.

Los Submodelos que se han considerado para cada uno de los descritos en el Apartado 3.2.5 para el estudio del efecto de la temperatura de curado son los siguientes:

- *Submodelo 5.(...).T*: efecto del decremento térmico exclusivamente
- *Submodelo 5.(...).T+Desp.*: efecto conjunto del decremento térmico y la condición de contorno en desplazamientos

En primer lugar, se muestran imágenes de la deformada y las tensiones en ambos submodelos descritos en el Apartado 3.2.5. Se muestran para un espesor de la capa de 90° h de 0,19 mm y un ángulo de 45°. El comportamiento cualitativo para el resto de espesores y ángulos es equivalente.

Se muestran imágenes de la deformada de la grieta del Submodelo 5.019.45A.T en la Figura 4.84, y la del Submodelo 5.019.45B.T en la Figura 4.85 y Figura 4.86. Todas ellas se muestran para un espesor de la capa de $90^\circ h$ de 0,19 mm y un ángulo de 45° . Para el resto de espesores y ángulos, la deformada es equivalente.



Figura 4.84. Deformada del Submodelo 5.019.45A.T

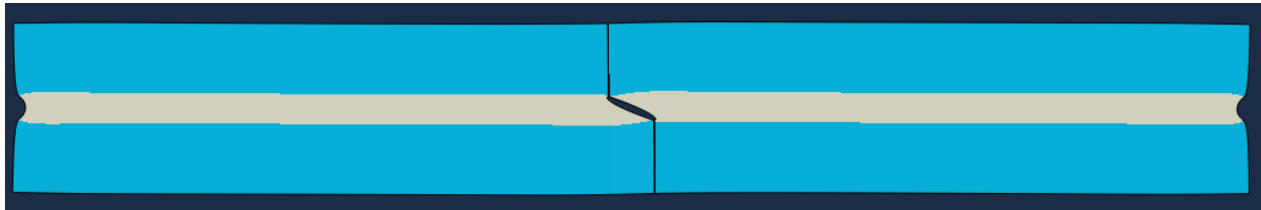


Figura 4.85. Deformada del Submodelo 5.019.45B.T. Vista general

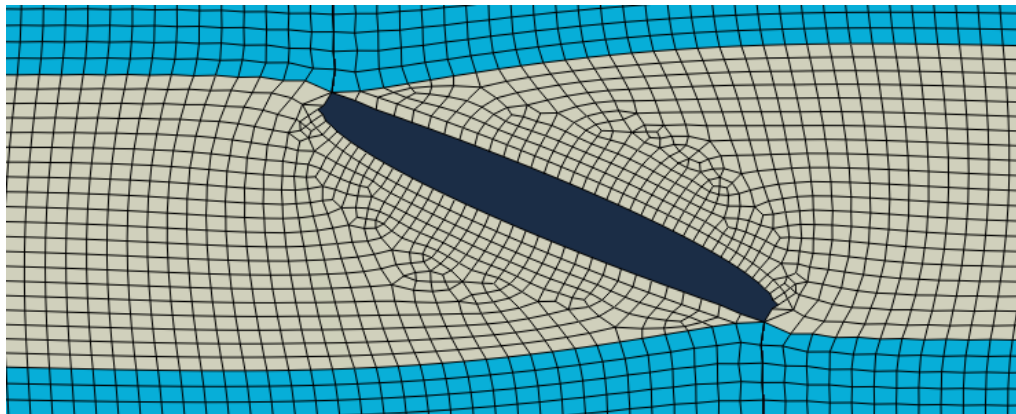


Figura 4.86. Deformada del Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle

Para representar los mapas de tensiones (Figura 4.87, Figura 4.88, Figura 4.89 y Figura 4.90) y desplazamientos (Figura 4.91, Figura 4.92, Figura 4.93 y Figura 4.94), se ha aplicado un cambio del sistema de referencia para obtener las componentes normales (modo I) y tangenciales (modo II) a la diagonal. Todas ellas se muestran para un espesor de la capa de $90^\circ h$ de 0,19 mm y un ángulo de 45° . Para el resto de espesores y ángulos, las tensiones y desplazamientos son equivalentes.

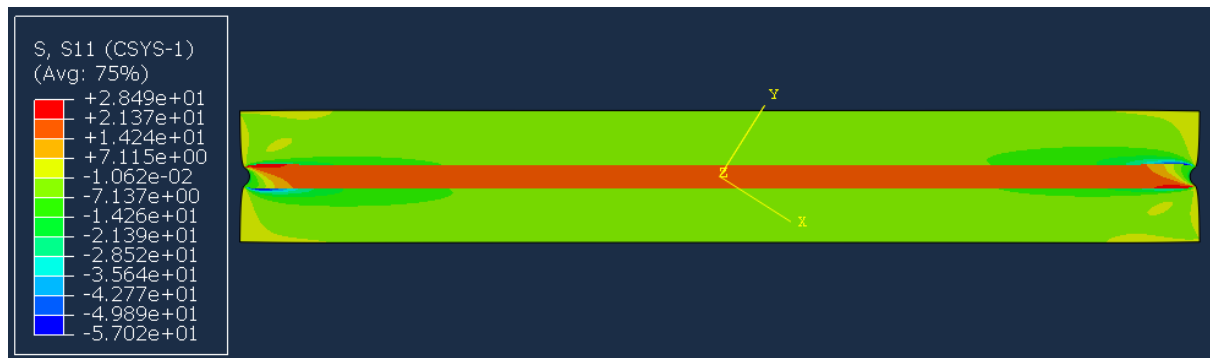


Figura 4.87. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T
Vista general

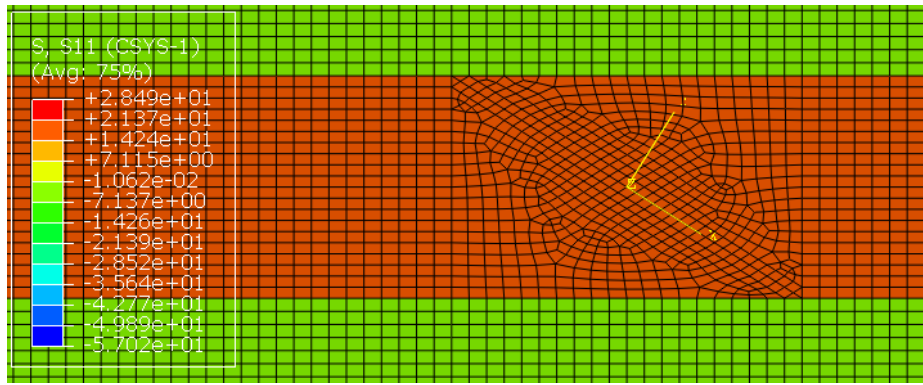


Figura 4.88. Mapa de tensiones tangenciales τ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T. Vista de detalle de la diagonal

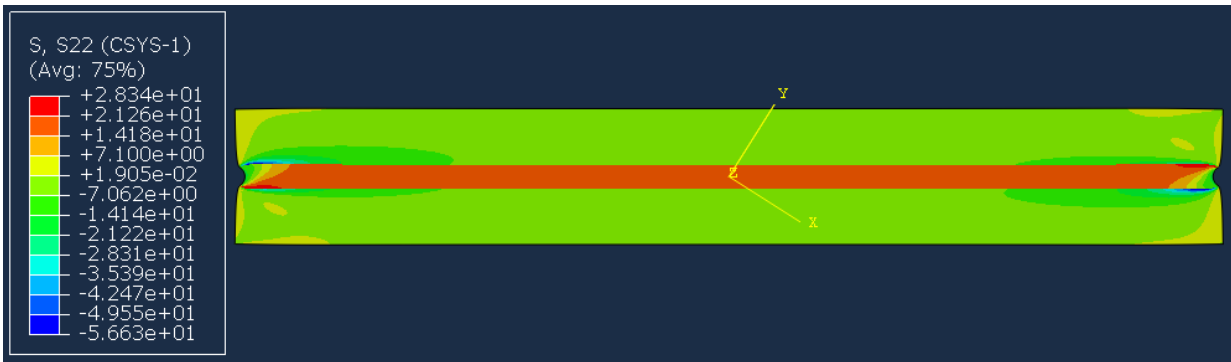


Figura 4.89. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T. Vista general

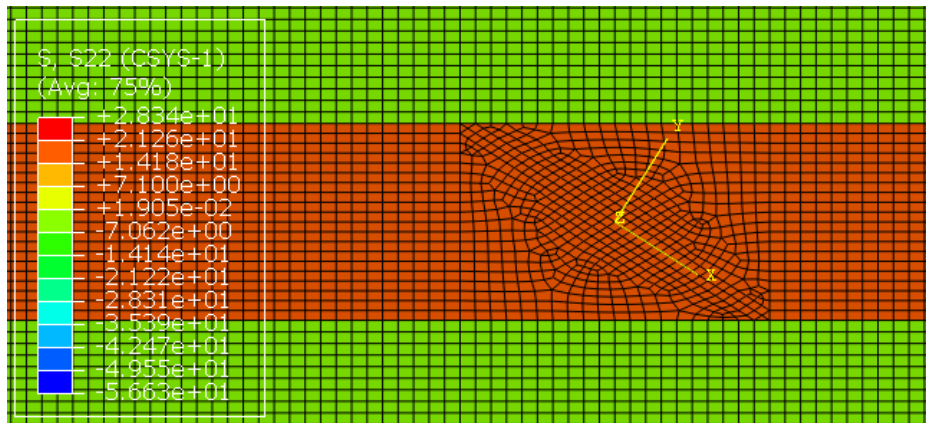


Figura 4.90. Mapa de tensiones normales σ (MPa) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45A.T. Vista de detalle de la diagonal

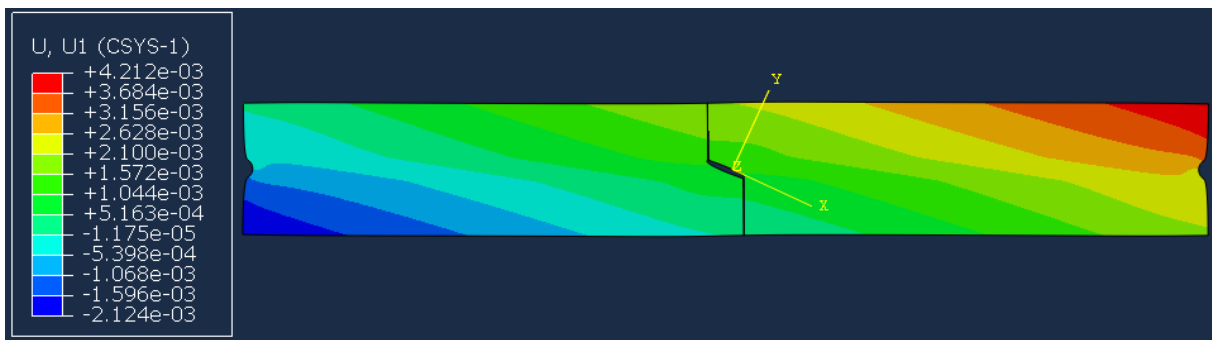


Figura 4.91. Mapa de desplazamientos tangenciales u_t (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista general

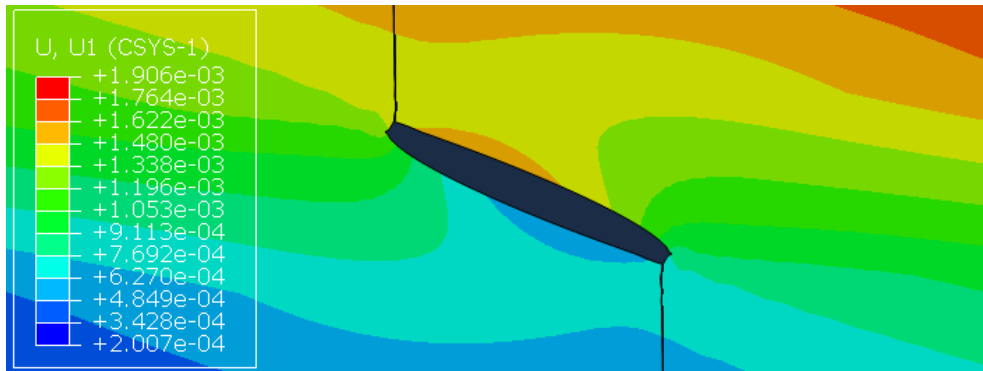


Figura 4.92. Mapa de desplazamientos tangenciales u_r (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle

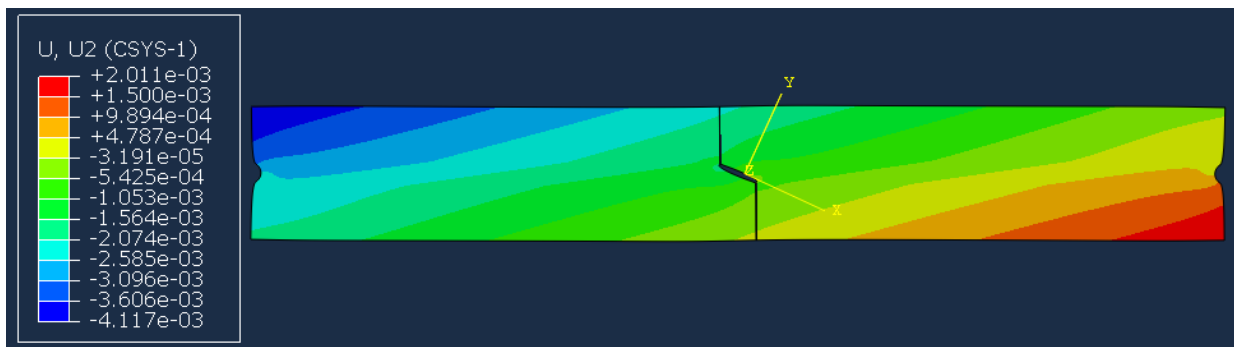


Figura 4.93. Mapa de desplazamientos normales u_x (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista general

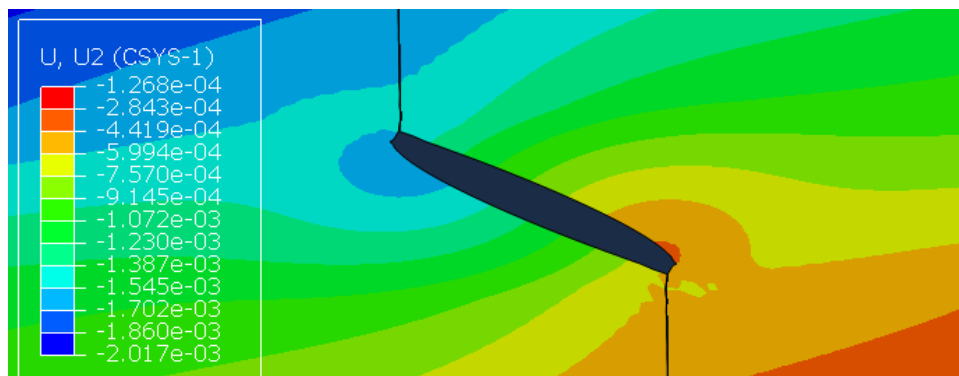


Figura 4.94. Mapa de desplazamientos normales u_y (mm) sobre sólido deformado para Submodelo 5.019.45B.T. Vista de detalle

Se observa que las tensiones en la diagonal de interés son prácticamente constantes para toda la diagonal, aunque existe una cierta distribución de los desplazamientos.

4.7.5.1 Resultados componente tangencial de W

Los resultados del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en la componente tangencial para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.15 para el modelo 5.T y en la Tabla 4.16 para el modelo 5.T+Desp.

Tabla 4.15. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,018826743	---
	45°	0,005405022	0,010798143	0,021175169
	60°	---	0,003925405	---
	90°	---	2,50335E-08	---

Tabla 4.16. Componente tangencial del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,219218406	---
	45°	0,062508433	0,128516517	0,257734147
	60°	---	0,046640534	---
	90°	---	6,68287E-18	---

4.7.5.2 Resultados componente normal de W

Los resultados del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en la componente normal para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.17 para el modelo 5.T y en la Tabla 4.18 para el modelo 5.T+Desp.

Tabla 4.17. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,003488928	---
	45°	0,004878629	0,010087991	0,0215797
	60°	---	0,018842834	---
	90°	---	0,028931545	---

Tabla 4.18. Componente normal del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,037320742	---
	45°	0,053562641	0,111968713	0,240895432
	60°	---	0,213037675	---
	90°	---	0,332208128	---

4.7.5.3 Resultados de la suma de componentes de W

Los resultados de la suma del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes para los diferentes ángulos y espesores se muestran en la Tabla 4.19 para el Modelo 5.T y en la Tabla 4.20 para el modelo 5.T+Desp.

Tabla 4.19. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5.T

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,022315671	---
	45°	0,010283651	0,020886134	0,042754869
	60°	---	0,022768239	---
	90°	---	0,02893157	---

Tabla 4.20. Suma de las componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta en ambas componentes (MPa*mm) para el Modelo 5.T+Desp.

		Espesor de la capa de 90° (mm)		
		0,095 mm	0,19 mm	0,38 mm
Ángulo de la grieta (°)	30°	---	0,256539148	---
	45°	0,116071074	0,240485231	0,49862958
	60°	---	0,259678209	---
	90°	---	0,332208128	---

4.7.5.4 Comparación de resultados

En primer lugar, se compara, para el ángulo de grieta de 45°, la evolución del trabajo liberado con el espesor. En la Figura 4.95 se hace para el Modelo 5.T; en la Figura 4.96 se hace para el Modelo 5.T+Desp. y en Figura 4.97

se estudia comparativamente entre el Modelo 5 y el Modelo 5.T+Desp. Se observa que el trabajo (en sus dos componentes y en la suma de estas) el trabajo liberado aumenta proporcionalmente con el espesor.

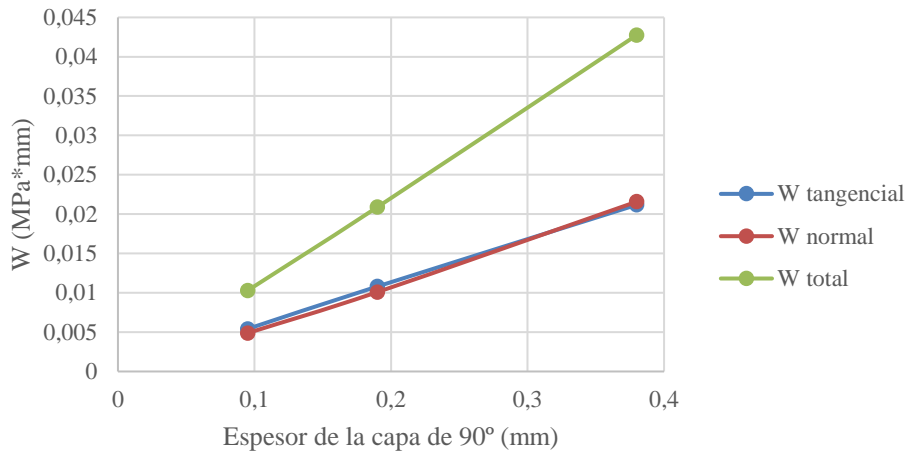


Figura 4.95. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5.T

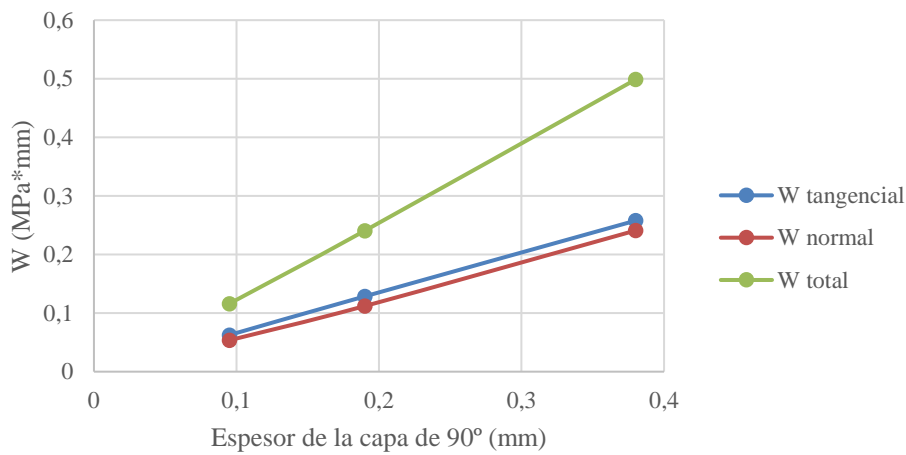


Figura 4.96. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores para el Modelo 5.T+Desp

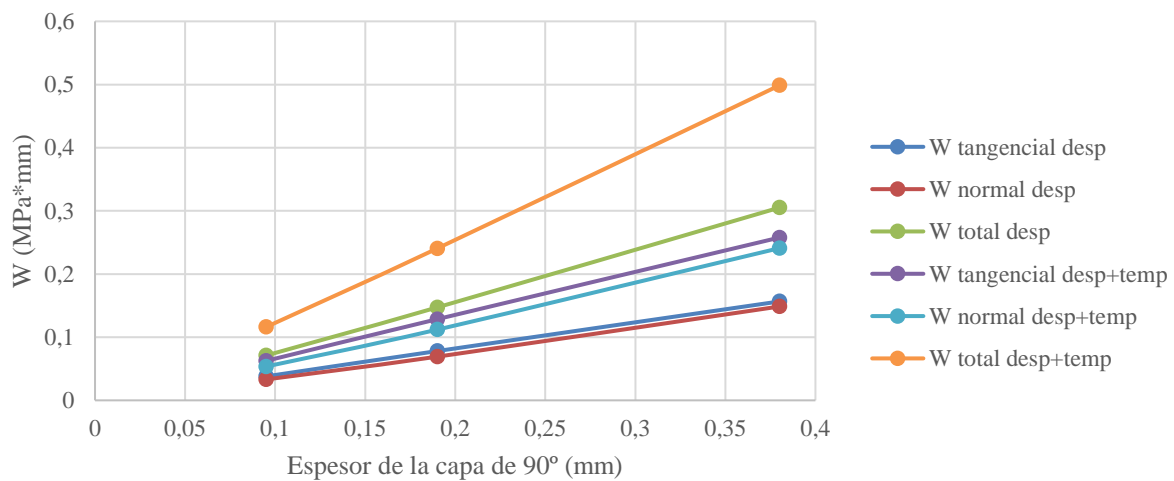


Figura 4.97. Comparación del trabajo liberado por unidad de longitud de la grieta por daño explosivo para un ángulo de la diagonal β de 45° para diferentes espesores entre el Modelo 5, y el Modelo 5.T+Desp

Se observa que, aunque cuantitativamente hay un aumento de todas las G al incluir la temperatura, hecho esperable, no hay una gran diferencia del comportamiento cualitativo añadiendo la temperatura. La explicación desde un punto de vista cualitativo y físico del efecto de la temperatura en general es la misma que se da en el que se da en el Apartado 4.7.2.1. En cuanto a la comprobación de por qué aumentan los valores obtenidos, se realiza más tarde.

Se representa, para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm, la evolución el trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para los diferentes ángulos de grieta. Se representa en la Figura 4.98 para el Modelo 5.T; en la Figura 4.99 para el Modelo 5.T+Desp y, en la Figura 4.100, se estudia comparativamente entre el Modelo 5 y el Modelo 5.T+Desp. Se observa que la componente tangencial del trabajo disminuye para ángulos mayores, la componente normal del trabajo aumenta para ángulos mayores y la suma de las componentes del trabajo presenta en todos los casos un mínimo para el ángulo de 45° .

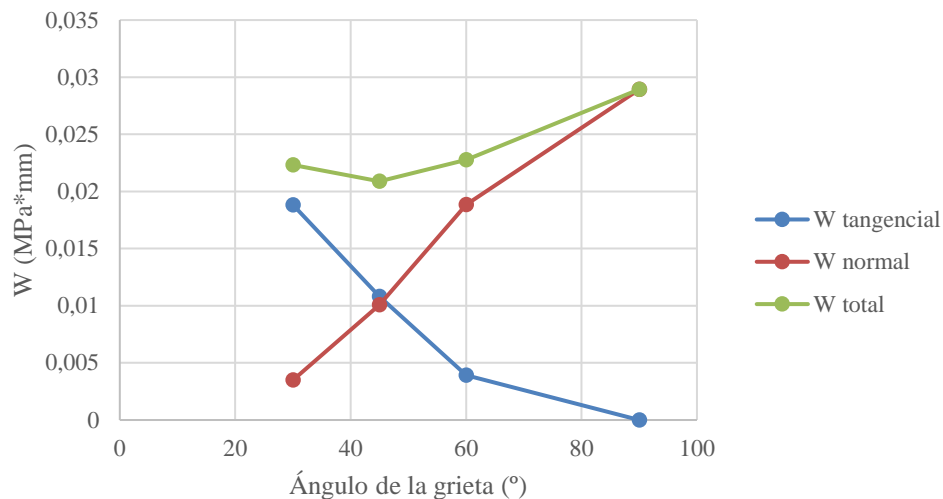


Figura 4.98. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5.T

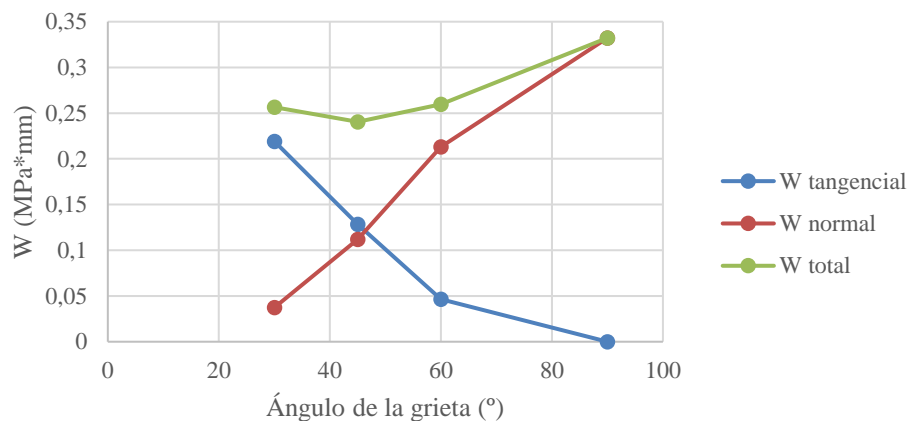


Figura 4.99. Trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta para el Modelo 5.T+Desp

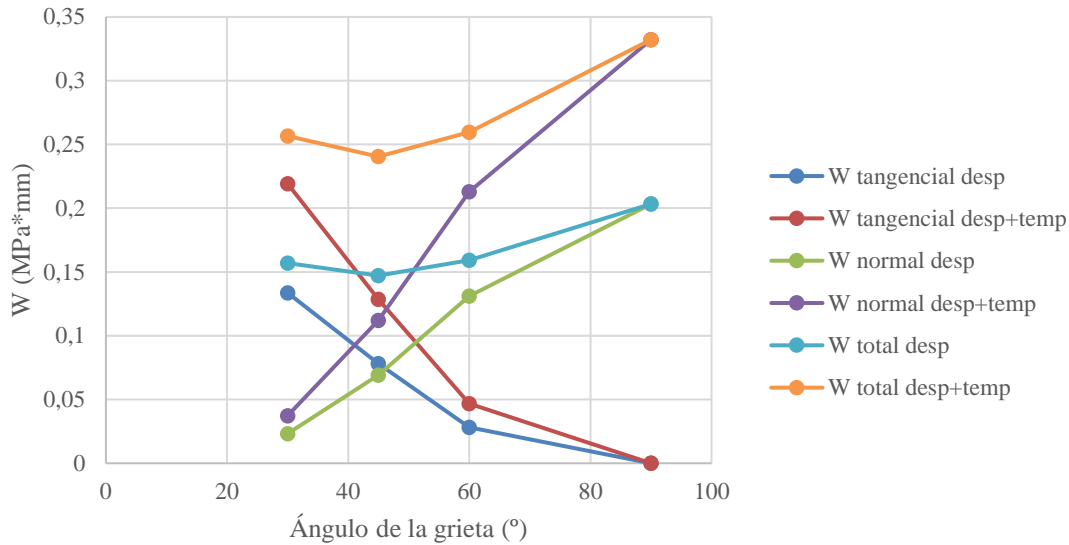


Figura 4.100. Comparación de trabajo liberado por unidad de longitud de la grieta por daño explosivo para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm para diferentes ángulos de grieta entre el Modelo 5 y el Modelo 5.T+Desp

Se observa que, aunque cuantitativamente hay un aumento de todas las G al incluir la temperatura, hecho esperable, no hay una gran diferencia del comportamiento cualitativo añadiendo la temperatura. La explicación desde un punto de vista cualitativo y físico del efecto de la temperatura en general es la misma que se da en el que se da en el Apartado 4.7.2.1.

A continuación se estudia por qué aumentan los valores obtenidos del trabajo liberado por unidad de longitud. Para ello se estudia cómo varían las variables involucradas en el cálculo de este. En concreto, se estudia, para cada punto de la diagonal donde se calculan las variables, los deslizamientos relativos normales u_n y la tensión normal σ , que se muestran en la Tabla 4.21, y el deslizamiento relativo tangencial u_t y la tensión tangencial τ , que se muestran en la Tabla 4.22. Se hace para un espesor de 0,19 mm y un ángulo de 45° . Se observa que en todos los casos, al incluir la temperatura, estos valores aumentan. Dado que en el cálculo del trabajo se hace un sumatorio del producto de estas magnitudes (véase el Apartado 2.2.1.2), el resultado del trabajo total liberado también es previsible que aumente, como de hecho se observa que ocurre. Para otros ángulos y espesores, el razonamiento debe ser el mismo aunque no se muestra por simplicidad.

Tabla 4.21. Estudio de la variación de las variables normales involucradas en el cálculo del trabajo normal liberado por daño explosivo al incluir el decremento térmico en el modelo

Punto	Modelo sin temperatura		Modelo con temperatura		Variación	
	Deslizamiento relativo normal u_n	Tensión normal σ	Deslizamiento relativo normal u_n	Tensión normal σ	Deslizamiento relativo normal u_n	Tensión normal σ
1	0,000330928	49,76569748	0,00042545	63,8761	+28,56%	+28,35%
2	0,000735638	49,76569748	0,00094411	63,8761	+28,34%	+28,35%
3	0,000915474	49,76569748	0,00117513	63,8761	+28,36%	+28,35%
4	0,001095747	49,76569366	0,00140584	63,8761	+28,30%	+28,35%
5	0,001255767	49,76569366	0,00161208	63,8761	+28,37%	+28,35%

6	0,001376349	49,76569366	0,001765807	63,8761	+28,30%	+28,35%
7	0,001502485	49,76569748	0,001928554	63,8761	+28,36%	+28,35%
8	0,001597022	49,76569748	0,002048995	63,8761	+28,30%	+28,35%
9	0,001697985	49,76569748	0,002179556	63,8761	+28,36%	+28,35%
10	0,001770616	49,76569748	0,002271412	63,8761	+28,28%	+28,35%
11	0,001848274	49,76569748	0,002372651	63,8761	+28,37%	+28,35%
12	0,001904682	49,76569748	0,002443188	63,8761	+28,27%	+28,35%
13	0,001962415	49,76569748	0,002519374	63,8761	+28,38%	+28,35%
14	0,002005037	49,76569748	0,002571783	63,8761	+28,27%	+28,35%
15	0,002044774	49,76569748	0,002625167	63,8761	+28,38%	+28,35%
16	0,002074439	49,76569748	0,002660903	63,8761	+28,27%	+28,35%
17	0,00209891	49,76569748	0,002694299	63,8761	+28,37%	+28,35%
18	0,002115406	49,76569748	0,002713958	63,8761	+28,29%	+28,35%
19	0,002125796	49,76569748	0,002728185	63,8761	+28,34%	+28,35%
20	0,002128788	49,76569748	0,002731673	63,8761	+28,32%	+28,35%
21	0,002126054	49,76569748	0,002727857	63,8761	+28,31%	+28,35%
22	0,002114979	49,76569748	0,002714504	63,8761	+28,35%	+28,35%
23	0,002099645	49,76569748	0,002693356	63,8761	+28,28%	+28,35%
24	0,002073619	49,76569748	0,002661947	63,8761	+28,37%	+28,35%
25	0,002045767	49,76569366	0,002623902	63,8761	+28,26%	+28,35%
26	0,002004159	49,76569366	0,002572911	63,8761	+28,38%	+28,35%
27	0,001963314	49,76569748	0,002518232	63,8761	+28,26%	+28,35%
28	0,001903928	49,76569748	0,002444157	63,8761	+28,37%	+28,35%
29	0,00184896	49,76569748	0,002371774	63,8761	+28,28%	+28,35%
30	0,001770037	49,76569748	0,00227215	63,8761	+28,37%	+28,35%
31	0,001698468	49,76569366	0,00217894	63,8761	+28,29%	+28,35%
32	0,001596681	49,76569366	0,00204944	63,8761	+28,36%	+28,35%
33	0,001502838	49,76569366	0,0019281	63,8761	+28,30%	+28,35%

34	0,001375962	49,76569366	0,0017663	63,8761	+28,37%	+28,35%
35	0,001256209	49,76569748	0,00161152	63,8761	+28,28%	+28,35%
36	0,001095383	49,76569748	0,0014063	63,8761	+28,38%	+28,35%
37	0,000915664	49,76569366	0,00117489	63,8761	+28,31%	+28,35%
38	0,000735546	49,76569366	0,00094423	63,8761	+28,37%	+28,35%
39	0,000330929	49,76569366	0,00042545	63,8761	+28,56%	+28,35%

Tabla 4.22. Estudio de la variación de las variables tangenciales involucradas en el cálculo del trabajo tangencial liberado por daño explosivo al incluir el decremento térmico en el modelo

Punto	Modelo sin temperatura		Modelo con temperatura		Variación	
	Deslizamiento relativo tangencial u_t	Tensión tangencial τ	Deslizamiento relativo tangencial u_t	Tensión tangencial τ	Deslizamiento relativo tangencial u_t	Tensión tangencial τ
1	0,000446854	48,23431	0,000569474	61,402	+27,44%	+27,30%
2	0,000710724	48,23431	0,00090468	61,402	+27,29%	+27,30%
3	0,000852794	48,23431	0,001085041	61,402	+27,23%	+27,30%
4	0,001031125	48,23431	0,001312427	61,402	+27,28%	+27,30%
5	0,001152702	48,23431	0,001466599	61,402	+27,23%	+27,30%
6	0,00127126	48,23431	0,001617813	61,402	+27,26%	+27,30%
7	0,001375567	48,23431	0,001750087	61,402	+27,23%	+27,30%
8	0,001464167	48,23431	0,0018634	61,402	+27,27%	+27,30%
9	0,001547237	48,23431	0,001968308	61,402	+27,21%	+27,30%
10	0,001613299	48,23431	0,002053104	61,402	+27,26%	+27,30%
11	0,001679154	48,23431	0,002136127	61,402	+27,21%	+27,30%
12	0,001729008	48,23431	0,002200242	61,402	+27,25%	+27,30%
13	0,001779518	48,23430	0,002263825	61,402	+27,22%	+27,30%
14	0,001815115	48,23430	0,00230959	61,402	+27,24%	+27,30%
15	0,001851701	48,23430	0,0023558	61,402	+27,22%	+27,30%
16	0,001874945	48,23430	0,002385479	61,402	+27,23%	+27,30%
17	0,001898588	48,23430	0,002415731	61,402	+27,24%	+27,30%

18	0,00191004	48,23430	0,002430109	61,402	+27,23%	+27,30%
19	0,001921678	48,23430	0,002445149	61,402	+27,24%	+27,30%
20	0,00192164	48,23430	0,002444997	61,402	+27,23%	+27,30%
21	0,001921747	48,23430	0,00244505	61,402	+27,23%	+27,30%
22	0,001909938	48,23430	0,00243024	61,402	+27,24%	+27,30%
23	0,001898625	48,23430	0,00241569	61,402	+27,23%	+27,30%
24	0,001874847	48,23430	0,00238559	61,402	+27,24%	+27,30%
25	0,001851518	48,23431	0,00235605	61,402	+27,25%	+27,30%
26	0,001815193	48,23431	0,00230948	61,402	+27,23%	+27,30%
27	0,001779221	48,23431	0,00226421	61,402	+27,26%	+27,30%
28	0,001729227	48,23431	0,00219996	61,402	+27,22%	+27,30%
29	0,001678839	48,23431	0,00213653	61,402	+27,26%	+27,30%
30	0,001613559	48,23431	0,00205276	61,402	+27,22%	+27,30%
31	0,001546928	48,23431	0,00196871	61,402	+27,27%	+27,30%
32	0,001464432	48,23431	0,00186307	61,402	+27,22%	+27,30%
33	0,001375391	48,23430	0,00175032	61,402	+27,26%	+27,30%
34	0,001271384	48,23430	0,00161765	61,402	+27,24%	+27,30%
35	0,001152587	48,23430	0,00146675	61,402	+27,26%	+27,30%
36	0,001031299	48,23430	0,0013122	61,402	+27,24%	+27,30%
37	0,000852666	48,23430	0,00108521	61,402	+27,27%	+27,30%
38	0,000710812	48,23430	0,00090457	61,402	+27,26%	+27,30%
39	0,000446881	48,23431	0,00056944	61,402	+27,43%	+27,30%

4.7. Validación de resultados. Test de convergencia de malla

A continuación, se describen los métodos que se han realizado para validar, para los diferentes modelos, los resultados obtenidos. Para validar la representatividad de los resultados se han utilizado tests de convergencia de malla. Mediante estos, se busca realizar determinados cambios en la malla del modelo, como puede ser un refinado de los elementos, disminuyendo el tamaño de estos; o un mallado simétrico y comparar los resultados entre un modelo y otro. Si los resultados obtenidos son razonablemente similares antes y después de los cambios, se da por validado el modelo.

4.7.6 Validación del Modelo 1

Se ha realizado el test de convergencia de malla para el modelo de una longitud de grieta a de 1,875 mm para el G_{II} en el caso de condición de contorno en tensiones, cuyos resultados son más significativos que el caso de condición de contorno en desplazamiento.

Los modelos que se han considerado en el último paso de refinado de los elementos son los siguientes:

- *Modelo original*: 52.160 elementos y tamaño mínimo del elemento en la punta de la grieta de 0,0014 mm
- *Modelo refinado*: 210.576 elementos y tamaño mínimo del elemento en la punta de la grieta de 0,0007 mm

Los resultados del último paso del test de convergencia se muestran en la Tabla 4.23. Como los modelos de las diferentes longitudes de grieta a son muy similares en tipo de malla, simetría de esta, tamaño de elementos y condiciones de contorno; se considera que el test valida todos los resultados del Modelo 1.

Tabla 4.23. Test de convergencia de malla de G_{II} para Modelo 1 con condición de contorno en tensiones para una longitud de grieta a de 1,875 mm

Modelo	G_{II} modelo original (N/mm)	G_{II} modelo refinado (N/mm)	Variación porcentual
VCCT en frente izquierdo	1,278E-3	1,290E-3	+ 0,94%
VCCT en frente derecho	2,772E-3	2,804E-5	+ 1,15%
Frente izquierdo con VCCT en ambos frentes	1,278E-3	1,290E-3	+ 0,94%
Frente derecho con VCCT en ambos frentes	2,772E-3	2,804E-5	+ 1,15%

Como se observa, las variaciones porcentuales son muy pequeñas. Sin embargo, se hace énfasis en que no se considera que la convergencia de los resultados del índice de liberación de energía sea un método adecuado de validación del modelo. Esto se debe a que, en vista de los resultados, Abaqus calcula el índice de liberación de energía mediante el VCCT a partir de los resultados de un único nodo de la punta de la grieta, hecho en el que profundiza en el siguiente apartado. Por ello, se ha optado por una validación a través de la mixicidad, pero para el Modelo 1, esta no se ha podido obtener debido a que G_I ha resultado nula.

4.7.7 Validación de los Modelos 2, 3 y 4

Para la validación de los resultados se han llevado a cabo dos test de convergencia. En primer lugar, se ha estudiado en profundidad la comparación entre modelos de malla basta y refinada, y en segundo lugar, un estudio menos profundo del efecto de una malla simétrica.

Debido a que los Modelos tienen una geometría muy similar entre ellos, se ha realizado un test de convergencia para el Modelo 2 y los resultados son extrapolables a otros modelos (3 y 4), debido a que las mallas utilizadas son muy similares.

4.7.7.1 Comparación entre modelos de malla inicial y refinada

En el estudio del Modelo 2, realmente no se ha partido de la malla descrita en el Apartado 3.2.2.2, si no que se han partido de modelos menos refinados. Tras realizar el test de convergencia de malla y comprobar que los resultados de ambos modelos son válidos, debido a que en el modelo refinado proporciona gráficamente una deformada de mayor continuidad, se han obtenido todos los resultados recogidos en los Apartados 4.2.1 y 4.2.2 para el modelo refinado.

El test de convergencia se ha llevado a cabo en el modelo con un ángulo α de 45°. Dado que la malla en su

tamaño de elemento y aspecto general es equivalente para todos los ángulos, con la validación del modelo de este ángulo se considera validado para todos los ángulos.

De esta forma, los dos modelos que se han manejado, que se comparan en la Figura 4.101 y Figura 4.102, son los siguientes:

- *Modelo inicial.* Tamaño de elemento mínimo (en la grieta) de $5E-4$ mm. Esto supone 40 veces más pequeño que el tamaño de la grieta. El número total de elementos es de 97.967. Se muestra en la Figura 4.101.
- *Modelo refinado.* Tamaño de elemento mínimo (en la grieta) de $5E-5$ mm. Esto supone 400 veces más pequeño que el tamaño de la grieta. El número total de elementos es de 197.450. Se muestra en la Figura 4.102.

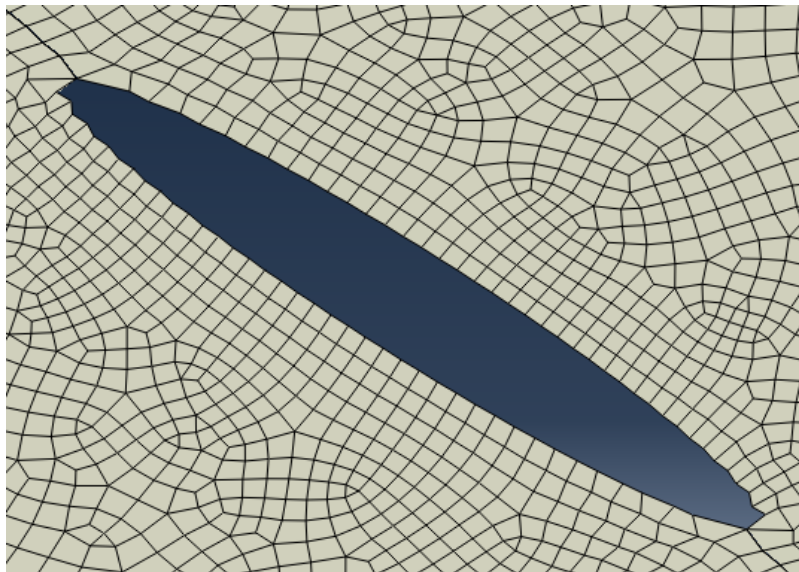


Figura 4.101. Test de convergencia de tamaño de malla. Modelo inicial

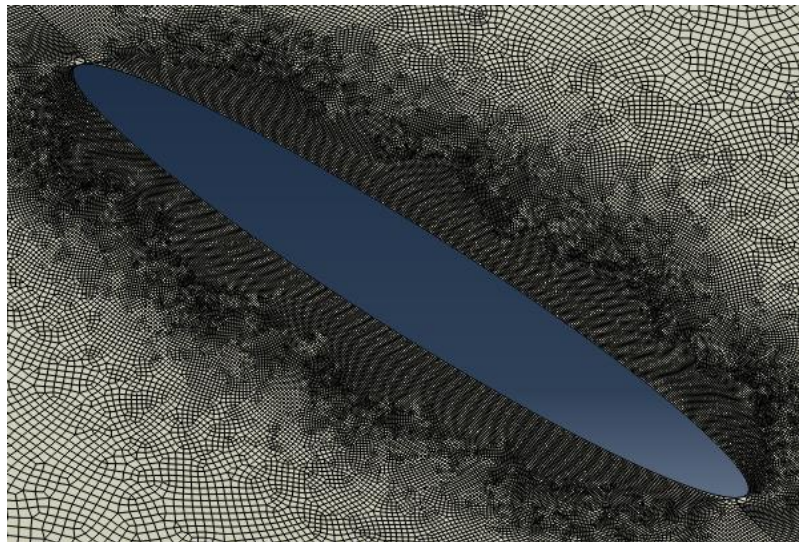


Figura 4.102. Test de convergencia de tamaño de malla. Modelo refinado

Se han comparado, en primer lugar, los resultados en desplazamientos y en tensiones. Además, se han comparado los resultados en la superficie esclava y maestra, en un intento de dilucidar la influencia de estas superficies en los resultados del VCCT, como se ahonda en el Apartado 4.2.3. Sin embargo, hay que destacar que esta comparación de resultados no forma parte del test de convergencia en sí mismo. El test de convergencia propiamente dicho se hace, tras mostrar estos resultados, a partir de la mixicidad del índice de liberación de energía.

4.7.7.1.1 Comparación de resultados en desplazamientos

Se han estudiado los resultados en desplazamientos en el nodo de la punta de la grieta y en el anterior (el perteneciente a los labios abiertos) ya que es el que usa en el cálculo de G según VCCT como se explica en el Apartado 2.2.2.

Se muestran los resultados para el modelo inicial en la Tabla 4.24, para el modelo refinado en la Tabla 4.25 y la comparación entre estos en la Tabla 4.26.

Tabla 4.24. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo no refinado

Modelo NO REFINADO									
Fondo de grieta izquierdo					Fondo de grieta derecho				
Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior			Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior		
Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	
U long.	-7,83420E-05	-7,83541E-05	-1,27079E-04	-2,46020E-06		7,84945E-05	7,84846E-05	2,39623E-05	1,27555E-04
U trans.	-1,77891E-03	-1,77789E-03	-1,77969E-03	-1,77765E-03		-1,62483E-03	-1,62483E-03	-1,62586E-03	-1,62433E-03

Tabla 4.25. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo refinado

Modelo REFINADO									
Fondo de grieta izquierdo					Fondo de grieta derecho				
Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior			Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior		
Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	
U long.	-7,91483E-05	-7,91704E-05	-9,56039E-05	-6,21693E-05		7,91523E-05	7,91351E-05	6,20757E-05	9,54900E-05
U trans.	-1,78056E-03	-1,78056E-03	-1,78117E-03	-1,78087E-03		-1,62337E-03	-1,62338E-03	-1,62275E-03	-1,62252E-03

Tabla 4.26. Test de convergencia de tamaño de malla de desplazamientos (mm) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Variación porcentual entre resultados de modelo basto y refinado

Variación porcentual									
Fondo de grieta izquierdo					Fondo de grieta derecho				
Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior			Nodo de la punta de la grieta		Nodo anterior		
Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	
U long.	1,0292%	1,0418%	24,7681%	24,0019%		0,8380%	0,8288%	15,0557%	25,1382%
U trans.	0,0928%	0,1501%	0,0832%	0,1811%		0,0899%	0,0892%	0,1913%	0,1114%

Hay que tener en cuenta que esta magnitud, los desplazamientos, son los que son verdaderamente útiles para realizar el test de convergencia de malla del modelo a un nivel global, ya que son las variables primarias del MEF.

Se observa que, en el nodo de la grieta, elemento común para ambos modelos, la diferencia entre los modelos es muy pequeña y se da por validado el modelo.

En cuanto al nodo anterior, se han obtenido los resultados buscando una mayor comprensión del criterio VCCT, pero no son comparables para un test de convergencia de malla ya que, al ser los elementos de diferente tamaño, representan puntos geométricos de la grieta diferentes y los desplazamientos deben ser diferentes también.

4.7.7.1.2 Comparación de resultados en tensiones

Se han estudiado los resultados en desplazamientos en el nodo de la punta de la grieta y en el posterior (el perteneciente al sólido en el que todavía no ha progresado la grieta).

Se muestran los resultados para el modelo inicial en la Tabla 4.27, para el modelo refinado en la Tabla 4.28 y la comparación entre estos en la Tabla 4.29.

Cabe destacar que estos resultados se muestran ya que son de interés para el cálculo de G mediante VCCT, sin embargo, no pueden considerarse como parte del test de convergencia ya que, como se detalla en el Apartado 2.3, cuando se refina la malla en el entorno de la punta de una grieta, los resultados en tensiones siempre se ven incrementados debido a la singularidad de tensiones que aparece teóricamente en este. De hecho, este hecho se observa claramente en las variaciones porcentuales, donde se ven incrementos de la tensión de hasta un 260%.

Tabla 4.27. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo no refinado

Modelo NO REFINADO									
Fondo de grieta izquierdo					Fondo de grieta derecho				
Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior			Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior		
Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	
σ long.	92,905700	412,706000	247,535000	315,454000		402,630000	95,179400	310,806000	257,865000
σ trans.	-77,743400	143,930000	-24,982600	94,566700		138,674000	-85,595100	93,710300	-26,518900

Tabla 4.28. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Resultados de modelo refinado

Modelo REFINADO									
Fondo de grieta izquierdo					Fondo de grieta derecho				
Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior			Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior		
Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	
σ long.	253,6460	1.290,1600	744,5860	961,0970		1.190,6300	241,9580	900,4710	758,4710
σ trans.	-261,9630	464,8460	-89,9623	281,0830		438,3500	-278,8160	302,9630	-91,1382

Tabla 4.29. Test de convergencia de tamaño de malla de tensiones (MPa) para Modelo 2 para ángulo α de 45°. Variación porcentual entre resultados de modelo refinado y basto

		Variación porcentual							
		Fondo de grieta izquierdo				Fondo de grieta derecho			
		Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior		Nodo de la punta de la grieta		Nodo posterior	
		Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra	Sup. Esclava	Sup. Maestra
σ	long.	173%	213%	201%	205%	196%	154%	190%	194%
σ	trans.	237%	223%	260%	197%	216%	226%	223%	244%

4.7.7.1.3 Comparación de resultados del índice de liberación de energía

Se han comparado los resultados del índice de liberación de energía en modo I y II, la total y la mixicidad (G_{II}/G_I) para el frente izquierdo de ambos modelos. Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 4.30.

Se observan diferencias significativas, aunque estas se deben a las variaciones, también significativas, que se observan en los desplazamientos y tensiones mostrados anteriormente y que se usan para calcular el índice de liberación de energía.

Por tanto, se concluye que el índice de liberación de energía calculada mediante la herramienta VCCT es una magnitud fuertemente dependiente de la malla y que hace que esta magnitud sea útil desde un punto de vista comparativo entre diferentes situaciones con mallas muy similares, pero que tenga un valor cuestionable como un valor absoluto. Por este motivo, se hace un estudio comparativo de la mixicidad y confirma que los resultados son convergentes.

Tabla 4.30. Test de convergencia de tamaño de malla de G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 2 para ángulo α de 45° en frente izquierdo

Modelo	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I
No refinado	8,033E-03	7,9720E-03	1,6005E-02	0,992406324
Refinado	9,222E-03	9,2810E-03	1,8503E-02	1,006397745
Variación porcentual	15,54%	16,42%	15,61%	1,41%

4.7.7.2 Comparación de modelos de malla asimétrica y simétrica

En la malla descrita en el Apartado 3.2.2.2 no existe simetría con respecto a la punta de la grieta si no que en la semilla de mallado introducida en los labios abiertos de la grieta el tamaño de elemento es constante, mientras que en la semilla de mallado introducida en la zona en la que no ha progresado la grieta todavía, el mallado es de tamaño creciente. Este test se lleva a cabo para validar si los resultados son similares en ambos modelos y si se aceptan, consecuentemente, los resultados.

El test de convergencia se ha llevado a cabo en el modelo con un ángulo α de 45°. Dado que la malla en su tamaño de elemento y aspecto general es equivalente para todos los ángulos, con la validación del modelo de este ángulo se considera validado para todos los ángulos.

De esta forma, los dos modelos que se han manejado son:

- *Modelo no simétrico respecto a la punta de la grieta.* El tamaño de elemento en el lado de los labios

abiertos de la grieta se mantiene constante mientras que el del lado del sólido en el que todavía no ha progresado la grieta es creciente.

- *Modelo simétrico respecto a la punta de la grieta.* El tamaño de elemento a ambos lados de la punta de la grieta se mantiene constante.

Igualmente que en el caso anterior, se han comparado los resultados de desplazamientos, tensiones, índices de liberación de energía y mixicidad. Debido a que, como se concluye anteriormente, la magnitud que debe converger es la mixicidad, únicamente se muestran estos últimos resultados por simplicidad.

4.7.7.2.1 Comparación de resultados del índice de liberación de energía

Se comparan los resultados de G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) en la Tabla 4.31. Se observa que los resultados son muy similares y se acepta el modelo de malla no simétrica, aunque de nuevo se hace énfasis en el hecho de que, aunque para este caso concreto el índice de liberación de energía converja, el resultado útil para validar el modelo es el de la mixicidad.

Tabla 4.31. Test de convergencia de simetría de malla de G_I , G_{II} , G_{total} y mixicidad (G_{II}/G_I) para Modelo 2 para ángulo α de 45° en frente izquierdo

Modelo	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	G_{total} (N/mm)	G_{II}/G_I
No simétrico	8,033E-03	7,9720E-03	1,6005E-02	0,99240632
Refinado	8,037E-03	7,981E-03	1,602E-02	0,99303223
Variación porcentual	0,04979%	0,11290%	0,08122%	0,06307%

4.7.8 Validación del Modelo 5

Para validar el Modelo se ha realizado un test de convergencia de malla disminuyendo el tamaño de los elementos. En este caso, no solo se busca validar que la malla es adecuada, sino también que el método de integración numérica elegido da resultados válidos. Se ha realizado para un espesor de la capa de 90° de 0,19 mm y un ángulo de 45°.

Para ello se han considerado dos modelos:

- *Modelo inicial:* tamaño de los elementos de 0,01343 mm (división de la diagonal en 20 elementos). Número total de elementos del modelo es de 13.279. Se muestra en la Figura 4.103.
- *Modelo refinado:* tamaño de los elementos de 0,00672 mm (división de la diagonal en 40 elementos). El número total de elementos del modelo es de 52.861. Se muestra en la Figura 4.104.

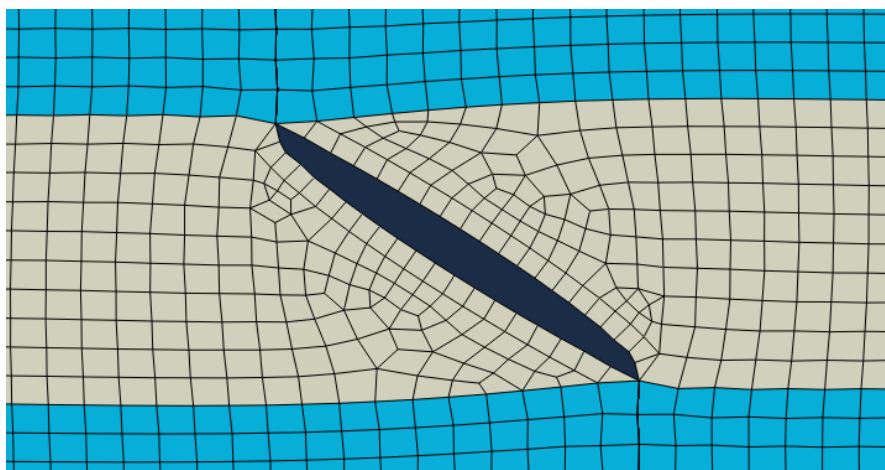


Figura 4.103. Malla del modelo inicial del test de convergencia de malla del Modelo 5

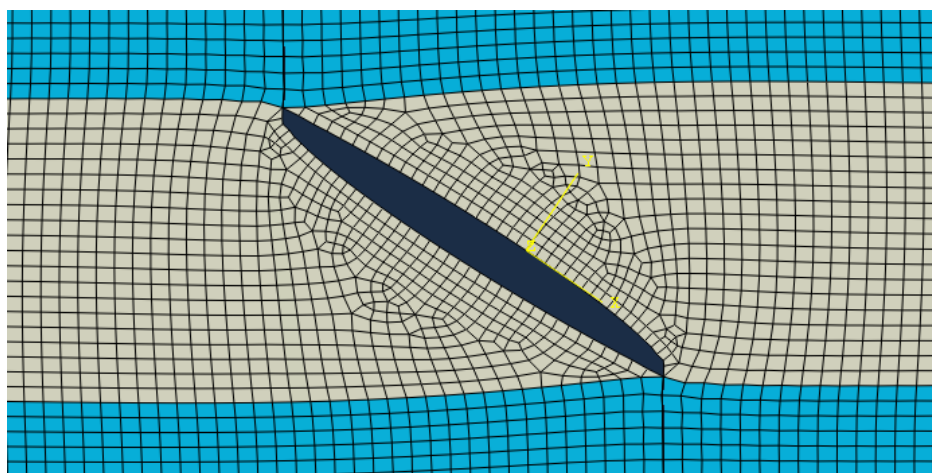


Figura 4.104. Malla del modelo refinado del test de convergencia de malla del Modelo 5

Los resultados de las diferentes componentes del trabajo liberado por daño explosivo por unidad de longitud de la grieta se muestran en la Tabla 4.32. Se observa que los resultados son suficientemente convergentes, por lo que queda validado tanto la malla como el método de integración numérica.

Tabla 4.32. Test de convergencia de malla del Modelo 5

Modelo	W tangencial (N/mm)	W normal (N/mm)	W total (N/mm)
Basto	0,075709003	0,067926641	0,143635644
Refinado	0,078024829	0,069126199	0,147151029
Variación porcentual	3,06%	1,77%	2,45%

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En el presente capítulo se presentan las conclusiones que se obtienen a partir de los resultados que se han presentado y en base a los objetivos del proyecto. Igualmente, se presenta una propuesta para la continuación y profundización del estudio del fallo no convencional.

5.1. Conclusiones

Tal y como se indica en el capítulo 1, el objetivo del presente trabajo consiste en tratar de explicar un fallo no convencional y que no se puede explicar a priori observado experimentalmente. Este consiste en grietas transversales a la capa de 90 con una orientación de 45 grados, cuando lo esperable es que hubieran aparecido a 90 grados. Además, aparecen importantes delaminaciones entre las capas.

Para intentar explicarlo, se han simulado diferentes modelos para intentar dilucidar aspectos concretos de este comportamiento. Se establecen, sucesivamente, las conclusiones extraídas de cada modelo, así como otras transversales al proyecto.

5.1.1 Modelo 1 y efecto de la temperatura de curado

Las conclusiones del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.1 y cuyos resultados se presentan en el Apartado 4.1 y 4.7.1 se describen a continuación.

5.1.1.1 Modelo 1 sin temperatura de curado

En primer lugar, se ha realizado un modelo que simula la grieta de delaminación entre la capa de 0 grados y de 90 grados observada experimentalmente. Se ha considerado, por tanto, la posibilidad de que dicha grieta de delaminación se haya producido antes de la grieta transversal a 45 grados. En primer lugar se ha simulado el ensayo como una condición de contorno en desplazamientos, debido al control en desplazamientos del ensayo experimental.

Condición de contorno de desplazamiento

Del modelado del ensayo como una condición de contorno en desplazamientos (Apartado 4.1.1) se concluye lo siguiente:

- Los resultados de del índice de liberación de energía (Tabla 4.1) son muy cercanos a cero en sus dos componentes en la punta de la grieta de delaminación. Este resultado es el esperado, ya que la grieta bajo estas circunstancias no trabaja, y por tanto no tiende a crecer.
- El mapa de la tensión circunferencial (Figura 4.3) muestra que la dirección de la tensión circunferencial máxima es perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta, por lo que no explica la generación del daño a 45°. Además, se observa que la dirección y el valor de esta tensión circunferencial máxima se mantiene constante con la longitud de la grieta de delaminación (Tabla 4.2), por lo que se concluye que no existe un aumento de la tendencia a la generación del daño transversal con el crecimiento de la

grieta de delaminación (que, como se acaba de ver, además, no presenta una tendencia a crecer). En cualquier caso, la tensión obtenida está por encima de la resistencia transversal Y_T , por lo que es coherente con el hecho de que aparezca el fallo en el punto del ensayo que se modela.

Por tanto, de este modelado no se obtiene una explicación ni en su valor ni en su dirección del origen del daño transversal a partir de la grieta de delaminación observado experimentalmente. Por los valores tan poco significativos de los resultados, y de cara a una mejor comprensión de la herramienta VCCT, se ha optado por modelar el ensayo como una condición de contorno en tensiones, sabiendo que esto se aleja de la realidad.

Condición de contorno en tensiones

Del modelado del ensayo como una condición de contorno en tensión (Apartado 4.1.2) se concluye lo siguiente:

- Los resultados del índice de liberación de energía (Tabla 4.3) son más significativos en este caso para el modo II (en el modo I siguen siendo próximos a 0) en la punta de la grieta de delaminación, por lo que pueden explicar el crecimiento de dicha grieta en modo II. Además, el valor de G_{II} aumenta ligeramente con la longitud de la grieta (Figura 4.5), por lo que se concluye que, bajo las circunstancias modeladas, el crecimiento de esta grieta puede ser inestable.
- El mapa de la tensión circunferencial (Figura 4.6) muestra que la dirección de la tensión circunferencial máxima es perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta para grietas pequeñas, por lo que no explica la generación del daño a 45°. Sin embargo, conforme la grieta de delaminación crece, la dirección del máximo se va orientando hacia 45 grados, aunque esta desviación afecta a una distancia muy pequeña desde el fondo de grieta donde la hipótesis mesomecánica del modelo dejaría de ser válida por lo que la representatividad de este resultado es cuestionable (se detalla más en [7]). Además, se observa que el valor de esta tensión circunferencial máxima (Tabla 4.4 y Figura 4.8) aumenta con la longitud de la grieta de delaminación, por lo que se concluye que existe un aumento de la tendencia a la generación del daño transversal con el crecimiento de la grieta de delaminación (que como se acaba de ver, además es inestable).

Por tanto, de este modelo no se obtiene un indicio claro de la explicación de la aparición del daño no convencional a partir de la grieta de delaminación. El origen del daño no convencional a partir de la grieta de delaminación no es el objeto fundamental del trabajo, que se ha abordado en otros ([7] y [8]), por lo que se pasa a los modelos de grieta central que se describen a continuación.

5.1.1.2 Modelo 1 con temperatura de curado

Las conclusiones del efecto de la temperatura de curado en el modelo, que se muestra en el Apartado 4.7.1, comparándolo con el modelo sin esta temperatura es el siguiente:

- Se observa que la temperatura de curado aumenta significativamente la tensión circunferencial máxima en la capa de 90°, tanto con condición de contorno en desplazamientos (Figura 4.62) como en tensiones (Figura 4.63). Por ello, aumenta la tendencia a la formación de un daño transversal a partir de la grieta de delaminación con respecto al caso sin temperatura, quedando está aún más por encima de la resistencia transversal Y_T . Sin embargo, no se ha encontrado un cambio en su comportamiento cualitativo con la longitud de delaminación y el mapa de tensiones circunferenciales (Figura 4.59 y Figura 4.60) no cambian con respecto al modelo sin temperatura. Por ello, las conclusiones obtenidas del modelo sin temperatura no se ven modificadas.

5.1.2 Modelo 2 y efecto de la temperatura de curado

Tras esta primera aproximación, ahora se pasa al objeto fundamental del trabajo y se ha modelado la posibilidad de que en primer lugar haya aparecido una grieta en la capa de 90 que haya dado lugar al daño transversal. y trata de explicar, partiendo de esta situación, la orientación de la grieta transversal no convencional a 45 grados observada experimentalmente.

Las conclusiones del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.2 y cuyos resultados se presentan en el Apartado 4.2 y 4.7.2 se describen a continuación.

5.1.2.1 Modelo 2 sin temperatura de curado

Tanto en un frente como en el otro (Figura 4.22 y Figura 4.24) se observa que existe un máximo del índice de liberación de energía en modo I a 90 grados y en modo II a 45 grados. En cuanto a la suma de ambas, el máximo aparece aproximadamente a 75 grados para el frente izquierdo, y a 90 grados para el frente derecho.

Se concluye, por tanto, que a 45 grados se produce la mayor tendencia de la grieta a crecer en modo II, lo que podría explicar la dirección de la grieta transversal observada experimentalmente. Sin embargo, hay que tomar esta conclusión con mucha cautela, ya que, como se describe en el Apartado 2.2.1, los criterios de crecimiento de grieta bajo modo mixto (combinación de modo I y II en este caso), que se da en el caso de estudio, no están claramente definidos ni hay consenso sobre estos actualmente, por lo que sería necesario en cualquier caso aplicar un criterio de rotura fiable asociado al crecimiento en la capa de 90° que contemplase la mixticidad. En general podría decirse que este hecho sería relevante en el caso de que $G_{II \text{ crítica}}$ fuera mucho menor que $G_{I \text{ crítica}}$ para este material.

5.1.2.2 Modelo 2 con temperatura de curado

Las conclusiones del efecto de la temperatura de curado en el modelo, que se muestra en el Apartado 4.7.2, se obtienen de la comparación de este con el modelo sin esta temperatura (Figura 4.73). Se observa que, al incluir el efecto de la temperatura, se observa un aumento del índice de liberación de energía para todos los casos (modo I, modo II y suma de ambos) y para ambos frentes de grieta, y, por tanto, un aumento de la tendencia de la grieta a progresar. Sin embargo, el comportamiento cualitativo no se ve modificado, por lo que las conclusiones obtenidas anteriormente no cambian.

5.1.3 Modelo 3 y efecto de la temperatura de curado

Tras esta conclusión en la que no se han encontrado indicios evidentes del motivo del ángulo de la grieta, se busca estudiar si, partiendo de que exista esa grieta, tuviera tendencia o no a progresar hasta convertirse en el daño transversal a la capa de 90 observado.

Las conclusiones del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.3 y cuyos resultados se presentan en el Apartado 0 y 4.7.3 se describen a continuación.

5.1.3.1 Modelo 3 sin temperatura de curado

En el frente de grieta, (Figura 4.30) se observa que el índice de liberación de energía en modo I, modo II y la suma de ambas, es creciente con la longitud de grieta, y que la mixticidad se mantiene prácticamente constante.

Por tanto, se concluye, a expensas de un criterio de crecimiento, que el crecimiento de la grieta es inestable. Si, por algún motivo apareciese una grieta central de este tipo, parece que crecería hasta atravesar transversalmente la capa de 90 grados, siendo este un posible origen del daño observado experimentalmente, teniendo en cuenta las hipótesis planteadas.

5.1.3.2 Modelo 3 con temperatura de curado

Las conclusiones del efecto de la temperatura de curado en el modelo, que se muestra en el Apartado 4.7.3, se obtienen de la comparación de este con el modelo sin esta temperatura (Figura 4.79). Se observa que, al incluir el efecto de la temperatura, se observa un aumento del índice de liberación de energía para todos los casos (modo I, modo II y suma de ambos) y, por tanto, un aumento de la tendencia de la grieta a progresar con respecto al modelo sin temperatura. Sin embargo, el comportamiento cualitativo no se ve modificado, por lo que las conclusiones obtenidas en anteriormente no cambian.

5.1.4 Modelo 4 y efecto de la temperatura de curado

Después se ha tratado de entender por qué aparece el fallo no convencional únicamente para el laminado estudiado, por lo que se ha estudiado el efecto del espesor de la capa de 90 grados, en presencia de la grieta, en la tendencia a propagarse de esta.

Las conclusiones del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.4 y cuyos resultados se

presentan en el Apartado 4.4 y 4.7.4 se describen a continuación.

5.1.4.1 Modelo 4 sin temperatura de curado

Se observa que tanto el índice de liberación de energía para los modos I y II (Figura 4.36), como la suma de estas (Figura 4.37) presenta un máximo para el espesor de 0,19 mm (espesor para el que se ha observado experimentalmente el fallo no convencional) en el frente de grieta, aunque este no es muy significativo en términos absolutos. Por tanto, parece que existe una ligera mayor tendencia a que la grieta progrese para este espesor y puede constituir una explicación, a expensas de un criterio de crecimiento, y con la premisa de la aparición de la grieta central previa, de por qué aparece el daño en el laminado $[0_2,90,0_2]$ y no para otros espesores.

5.1.4.2 Modelo 4 con temperatura de curado

Las conclusiones del efecto de la temperatura de curado en el modelo, que se muestra en el Apartado 4.7.4, se obtienen de la comparación de este con el modelo sin esta temperatura (Figura 4.83). Se observa que, al incluir el efecto de la temperatura, se observa un aumento del índice de liberación de energía para todos los casos (modo I y modo II) y para ambos frentes de grieta, y, por tanto, un aumento de la tendencia de la grieta a progresar con respecto al caso sin temperatura. Sin embargo, el comportamiento cualitativo no se ve modificado, por lo que las conclusiones obtenidas en anteriormente no cambian.

5.1.5 Modelo 5 y efecto de la temperatura de curado

Tras este estudio, se ha cambiado el enfoque y con este modelo se ha buscado analizar la tendencia a la aparición de la grieta como un daño explosivo. Para ello se ha estudiado el trabajo total liberado por unidad de longitud en sus componentes tangencial y normal a la grieta, y la suma de estas. Primeramente, se ha buscado entender por qué aparece el daño a 45 grados, para lo que se ha estudiado el efecto de la variación del ángulo del daño transversal con la dirección longitudinal de la probeta. En segundo lugar, se ha buscado entender por qué aparece el fallo en el laminado $[0_2,90,0_2]$ y no para otros, por lo que se ha estudiado el efecto del espesor.

Las conclusiones del modelo cuya geometría y malla se describe en el Apartado 3.2.5 y cuyos resultados se presentan en el Apartado 4.5 y 4.7.5 se describen a continuación.

5.1.5.1 Modelo 5 sin temperatura de curado

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- En el estudio del efecto del espesor en el trabajo total liberado por unidad de longitud, en la generación de un daño explosivo transversal a la capa de 90 grados, se observa que, para todos los ángulos de grieta (Figura 4.48, Figura 4.49, Figura 4.50 y Figura 4.51), el trabajo liberado en modo I (componente normal), modo II (componente tangencial) y la suma de ambas, tiene una evolución lineal y creciente con el espesor. Por tanto, cuanto mayor sea el espesor de la capa de 90 grados hay un mayor trabajo liberado y, consecuentemente, una mayor tendencia a la aparición del daño. No se explica, por tanto, con este tipo de daño, la aparición del daño no convencional para el espesor de 0,19 mm, observado experimentalmente.
- En el estudio del efecto del ángulo de la grieta en el trabajo total liberado por unidad de longitud, en la generación de un daño explosivo transversal a la capa de 90 grados, se observa que, para todos los espesores de grieta (Figura 4.52, Figura 4.53 y Figura 4.54), los siguientes comportamientos:
 - El trabajo liberado en modo I (componente normal) aumenta cuanto aumenta el ángulo alcanzando un máximo para un ángulo de 90 grados (perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta)
 - El trabajo liberado en modo II (componente tangencial) disminuye cuanto aumenta el ángulo haciéndose nulo para un ángulo de 90 grados (perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta)
 - La suma de ambas componentes del trabajo liberado presenta un mínimo para el ángulo de 45

grados y un máximo para 90 grados

Por tanto, el trabajo liberado en modo I y modo II da lugar a unos resultados esperables y que no aportan información. El trabajo total liberado presenta un mínimo para 45 grados, por lo que no se puede explicar la aparición del daño con esta dirección no convencional.

También se ha hecho un estudio del trabajo liberado en términos absolutos, sin dividir por la longitud de la grieta, pero las conclusiones obtenidas no varían sustancialmente.

5.1.5.2 Modelo 5 con temperatura de curado

Las conclusiones del efecto de la temperatura de curado en el modelo, que se muestra en el Apartado 4.7.5, se obtienen de la comparación de este con el modelo sin esta temperatura (Figura 4.97 y Figura 4.100). Se observa que, al incluir el efecto de la temperatura, se produce un aumento del trabajo total liberado por unidad de longitud, para todos los casos (modo I normal, modo II tangencial y la suma de ambos), y, por tanto, una aumento de la tendencia a producirse el daño explosivo. Sin embargo, el comportamiento cualitativo no se ve modificado, por lo que las conclusiones obtenidas en anteriormente no cambian.

5.1.6 Conclusiones sobre el uso de la herramienta VCCT

5.1.6.1 Conclusiones sobre la herramienta VCCT y su definición a partir de superficie esclava. Modelos 2, 3 y 4

Estas conclusiones se obtienen del uso de esta herramienta en el Modelo 2, 3 y 4. Se describen haciendo referencia al Modelo 2, aunque para el Modelo 3 y 4, los razonamientos y conclusiones son equivalentes.

Como se observa en la Figura 4.14 y Figura 4.15, en la deformada de detalle de la grieta, se detecta que la punta de la grieta no coincide con el frente definido mediante la interacción de contacto de VCCT por la que se había modelado que debe progresar la grieta.

Además, como se muestra en la Figura 4.18 y Figura 4.21, esta posición no simétrica del frente definido como VCCT para la progresión de la grieta, hace que aparezca una discontinuidad de las tensiones a un lado y otro del frente del VCCT.

El VCCT en Abaqus se define mediante la interacción de contacto, que se hace definiendo una de las dos superficies involucradas como esclava, y la otra como maestra. El VCCT, en vista de los resultados, queda referido a la superficie esclava y parece que únicamente calcula el índice de liberación de energía con la tensión del nodo del primer nodo del elemento de esta superficie.

Por todo esto, el resultado del índice de liberación de energía que se obtiene en un frente y otro de la grieta son diferentes (Figura 4.26), ya que la superficie esclava es común para ambos frentes, pero la distribución de las tensiones es opuesta para una superficie y otra. Además, a modo de comprobación, se ha estudiado el efecto de invertir dicha definición de superficie esclava y maestra, obteniéndose exactamente los resultados opuestos. Los que se obtuvieron en el frente derecho, ahora se obtienen en el izquierdo y viceversa.

Cabe hacer especial énfasis de que se ha planteado que el motivo de esta no coincidencia sea la no simetría de la malla respecto de la grieta, sin embargo, la semilla de mallado en los dos *Part* se ha hecho exactamente simétrica, por lo que, si existe alguna pequeña asimetría, esta se puede deber al mallado *Free*, aunque en principio cabría pensar que la malla será perfectamente simétrica o la asimetría es muy pequeña.

Debido a estas observaciones, parece que la definición de VCCT es dependiente de la definición de superficie esclava a un lado o a otro, y hace que no se haya hecho especial énfasis en el cálculo que realiza del índice de liberación de energía en valores absolutos, si no que se ha usado para comparar unas situaciones con otras.

5.1.6.2 Conclusiones sobre la validez de los resultados del índice de liberación de energía calculada con la herramienta VCCT. Test de convergencia de malla

Las conclusiones se obtienen del test de convergencia de malla de los Modelos 2, 3 y 4 en el Apartado 4.7.6.

Es destacable el hecho de que, la herramienta VCCT calcula el índice de liberación de energía a partir de un único nodo de la punta de la grieta. Por ello, al refinar la malla, los valores del desplazamiento se ven modificados

porque se modifica la distancia del punto considerado al fondo de la grieta, al variar el tamaño del elemento. En cuanto a los valores de las tensiones, estos se ven incrementados en el nodo del fondo de la grieta al refinar la malla, al existir un concentrador de tensiones. Por ello, debido a la no convergencia de las magnitudes implicadas en el cálculo del índice liberación de energía, esta última magnitud tampoco converge inevitablemente con el refinado de la malla (Tabla 4.30).

Por esto se concluye que la herramienta de VCCT para el cálculo del índice de liberación de energía es fuertemente dependiente de la malla en el entorno de la punta de la grieta y no se ha hecho especial énfasis en los valores obtenidos en términos absolutos. En consecuencia, como método de evaluación de convergencia de los resultados, se ha hecho uso de la mixicidad (G_{II}/G_I).

Por ello, se ha tratado de hacer las mallas muy similares entre unos modelos y otros para poder hacer predicciones en términos relativos y de comparación entre unas situaciones y otras.

5.2. Desarrollos futuros

A partir del presente trabajo y para profundizar en el estudio del caso descrito, dado que no se ha cumplido el objetivo fundamental de explicar por qué se produce este fallo no convencional, se proponen diferentes alternativas:

1. Nuevos estudios experimentales, con más ensayos sobre este laminado, o ensayos con nuevas secuencias de apilado o espesores, tratando de detectar las fases en las que se desarrolla este fallo no convencional
2. Explorar otros orígenes del daño. En el presente trabajo, fundamentalmente se ha partido de la posibilidad de que el origen del daño provenga de la capa de 90. Se propone estudiar en mayor profundidad la posibilidad de que el origen del daño sea la delaminación, teniendo en cuenta las conclusiones que se han obtenido en [7] y [8].
3. Explorar otro tipo de modelos. Se propone descender al modelo micromecánico en el que se tenga en cuenta la interacción local entre las fibras y la matriz. Sin embargo, se busca mantener el modelado del efecto que producen el conjunto de las láminas y la interacción entre ellas, propio del modelo mesomecánico. En consecuencia, se propone un modelo mixto multiescala (micromecánico y mesomecánico). Se trata de una celda en la que se modelará el enfoque micromecánico, perteneciente a la capa de 90 grados y junto a la interfase entre láminas. En esta celda se modelará una o varias fibras y la matriz. En el resto del modelo se mantendrá el enfoque mesomecánico, con los materiales de las láminas como equivalentes homogéneos ortótropos. A partir de este modelo se podrá simular la grieta de delaminación y estudiar su posible internamiento en la capa de 90 grados con diferentes posiciones y orientaciones.

REFERENCIAS

- [1] C. J. M. J. B. A. París F., *Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos*, Sevilla: Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla..
- [2] Y. S. Y. A. C. B. Sikarwar S., «Nanocomposite Material For Packaging of Electronic Goods,» *ResearchGate*, 2014.
- [3] «Oxyblack,» [En línea]. Available: <https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites/laminates-sandwiches>. [Último acceso: 09 Julio 2020].
- [4] G. S. M. J. O. D. Bettebghor D., «Bilevel optimization of large composite structures based on lamination parameters and post-optimal sensitivities.,» *ResearchGate*, vol. Part 1: Theoretical aspects, 2018.
- [5] V. M. C. E. París F., «The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure,» *ScienceDirect*, 2020.
- [6] P. M.J., «Efecto a escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados [0,90n]s,» *Universidad de Sevilla*, 2019.
- [7] C. A. I. Dávila, *Estudio de fallo no convencional en laminados [0 90n]s: Aparición de grietas transversales en la lámina de 90 a partir de la Mecánica de la Fractura de Grietas de Interfase*, Sevilla: Escuela Superior Técnica de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2021.
- [8] E. C. Durán, *Estudio de fallo no convencional en laminados [0m;90n]S: caracterización del fallo a partir del efecto de borde*, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2021.
- [9] R. J., *El Método de los Elementos Finitos*, Sevilla: Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla..
- [10] «Dassault Systems. Abaqus CAE,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>. [Último acceso: 10 Julio 2020].
- [11] P. F. y V. Mantic, *Mecánica de la Fractura*, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2017.
- [12] «Wikipedia - Mecánica de la Fractura,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_la_fractura. [Último acceso: 30 08 2021].
- [13] G. R. Irwin, *Analysis of stresses and strain near the end of a crack transversing a plate*, *J Appl Mech*, 1957.
- [14] «Abaqus 6.14 Documentation,» *DS Simulia*.

