

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Estudio de fallo no convencional en laminados $[0\ 90_n]_s$:
Aparición de grietas transversales en la lámina de 90 a
partir de la Mecánica de la Fractura de Grietas de
Interfase.

Autor: Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutor: Elena Correa Montoto

Federico Paris Carballo

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**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**

Autor:

Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutor:

Elena Correa Montoto

Federico Paris Carballo

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: 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

Autor: Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutor: Elena Correa Montoto
Federico Paris 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 familia

A mis amigos

Agradecimientos

A mis padres y a mis hermanos por apoyarme con cada una de las decisiones tomadas y ayudarme incluso cuando no sabía que lo necesitaba.

A Elena por hacerme aprender con cada conversación, por todo lo que me ha enseñado durante la realización de este trabajo y por su disponibilidad, paciencia y dedicación. A Federico por su interés, ayuda y dejarme aprender escuchándolo. A Alejandro Estefani por enseñarme el manejo del programa y por resolverme las dudas planteadas con toda la paciencia del mundo.

A Marta y a Carmen por escucharme, aguantarme y estar siempre dispuestas a ayudar. Al resto de mis amigas por el apoyo recibido y por obligarme a salir de la rutina de vez en cuando.

A Manu por hacerme creer en mí misma, apoyarme incondicionalmente y soportarme cuando ni yo lo hacía.

A todos, simplemente gracias.

Carmen A. Izquierdo Dávila

2021



Resumen

El objetivo que se persigue con este trabajo es encontrar la justificación de la aparición de un daño no convencional en un determinado tipo de laminado. Experimentalmente se observó que sometiendo a este laminado a tracción aparecía una grieta que se internaba en la capa de 90 con una orientación de 45°, cuando lo esperable era que la grieta creciera en dirección perpendicular a la de la aplicación de la carga.

Para perseguir el objetivo ya mencionado, se han implementado una serie de modelos de elementos finitos en el programa ABAQUS.

En todos los estudios se parte de la idea de que en el laminado existe una delaminación y desde su fondo crece la grieta orientada a 45° con respecto a la interfase. Se plantean diferentes modelos y se analizan los resultados en busca de algún indicio de que la orientación más probable de crecimiento de grieta sea a 45°. El análisis de resultados se basa principalmente en el Criterio de Máxima Tensión Circunferencial y en la comparación de índices de liberación de energía.

Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Gráficos	xxi
Índice de Ecuaciones	xxiii
1 Introducción	1
1.1 Contexto: Materiales compuestos	1
1.2 Antecedentes y motivación	2
1.3 Objetivo	2
2 Herramientas y Métodos	5
2.1 Mecánica de la Fractura	5
2.2 Modelo de elementos finitos y ABAQUS	5
2.2.1 VCCT ('Virtual Crack Closure Technique')	6
2.3 Materiales	7
3 Modelos	9
3.1 Delaminación de diferentes longitudes	9
3.1.1 Módulo Part	10
3.1.2 Módulo Property	11
3.1.3 Módulo Assembly	12
3.1.4 Módulo Mesh	13
3.1.5 Módulo Step	14
3.1.6 Módulo Interaction	14
3.1.7 Módulo Load	18
3.1.8 Módulo Job	19
3.2 Grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones a partir de una delaminación	19
3.2.1 Módulo Part	20
3.2.2 Módulo Mesh	21
3.2.3 Módulo Step	23
3.2.4 Módulo Interaction	24
3.2.5 Módulo Load	25
3.3 Grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones	25
3.3.1 Módulo Interaction	26
3.4 Dos delaminaciones	28
3.4.1 Módulo Part	28
3.4.2 Módulo Mesh	29
3.4.3 Módulo Interaction	32
4 Resultados	35
4.1 Modelo con delaminaciones de diferentes tamaños	35
4.2 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones desde el fondo de una delaminación	44
4.3 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones	50

4.4	<i>Modelo con dos delaminaciones</i>	54
4.5	<i>Efecto de la temperatura</i>	56
4.5.1	Modelo con delaminación de 2.1 mm	56
4.5.2	Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones desde el fondo de una delaminación	57
4.5.3	Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones	63
4.5.4	Modelo con dos delaminaciones	64
5	Conclusiones y Desarrollos futuros	67
	Referencias	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas del laminado	8
Tabla 2-2. Propiedades térmicas del laminado	8
Tabla 4-1. Resultados para el modelo con delaminación y condición de contorno en desplazamiento	44
Tabla 4-2. Resultados para el modelo con delaminación y condición de contorno en tensiones	44
Tabla 4-3. Desplazamientos y tensiones de interés para las diferentes orientaciones de grieta en coordenadas locales	48
Tabla 4-4. Desplazamientos y tensiones de interés para las diferentes orientaciones de grieta en coordenadas locales con decremento térmico	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Morfología y componentes de un material compuesto	1
Figura 1-2. Micrografía en la que se observa la grieta a 45° que aparece en la capa de 90	2
Figura 2-1. Representación gráfica de las variables que usa el criterio de fractura	6
Figura 2-2. Esquema del laminado	8
Figura 3-1. Esquema general con las dimensiones de los diferentes modelos	9
Figura 3-2. Esquema que representa los modelos con delaminación	10
Figura 3-3. Parte superior de los modelos con delaminación	10
Figura 3-4. Parte inferior de los modelos con delaminación	10
Figura 3-5. Definición del material de la capa de 0 dentro de ABAQUS	11
Figura 3-6. Definición del material de la capa de 90 dentro de ABAQUS	12
Figura 3-7. Representación de los materiales asignados a cada región del modelo	12
Figura 3-8. Imagen de la malla para el modelo con delaminación	13
Figura 3-9. Zoom de la malla acercando la imagen en el fondo de la delaminación (punto rojo)	14
Figura 3-10. Zoom de la malla en el fondo de la delaminación (punto rojo)	14
Figura 3-11. Esquema del modelo con la representación de los diferentes tipos de superficies que aparecen en la interfase superior	15
Figura 3-12. Parte superior del modelo con superficie maestra del pegado marcada	15
Figura 3-13. Parte inferior del modelo con superficie esclava del pegado marcada	15
Figura 3-14. Definición del criterio de fractura dentro de ABAQUS	16
Figura 3-15. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada	16
Figura 3-16. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada	17
Figura 3-17. Parte inferior del modelo con la superficie por la que puede crecer la grieta marcada (bonding)	17
Figura 3-18. Definición del contacto dentro de ABAQUS	17
Figura 3-19. Representaciones de los apoyos usados para restringir los movimientos como sólido rígido del modelo	18
Figura 3-20. Representación de la aplicación de la condición de contorno en desplazamiento	19
Figura 3-21. Representación de la aplicación de la condición de contorno en tensiones	19
Figura 3-22. Esquema que representa los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de 90	20
Figura 3-23. Parte superior del modelo con $\alpha = 45^\circ$	20
Figura 3-24. Parte inferior del modelo con $\alpha = 45^\circ$	21
Figura 3-25. Asignación del tipo de mallado a la parte superior del modelo con $\alpha = 45^\circ$	21
Figura 3-26. Asignación del tipo de mallado a la parte inferior del modelo con $\alpha = 45^\circ$	21
Figura 3-27. Fondo de la grieta que se interna en la capa de 90 (punto rojo)	22

Figura 3-28. Imagen de la malla para el modelo con $\alpha = 45^\circ$	22
Figura 3-29. Zoom de malla acercándose a la zona de interés (fondo de la grieta señalado con un punto rojo)	23
Figura 3-30. Zoom de la malla en la zona de interés (fondo de la grieta señalado con un punto rojo)	23
Figura 3-31. Esquema del modelo con la representación de los diferentes tipos de interacciones	24
Figura 3-32. Parte superior del modelo con la superficie maestra del pegado marcada	24
Figura 3-33. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del pegado marcada	24
Figura 3-34. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada	25
Figura 3-35. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada	25
Figura 3-36. Parte inferior del modelo con la superficie por la que puede crecer la grieta marcada (bonding)	25
Figura 3-37. Esquema del modelo sin delaminación con la representación de los diferentes tipos de interacciones	26
Figura 3-38. Parte superior del modelo con la superficie maestra del pegado marcada	26
Figura 3-39. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del pegado marcada	27
Figura 3-40. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada	27
Figura 3-41. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada	27
Figura 3-42. Parte inferior del modelo con la superficie por la que la grieta puede crecer marcada (bonding)	28
Figura 3-43. Esquema del modelo con dos delaminaciones	28
Figura 3-44. Parte superior del modelo con dos delaminaciones	29
Figura 3-45. Parte central del modelo con dos delaminaciones	29
Figura 3-46. Parte inferior del modelo con dos delaminaciones	29
Figura 3-47. Asignación del tipo de mallado a la parte superior del modelo con dos delaminaciones	29
Figura 3-48. Asignación del tipo de mallado a la parte central del modelo con dos delaminaciones	30
Figura 3-49. Asignación del tipo de mallado a la parte inferior del modelo con dos delaminaciones	30
Figura 3-50. Imagen del modelo completo con los fondos de las dos delaminaciones marcados con puntos rojos	30
Figura 3-51. Visión completa de la malla del modelo con dos delaminaciones	30
Figura 3-52. Zoom de la malla acercándose a la zona de interés (los dos fondos marcados con puntos rojos)	31
Figura 3-53. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo)	31
Figura 3-54. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo)	32
Figura 3-55. Esquema del modelo con dos delaminaciones con representación de los diferentes tipos de interacciones	32
Figura 3-56. Parte superior del modelo con la superficie maestra del primer pegado marcada	33
Figura 3-57. Parte central del modelo con la superficie esclava del primer pegado marcada	33
Figura 3-58. Parte central del modelo con la superficie esclava del segundo pegado marcada	33
Figura 3-59. Parte inferior del modelo con la superficie maestra del segundo pegado marcada	33

Figura 3-60. Parte superior del modelo con la superficie maestra del primer contacto marcada	33
Figura 3-61. Parte central del modelo con la superficie esclava del primer contacto marcada	33
Figura 3-62. Parte central del modelo con la superficie por la cual la delaminación puede crecer marcada (bonding)	33
Figura 3-63. Parte central del modelo con la superficie esclava del segundo contacto marcada	34
Figura 3-64. Parte inferior del modelo con la superficie maestra del segundo contacto marcada	34
Figura 3-65. Parte central del modelo con la superficie por la cual la delaminación puede crecer marcada (bonding)	34
Figura 4-1. Esquema de la delaminación y la grieta de 90 en el que se define la tensión circunferencial	35
Figura 4-2. Mapa de tensiones circunferenciales para la grieta de 0.02 mm y condición de contorno en desplazamiento	36
Figura 4-3. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 0.02 mm y condición de contorno en tensiones	36
Figura 4-4. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm y condición de contorno en desplazamiento	36
Figura 4-5. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm y condición de contorno en tensiones	37
Figura 4-6. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.875 mm y condición de contorno en desplazamiento	37
Figura 4-7. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.875 mm y condición de contorno en tensiones	37
Figura 4-8. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm y condición de contorno en desplazamiento	38
Figura 4-9. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm y condición de contorno en tensiones	38
Figura 4-10. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.4 mm y condición de contorno en desplazamiento	38
Figura 4-11. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.4 mm y condición de contorno en tensiones	39
Figura 4-12. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.5 mm y condición de contorno en desplazamiento	39
Figura 4-13. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.5 mm y condición de contorno en tensiones	39
Figura 4-14. Deformada del modelo con delaminación de 2.1 mm aplicando la condición de contorno en desplazamiento	40
Figura 4-15. Deformada del modelo con delaminación de 2.1 mm aplicando la condición de contorno en tensiones	40
Figura 4-16. Deformada del modelo con delaminación de 2.5 mm aplicando la condición de contorno en desplazamiento	40
Figura 4-17. Deformada del modelo con delaminación de 2.5 mm aplicando la condición de contorno en tensiones	41
Figura 4-18. Zoom en la zona de interés del mapa de tensiones circunferenciales para la grieta de 2.1 mm y condición de contorno en tensiones (fondo de la delaminación marcado)	41

Figura 4-19. Representación de los nodos usados para el estudio aproximado con $r = 4E-4$ mm	42
Figura 4-20. Representación de los nodos usados para el estudio aproximado con $r = 6E-4$ mm	42
Figura 4-21. Definición gráfica de los puntos 1, 2 y 3 con respecto al fondo de grieta (punto negro)	48
Figura 4-22. Definición del sistema de referencia local para la grieta	48
Figura 4-23. Esquema que siguen los modelos con grieta en la capa de 90, pero sin delaminación	50
Figura 4-24. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación superior	54
Figura 4-25. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo)	55
Figura 4-26. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación inferior	55
Figura 4-27. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo)	55
Figura 4-28. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm en el caso con decremento térmico	57
Figura 4-29. Representación de las deformaciones longitudinales en la deformada y en la indeformada para el caso sin decremento térmico	61
Figura 4-30. Representación de las deformaciones longitudinales en la deformada y en la indeformada para el caso con decremento térmico	61
Figura 4-31. Representación de las deformaciones longitudinales en las capas de 0 deformadas para el caso sin decremento térmico	61
Figura 4-32. Representación de las deformaciones longitudinales en las capas de 0 deformadas para el caso con decremento térmico	62
Figura 4-33. Representación de los desplazamientos longitudinales en la capa de 90 deformada para el caso sin decremento térmico	62
Figura 4-34. Representación de los desplazamientos longitudinales en la capa de 90 deformada para el caso con decremento térmico	62
Figura 4-35. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación superior aplicando el decremento térmico	65
Figura 4-36. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior aplicando el decremento térmico	65
Figura 4-37. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación inferior aplicando el decremento térmico	66
Figura 4-38. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior aplicando el decremento térmico	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1. Evolución de las tensiones circunferenciales para el estudio aproximado con $r = 4 \cdot 10 - 4\text{mm}$	43
Gráfico 4-2. Evolución de las tensiones circunferenciales para el estudio aproximado con $r = 6 \cdot 10 - 4\text{mm}$	43
Gráfico 4-3. Evolución de G_I con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90	45
Gráfico 4-4. Evolución de G_{II} con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90	45
Gráfico 4-5. Evolución de G con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90	46
Gráfico 4-6. Evolución de las diferentes energías con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90	46
Gráfico 4-7. Evolución de la mixicidad con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90	47
Gráfico 4-8. Evolución de las tensiones normales y tangenciales en el punto 3	49
Gráfico 4-9. Evolución de los desplazamientos relativos	49
Gráfico 4-10. Evolución de G_I con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90	51
Gráfico 4-11. Evolución de G_{II} con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90	51
Gráfico 4-12. Evolución de G con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90	52
Gráfico 4-13. Comparación de G_I para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación	52
Gráfico 4-14. Comparación de G_{II} para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación	53
Gráfico 4-15. Comparación de G para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación	53
Gráfico 4-16. Comparación de G_I en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	57
Gráfico 4-17. Comparación de G_{II} en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	58
Gráfico 4-18. Comparación de G en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	58
Gráfico 4-19. Comparación de la mixicidad en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	59
Gráfico 4-20. Evolución de las tensiones en el punto 3 para el caso con decremento térmico	60
Gráfico 4-21. Evolución de los desplazamientos relativos para el caso con decremento térmico	60
Gráfico 4-22. Comparación de G_I en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	63
Gráfico 4-23. Comparación de G_{II} en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	64
Gráfico 4-24. Comparación de G en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (2-1)	6
Ecuación (2-2)	7
Ecuación (2-3)	7
Ecuación (2-4)	7
Ecuación (3-1)	18
Ecuación (3-2)	18
Ecuación (3-3)	18

1 INTRODUCCIÓN

El uso extensivo de materiales compuestos en diversos ámbitos industriales hace que muchos de los estudios que se realizan hoy en día estén basados en ellos. Este proyecto se centra en el estudio de un fallo prematuro detectado en un tipo de laminado aparentemente sin explicación, usando un modelo de elementos finitos y haciendo uso de los conocimientos adquiridos relativos a Mecánica de la Fractura.

En este primer capítulo se realiza una pequeña introducción al mundo de los materiales compuestos y se contextualiza todo el trabajo realizado, explicando los antecedentes y qué es lo que ha impulsado la realización del proyecto, e ilustrando el objetivo que se pretende perseguir.

1.1 Contexto: Materiales compuestos

En el presente documento se va a hacer referencia constantemente al concepto de material compuesto y a todo lo que hay detrás del mismo. Por este motivo, parece interesante comenzar haciendo una pequeña revisión e ilustración de este concepto, poniendo así en situación al lector.

Un material compuesto es aquel formado mediante la unión de dos o más materiales, de los que podemos definir como convencionales, con el objetivo de conseguir unas propiedades especiales combinando las de los materiales de partida. [1]

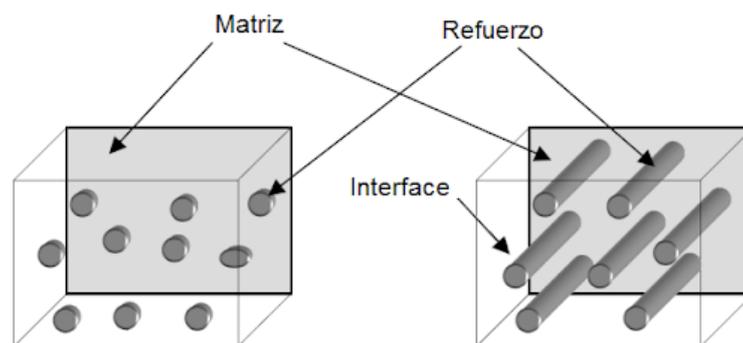


Figura 1-1. Morfología y componentes de un material compuesto

La utilización de este tipo de materiales en la industria es relativamente novedosa, pero muy interesante, ya que ha supuesto grandes avances por el hecho de que con ellos pueden obtenerse en un mismo material las propiedades que se quieran, con ciertas limitaciones por supuesto.

Las propiedades que suelen ser de interés en estos materiales son:

- Resistencia mecánica.
- Resistencia a la corrosión.
- Peso.
- Aislamiento térmico.
- Rigidez.
- Resistencia a la abrasión.
- Vida a fatiga.
- Aislamiento acústico.

Dentro de los materiales compuestos es necesario realizar una clasificación para facilitar el estudio de los mismos y el trabajo con ellos. Teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de este tipo de materiales es mejorar las propiedades mecánicas de un material de partida, parece interesante realizar la clasificación basándose en el mecanismo que produce esta mejora. Dicha mejora depende en gran medida de la geometría

del refuerzo que se introduce dentro de la matriz (material base) y se puede hablar de:

- Materiales compuestos reforzados con fibras.
- Materiales compuestos reforzados con partículas.

Se habla de fibra cuando una dimensión del refuerzo es mucho mayor que las otras dos, y se usa partículas para hacer referencia a todas las demás geometrías posibles (esferas, cubos, láminas, etc).

El material con el que se va a trabajar en el estudio reflejado en el presente documento se encuadra dentro de los reforzados por fibra y, más concretamente, se trata de un laminado (secuencia de láminas de un mismo material apiladas, pero con diferentes orientaciones de las fibras)

1.2 Antecedentes y motivación

El 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 encuadra muchos de sus estudios en el ámbito de los materiales compuestos.

En un trabajo previo [2] se observó experimentalmente, sin tratarse del objetivo de estudio, que en un determinado tipo de laminado para unas condiciones de carga determinadas, aparecían fallos prematuros de difícil explicación.

En concreto, se estaba trabajando con laminados $[0_2 90]_s$, de material AS4/8552 (fibra de carbono en matriz polimérica). Al someter este tipo de laminado a tracción se produjeron delaminaciones de gran tamaño entre la capa de 0 y la capa de 90, acompañada de una grieta en la capa de 90 con una orientación que parece ser de 45° , tal y como se indica en la Figura 1-2 que aparece a continuación.

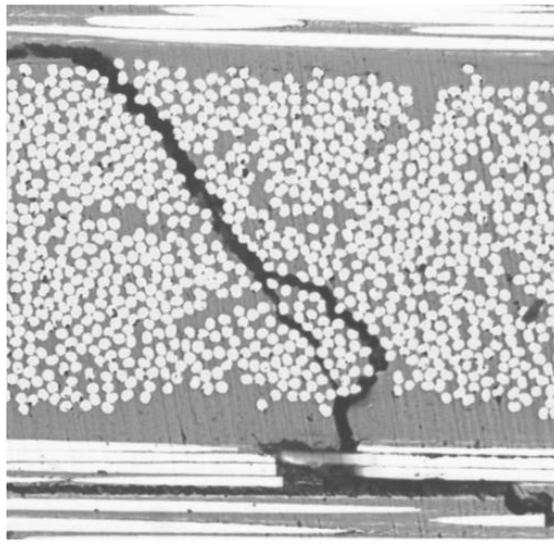


Figura 1-2. Micrografía en la que se observa la grieta a 45° que aparece en la capa de 90

El fallo habitual en este tipo de laminados, ante tracción, comienza por grietas perpendiculares al sentido de aplicación de la carga y posteriores delaminaciones entre las capas de 0 y 90. Es este el motivo que nos lleva a realizar los estudios recogidos en este trabajo, intentando buscar una explicación de la aparición de este fallo no convencional.

1.3 Objetivo

El objetivo principal del trabajo realizado es encontrar una justificación para la aparición de estas grietas que penetran en la capa de 90 con una orientación de aproximadamente 45° .

Aunque no se ha podido observar experimentalmente si se producen primero las delaminaciones y después

esta grieta, se supondrá para este estudio que el origen de estas grietas es la existencia de una delaminación. El estudio tendrá carácter exclusivamente numérico y se realizará usando como medio de análisis la Mecánica de la Fractura de Grietas de Interfase, a partir de los resultados proporcionados por los modelos de elementos finitos implementados en ABAQUS [3].

2 HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

El proyecto que se está ilustrando en este documento, además de abordarse usando conocimientos relativos a materiales compuestos, también se enfoca desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura.

El estudio del comportamiento de objetos y estructuras en presencia de grietas se encuentra en este ámbito. Para poder discernir si una grieta va a crecer o no, es necesario recurrir a la Mecánica de la Fractura y a varios conceptos definidos por ella.

Por ese motivo, el segundo capítulo de este trabajo se va a dedicar a hablar brevemente de la Mecánica de la Fractura, a hacer referencia a los conceptos necesarios para realizar los diferentes análisis y a explicar cómo se ha trasladado todo esto desde la teoría hasta los modelos realizados en ABAQUS.

2.1 Mecánica de la Fractura

La Mecánica de la Fractura se ocupa de estudiar el comportamiento y la resistencia de sólidos sometidos a la acción de cargas exteriores en presencia de grietas o defectos asimilables a grietas.

El objetivo general de la Mecánica de la Fractura puede decirse que es dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Bajo qué condiciones una grieta va a crecer?
- ¿Cómo de rápido va a crecer una grieta?

Recordando que este proyecto tiene como objetivo encontrar la explicación de la aparición de una serie de grietas en un laminado, tiene sentido que se aborde aplicando los conocimientos relativos a este tema.

Un concepto muy importante en todos los estudios realizados, y que está directamente relacionado con la primera de las preguntas que intenta contestar la Mecánica de la Fractura, es el índice de liberación de energía (G). Esta variable hace referencia a la cantidad de energía disponible para hacer crecer una grieta y debe ser comparada con el índice crítico de liberación de energía (G_c), asociado a la tenacidad a fractura del material en las condiciones de trabajo, que es la energía necesaria para que la grieta consiga crecer.

En el proyecto realizado, esta variable G se utiliza de manera comparativa realizando un análisis cualitativo, es decir, que se obtendrá su valor en diferentes modelos que planteen varias posibilidades y, evidentemente, para el que aparezca una tasa de liberación de energía mayor será el que esté modelando el comportamiento más probable y, por tanto, el más cercano al real de la grieta (siempre bajo las hipótesis asumidas).

2.2 Modelo de elementos finitos y ABAQUS

Como ya se ha mencionado, todo el estudio se ha abordado desde un punto de vista numérico, mediante modelos de elementos finitos realizados en el programa ABAQUS. Para poder entender todos los análisis realizados y los resultados obtenidos parece necesario introducir al lector en la materia.

El método de elementos finitos es un método numérico que permite resolver de manera aproximada ecuaciones diferenciales cuyas soluciones caracterizan el comportamiento del cuerpo sobre el que se está aplicando dicho método. Es algo muy usado en problemas de ingeniería y supuso un gran avance en muchos ámbitos tecnológicos.

Este método se basa en la discretización, resolución de las ecuaciones en un determinado número de puntos y extrapolación de los resultados para caracterizar el comportamiento, en este caso elástico, del sólido objeto de estudio.

Existen varios softwares que permiten crear modelos de elementos finitos y trabajar con ellos. En este trabajo en concreto, todos los modelos que se han usado han sido implementados en ABAQUS/CAE 2019. El motivo por el que se ha elegido usar este programa es que, actualmente, es un programa comercial de uso ampliamente extendido tanto en investigación como en entornos industriales. De esta manera, todo lo

aprendido acerca del manejo del software puede ser útil para el inminente futuro laboral.

Otra cuestión que hay que aclarar es que todo el estudio realizado podría haberse abordado análogamente usando elementos de contorno en vez de elementos finitos. El motivo por el que se ha elegido el segundo método es 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 interior y no solo los contornos. Sin embargo, para estudios posteriores sí sería interesante elaborar un modelo de elementos de contorno para obtener resultados más precisos en algunos puntos, por ejemplo, el fondo de grieta de las delaminaciones.

Como ya se ha mencionado, todo el estudio se aborda desde el punto de vista de Mecánica de la Fractura, aplicando los conceptos ilustrados en el apartado anterior. ABAQUS presenta unas herramientas bastante completas para el modelado y simulación de propagación de grietas con la posibilidad de elegir entre diferentes criterios de fractura. En este proyecto se ha usado el método VCCT ('Virtual Crack Closure Technique') para el cálculo de G en todos los modelos realizados. Comprender el funcionamiento de esta herramienta es fundamental para poder entender las decisiones tomadas durante todo el estudio, cómo está realizando el programa los cálculos internamente y qué resultados se están obteniendo.

2.2.1 VCCT ('Virtual Crack Closure Technique')

ABAQUS nos brinda la posibilidad de usar una gran variedad de lo que denomina "criterios de fractura", en base al cálculo de diferentes variables (VCCT, VCCT mejorado, desplazamiento crítico de la apertura de la grieta, criterio de fatiga basado en la ley de Paris, etc.).

La opción VCCT en ABAQUS permite evaluar la energía liberada G de una grieta a través de la técnica de cierre virtual de grieta ya propuesta por Irwin en 1957 para, en base a una determinada función de propagación, predecir su crecimiento [4]. En este trabajo, nuestro interés se centraba en el cálculo de G en diferentes situaciones sin realizar una predicción de crecimiento a través de ABAQUS y, por tanto, sin aplicar un criterio de crecimiento. Es por ello que se ha empleado VCCT, pero sin permitir que las grietas modeladas crecieran en base al uso de unos valores de Gc muy elevados.

VCCT se basa en el supuesto de que la energía de deformación liberada cuando una grieta crece una determinada longitud es la misma que la requerida para cerrar la grieta en la misma proporción. Dicho criterio se basa en los principios de la mecánica de la fractura elástica lineal (LEFM).

De manera general, y para entender realmente cómo trabaja VCCT en ABAQUS, los nodos 2 y 5 de la Figura 2-1 se despegarán cuando se cumpla la condición expresada en la ecuación (2-1), haciendo que la grieta crezca una distancia igual al tamaño del elemento que se encuentre justo a continuación del fondo de la misma:

$$f = \frac{GI}{GIC} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{1,6} * F_{v,2,5}}{b * d} \right) \frac{1}{GIC} \geq 1 \quad (2-1)$$

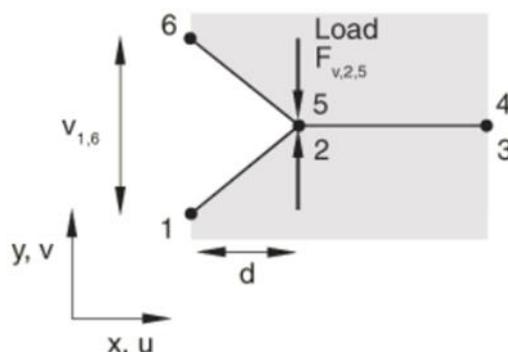


Figura 2-1. Representación gráfica de las variables que usa el criterio de fractura

En la imagen y ecuación anteriores aparecen una serie de parámetros que quedan por ser definidos: $v_{1,6}$ es el desplazamiento relativo que aparece entre los nodos que se encuentran justo antes del fondo de la grieta; $F_{v,2,5}$, es la fuerza necesaria, aplicada en el fondo de grieta, para mantenerla cerrada; b , el espesor del modelo y d , la distancia, en la dirección de la grieta, entre los nodos justo anteriores al fondo y el propio fondo de grieta.

Hay que tener en cuenta que lo ilustrado anteriormente es válido cuando la grieta está trabajando en modo I puro.

Para el caso general en el que se combinan modo I, modo II y modo III de crecimiento de grieta (modo mixto), el criterio de fractura es:

$$f = \frac{G_{eq}}{G_{eqC}} \geq 1 \quad (2-2)$$

Siendo G_{eq} el índice de liberación de energía equivalente calculado en el nodo en cuestión, y G_{eq}^C , el índice de liberación de energía crítico calculado según el criterio de mixicidad especificado y la fuerza de unión de la interfaz.

El criterio de mixicidad (realmente es un criterio de daño que tiene en cuenta la mixicidad) que se ha usado es la ley BK, que define G_{eq} y G_{eq}^C de la siguiente manera:

$$G_{eq} = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (2-3)$$

$$G_{eqC} = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^n \quad (2-4)$$

El motivo por el que se ha usado la ley BK es, básicamente, que es la que selecciona ABAQUS por defecto. En ningún momento del estudio se permite que la grieta crezca, por tanto, que usemos un criterio u otro es irrelevante.

Para cerrar el presente apartado, es importante añadir que al definir VCCT seleccionando la ley BK, el programa pide que se le introduzcan los valores G_I^c , G_{II}^c , G_{III}^c y n . Para asegurar que la grieta no crece, se han usado tasas de liberación de energía críticas muy altas, de 10 N/mm, es decir, 10000 J/m². El exponente n se ha tomado de valor unidad, pero podría haberse elegido cualquier otro valor.

2.3 Materiales

Todo el estudio reflejado en este documento se basa, como ya se ha mencionado, en un fallo no convencional observado en una serie de probetas ensayadas a tracción con otro propósito.

El material con el que se va a trabajar es, por tanto, del que estaban constituidas estas probetas: AS4/8552. Se trata de un material compuesto formado por fibras de carbono inmersas en una matriz polimérica. El tipo de laminado en concreto, en el que se observó la aparición de las grietas anómalas, es del tipo $[0_2 90]_s$, donde los espesores de las capas a 0° y la capa a 90° son de 0.38 y 0.19 mm, respectivamente.

El hecho de que se trate de un laminado hace que las propiedades de todas las láminas que lo forman sean las mismas ya que se trata del mismo material. Sin embargo, la orientación de las fibras sí que varía de una lámina a otra y, por tanto, las propiedades, si quieren ser definidas de igual manera para todas deben estar expresadas en sistemas de referencia diferentes.

Al definir los materiales dentro de ABAQUS se decidió introducirlas giradas, es decir, diferentes para la capa de 0 y la capa de 90 por dos motivos:

- 1) De esta manera puede trabajarse siempre en el sistema de referencia global, definiendo el local para cada lámina igual a este, evitando posibles confusiones.
- 2) La intención era definir la capa de 0 como ortótropa y la capa de 90 como transversalmente isótropa, de manera que ya iba a ser necesario definir dos tipos de material dentro del programa. A pesar de esto, finalmente el material para ambas fue definido como tipo lámina, (ortótropo en el plano) para abordar el problema como uno de tensión plana.

Además de las propiedades mecánicas del material, también es necesario introducir en el programa los coeficientes de dilatación térmica. Esto se debe a que uno de los análisis realizados tiene en cuenta en forma de

decremento térmico el enfriamiento que sufre el material durante su fabricación tras el curado, ya que este puede generar tensiones residuales y alterar el comportamiento que se estaba prediciendo en principio.

En la Figura 2-2 puede verse un esquema del laminado. La capa central es la de 90°, en ella se ve la sección de las fibras en verdadera magnitud. Las láminas situadas por encima y por debajo de esta tienen sus fibras orientadas a 0°, es decir, de manera que el eje principal de la fibra coincide con el eje 1 representado.

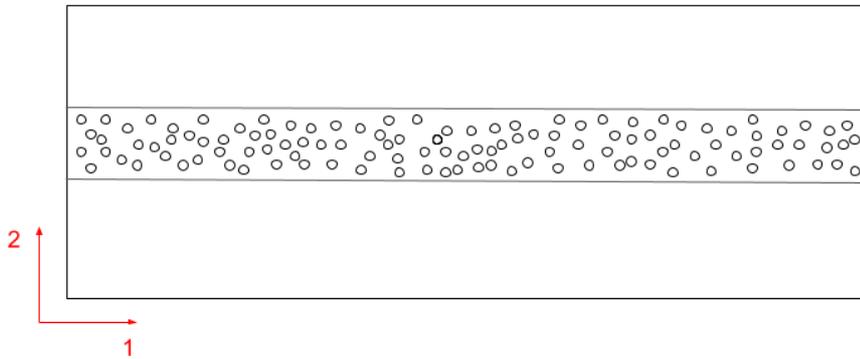


Figura 2-2. Esquema del laminado

Las propiedades del laminado aparecen en las tablas 2-1 y 2-2, expresadas, como suele hacerse en materiales compuestos, considerando como dirección 1 la de las fibras.

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas del laminado

Propiedad	Valor
E_1	135000 MPa
E_2	8750 MPa
ν_{12}	0.3
G_{12}	4750 MPa
G_{13}	4750 MPa
G_{23}	4750 MPa

Tabla 2-2. Propiedades térmicas del laminado

Temperatura (°C)	α_{11} (°C ⁻¹)	α_{22} (°C ⁻¹)	α_{33} (°C ⁻¹)
50	-7.46E-6	1.579E-5	1.668E-5
75	-8.26E-6	1.811E-5	1.92E-5
100	-8.95E-6	2.04E-5	2.223E-5
120	-8.66E-6	2.065E-5	2.248E-5

Para finalizar este apartado parece 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 de esa manera sería imposible modelar las delaminaciones que se han observado en las micrografías y que suponen el punto de partida de este trabajo.

3 MODELOS

En este capítulo se pretende presentar todos los modelos que han sido implementados en ABAQUS.

Como ya se ha mencionado, en las micrografías que suponen el punto de partida de todo el estudio realizado, se observa una delaminación y una grieta que se interna en la capa de 90 con una orientación aproximada de 45° con respecto a la interfase.

Aunque se desconoce cuál es el origen del daño, se ha optado por explorar la posibilidad de la aparición primera de una delaminación y, por tanto, empezar modelando esta delaminación, de diferentes tamaños. Una vez obtenidos los resultados de los modelos solo con la delaminación, se añade una grieta que se interna en la capa de 90 desde el fondo de la misma, para diferentes orientaciones, buscando cuál es la orientación más probable de aparición.

Tras estos dos análisis, fue necesario incorporar otros dos para completar el estudio. Por un lado, se generaron de nuevo los modelos con la grieta en la capa de 90 para diferentes orientaciones, pero ahora sin que exista una delaminación de partida. Por otro lado, se contempló la posibilidad de que existan dos delaminaciones desde un primer momento, una en cada interfase, generando otro modelo que las contenga.

Para facilitar la comprensión de este capítulo, en cada apartado se va a ir pasando uno a uno por los módulos de ABAQUS en el orden en que se hizo al generar los modelos, detallando qué se hizo en cada uno de ellos.

Por último, de manera general, para todos los modelos, es necesario recordar que se está trabajando con un problema plano (2D). Las dimensiones de todos los modelos y el esquema general de los mismos aparecen reflejadas en la Figura 3-1:

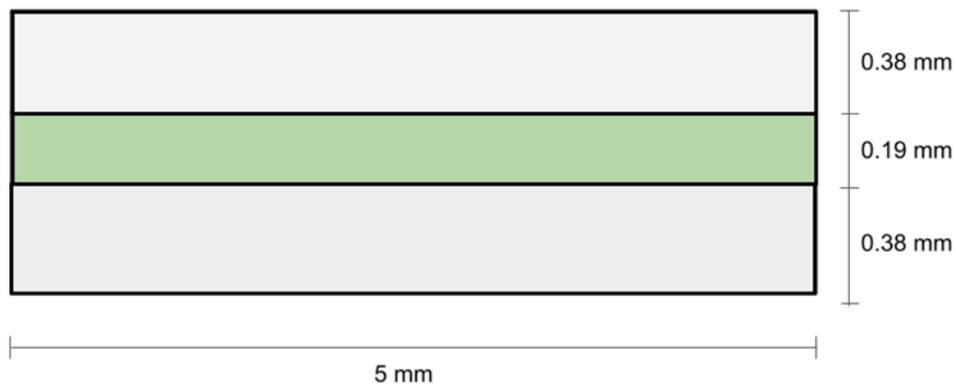


Figura 3-1. Esquema general con las dimensiones de los diferentes modelos

3.1 Delaminación de diferentes longitudes

Los primeros modelos que se realizaron fueron aquellos en los que solo aparecía una delaminación en la interfase entre la capa de 90 y la capa de 0 superior. Dicha delaminación iba desde el centro hacia la izquierda del modelo y se generaron modelos para tamaños de delaminación de 0.02, 1.25, 1.875, 2.1, 2.4 y 2.5 mm (este último no es más que uno con la interfase abierta desde el centro hasta el borde izquierdo).

El esquema general de estos modelos se representa a continuación:

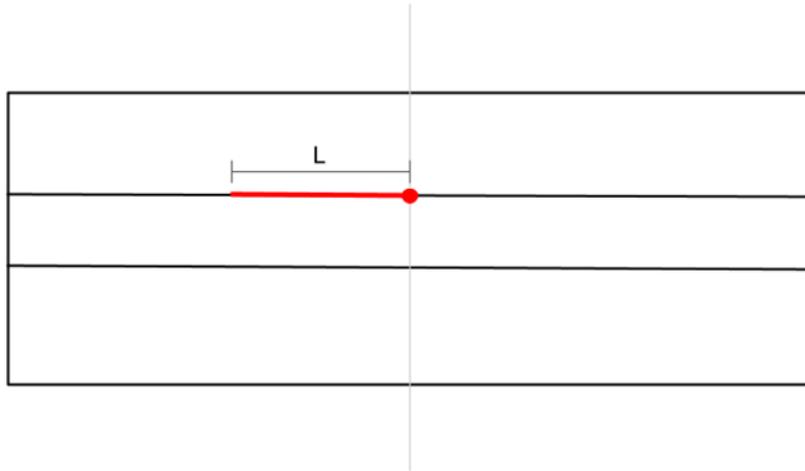


Figura 3-2. Esquema que representa los modelos con delaminación

3.1.1 Módulo Part

El primer paso para generar un modelo de elementos finitos es definir la geometría del mismo a partir de las diferentes partes que sean necesarias para componerlo. El trabajo con ABAQUS en este módulo es análogo al de un programa de CAD, como pueden ser CATIA o Solid Edge.

Para generar modelos con grietas (todos los casos que van a verse) siempre es necesario que el modelo sea multipart. Esto quiere decir que el modelo está formado por más de una parte. Solo de esta manera será posible generar la grieta, dejando ambas partes sin unir en la zona en la que se quiera situar la misma.

Para todos los modelos que se van a ver en este apartado, se ha generado el modelo a partir de las siguientes dos partes:



Figura 3-3. Parte superior de los modelos con delaminación

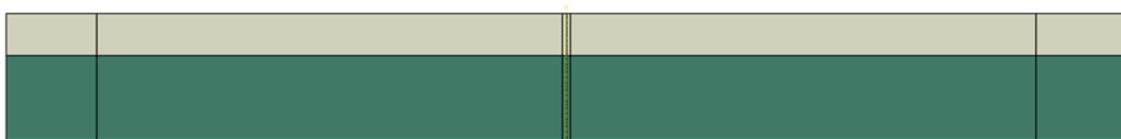


Figura 3-4. Parte inferior de los modelos con delaminación

Por un lado, se genera la capa de 0 superior (verde) y, por otra, la capa de 90 (gris) y la capa de 0 inferior (verde). Las líneas que aparecen y que no representan la interfase entre dos láminas son particiones y se han

introducido en el modelo porque serán útiles en otros módulos de ABAQUS, por ejemplo, en el mallado o al definir las interacciones.

3.1.2 Módulo Property

En este segundo módulo lo que se hace es definir los diferentes materiales que van a aparecer en el modelo y asignarlos a las zonas pertinentes.

El trabajo dentro de este módulo es igual para todos los modelos realizados y, por tanto, se obviará en los siguientes apartados de este capítulo siendo aplicable todo lo aquí mencionado para cada uno de ellos.

En el capítulo anterior ya se habló del material y de cómo iba a ser necesario definirlo en la interfaz de ABAQUS. No obstante, se hará un breve recordatorio.

Se va a definir un material que será asignado a la capa de 90 y otro que será asignado a la capa de 0. De esta manera, introduciendo las propiedades giradas, puede trabajarse en todas las láminas con el mismo sistema de referencia.

Ambos materiales han sido definidos como tipo lámina, al introducir las propiedades mecánicas, y como ortótropo, al definir los coeficientes de dilatación, en la ventana de diálogo de ABAQUS ya que quieren tratarse como ortótropos en el plano. Tanto las propiedades mecánicas como los coeficientes de dilatación térmica se introducen tal y como aparecen en las tablas del capítulo anterior. En estos modelos solo con delaminación no hubiera sido necesario introducir los coeficientes de dilatación porque no se va a someter al modelo a ningún decremento térmico, pero se hizo para que la definición de los materiales fuera igual para todos los modelos.

A continuación, se muestra la definición de los materiales dentro del programa:

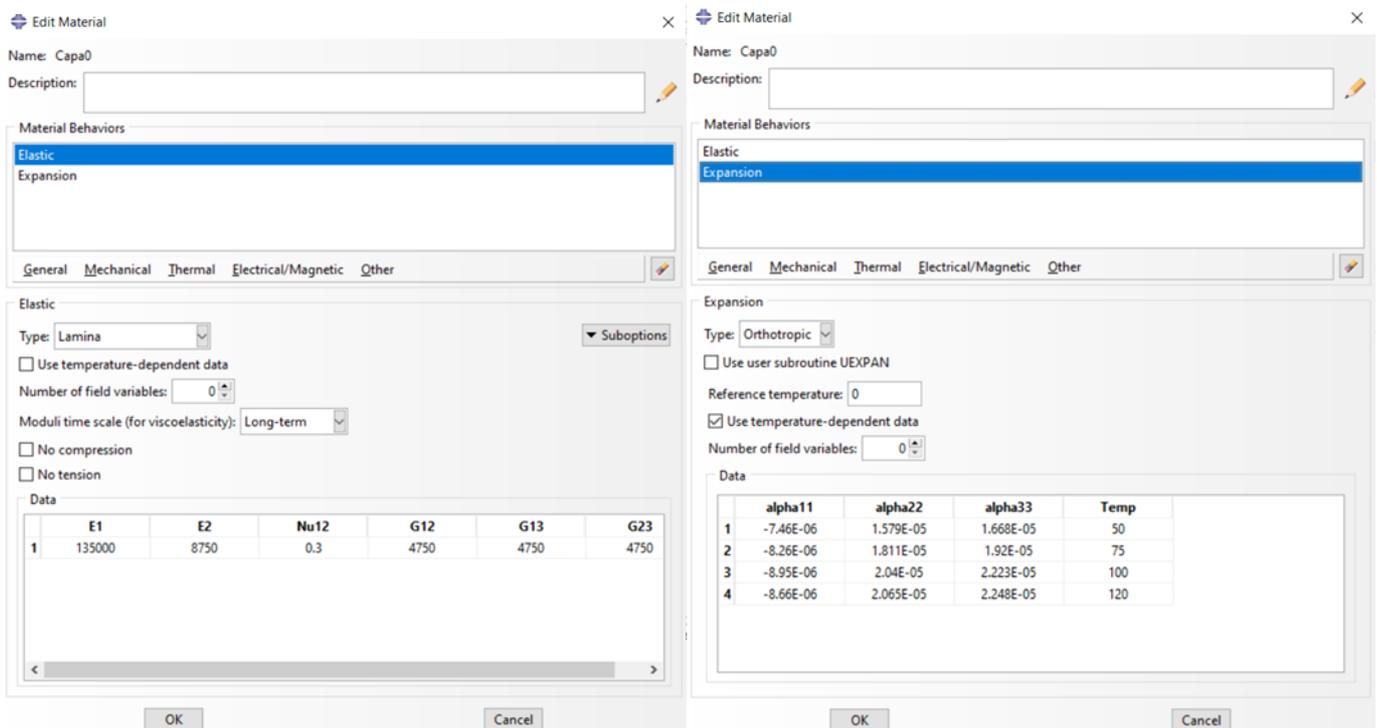


Figura 3-5. Definición del material de la capa de 0 dentro de ABAQUS

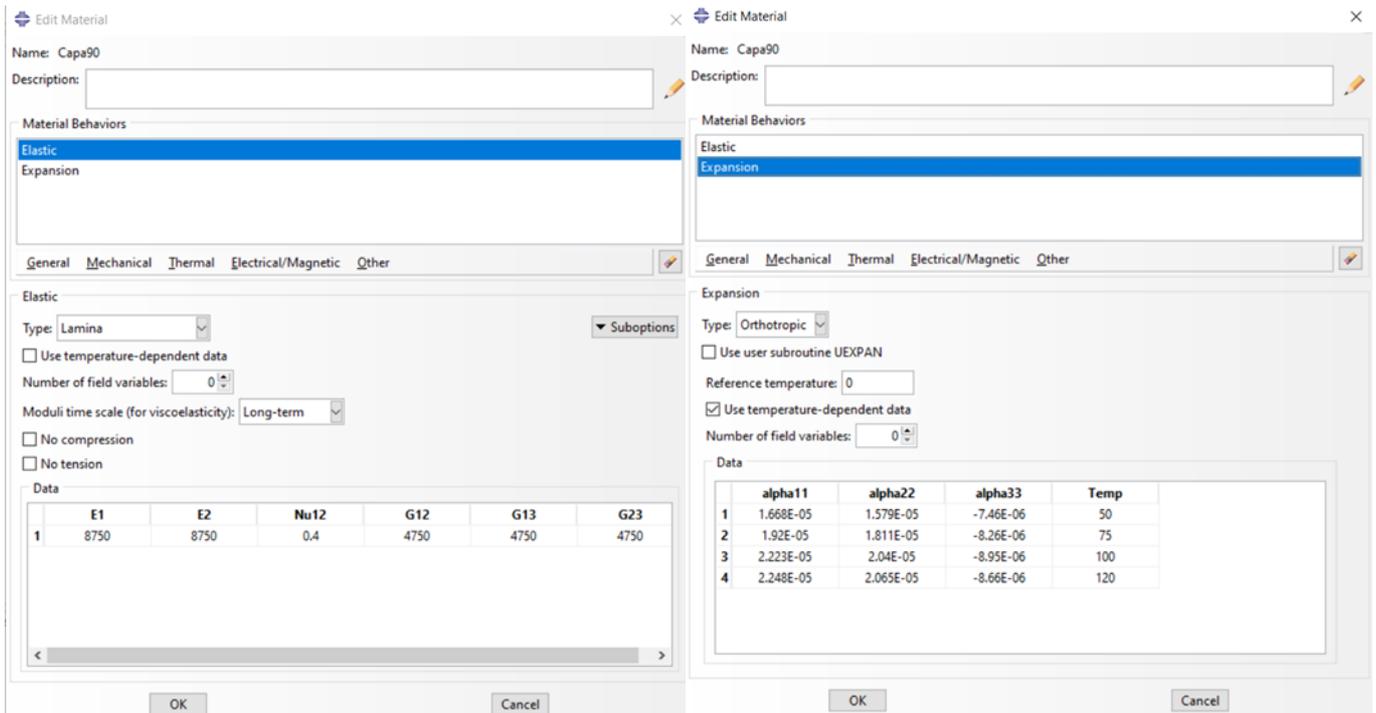


Figura 3-6. Definición del material de la capa de 90 dentro de ABAQUS

Una vez definidos los materiales, estos deben ser asignados a cada una de las regiones del modelo. Para ello, primero es necesario definir tantas secciones como materiales hayan sido generados y asignarle el material que les corresponda.

En este caso las dos secciones fueron definidas como sólido homogéneo, siendo conscientes de que se trata de una aproximación ya que ningún material compuesto, por definición, es homogéneo.

Una vez definidas estas secciones, se asignan a las zonas de modelo, tal y como aparece en la siguiente imagen donde en color verde se representan las zonas a las que se les ha asignado la sección que simula la capa de 0 y en color gris la de la capa de 90.

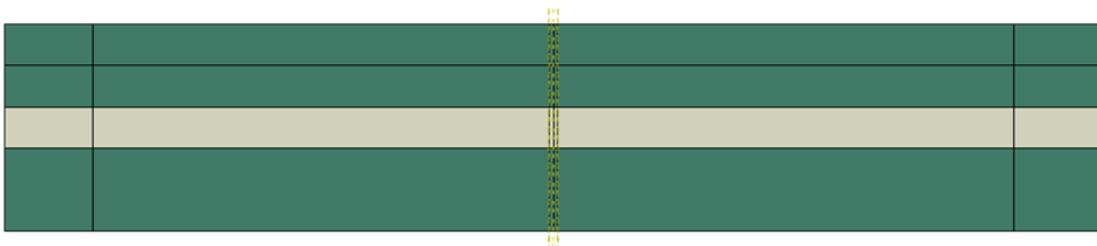


Figura 3-7. Representación de los materiales asignados a cada región del modelo

3.1.3 Módulo Assembly

El tercer paso al crear un modelo es entrar en este módulo en el que se genera el conjunto de las diferentes partes definidas en el primer módulo.

Hasta el momento las diferentes partes eran completamente independientes, es en este paso cuando se genera un conjunto con todas ellas y se posicionan unas con respecto a otras de la manera que se quiera, es decir, anteriormente cada parte se encontraba en un plano diferente y al generar el conjunto se trasladan todas al

mismo.

Hay que tener cuidado con una cosa: aunque en este módulo se coloquen las partes de manera que ya se obtiene la geometría del modelo como tal, no se han definido interacciones entre ellas, solo están posicionadas donde se quiere, pero siguen comportándose de manera independiente.

El trabajo en este módulo, al igual que en el anterior, es análogo para cada uno de los modelos que se han implementado.

3.1.4 Módulo Mesh

Cuando se trabaja con elementos finitos, una de las partes fundamentales y donde se concentra el grueso del trabajo es el mallado. Es necesario prestar mucha atención en este módulo y realizar numerosas pruebas ya que la validez de los resultados depende en gran medida de haber conseguido una malla acorde a lo que se busca.

Los objetivos que se persiguen al mallar son obtener una buena exactitud y un bajo coste computacional. Por desgracia, son contradictorios ya que para mejorar la exactitud hay que incrementar el número de elementos, lo cual aumenta el coste computacional. Se recurre entonces a obtener una solución de compromiso entre ambos objetivos, refinando la malla en las zonas más exigidas o las zonas de interés y degradándola hasta una mucho más gruesa en el resto del modelo.

El primer paso para mallar un modelo es elegir el tipo de elementos que se van a usar. En estos estudios como se trata de un modelo plano y se va a tratar como un caso de tensión plana, los elementos usados son CPS4R (plano, 4 nodos, lineal y tensión plana).

A continuación, se elige el tipo de mallado que quiere aplicarse a cada zona del modelo. En este caso, la geometría es muy regular y admite perfectamente un mallado basado solo en elementos cuadrados o rectangulares, por eso se usa en todo el modelo el tipo de mallado Sweep.

Por último, siendo esta la parte más trabajosa, se sitúan las semillas de mallado en todas las líneas del modelo.

La zona de interés de estos modelos, en los que solo existe una delaminación, es el fondo de la misma ya que, recordemos, el problema se enfoca desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura. El tamaño del elemento situado justo en el fondo de la delaminación es de 0.0001 mm (se trata de una malla muy fina teniendo en cuenta que el ancho del modelo es 5 mm) y va aumentando de tamaño hasta encontrar en los extremos, izquierdo y derecho, del modelo elementos de tamaño 0.025 mm.

Esta malla, con la que se han obtenido los resultados, es la resultante de un análisis de convergencia en el que se partía de una malla inicial que iba refinándose hasta conseguir que los resultados no variaran.

Para cerrar todo lo relativo a este módulo, se añaden unas imágenes en las que puede verse la apariencia de la malla usada.

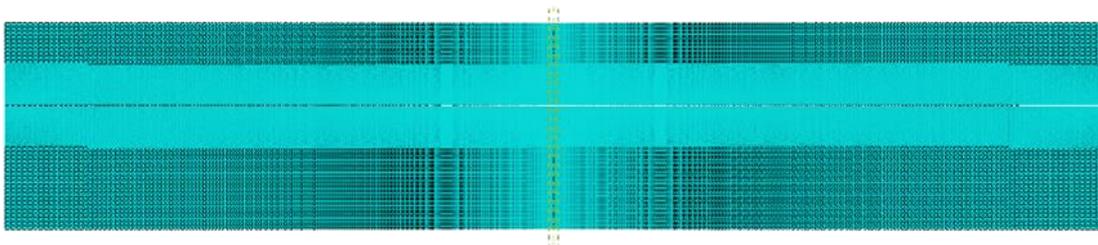


Figura 3-8. Imagen de la malla para el modelo con delaminación

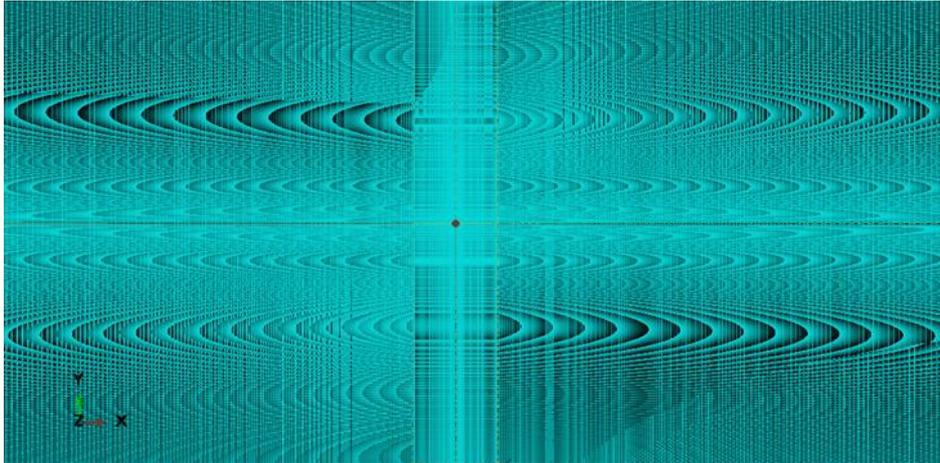


Figura 3-9. Zoom de la malla acercando la imagen en el fondo de la delaminación (punto rojo)

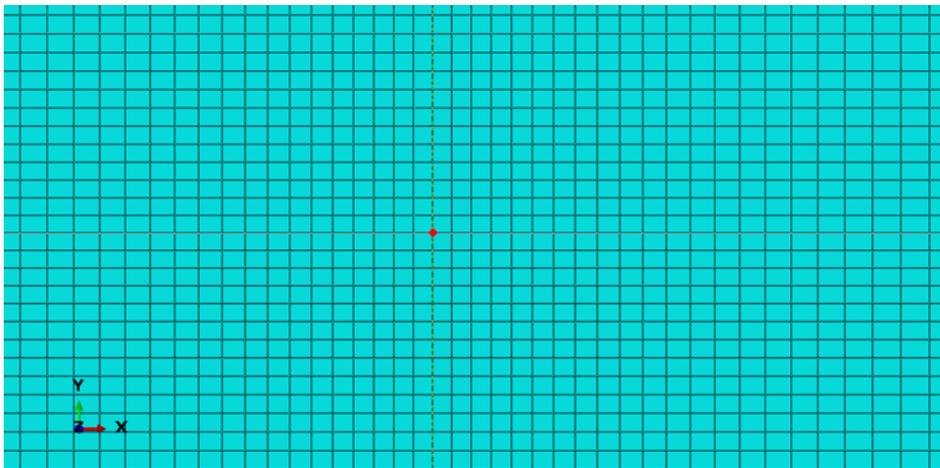


Figura 3-10. Zoom de la malla en el fondo de la delaminación (punto rojo)

3.1.5 Módulo Step

En los estudios que se han realizado se simula la aplicación de una carga estática en un único paso de carga. Es por esto por lo que solo es necesario generar un step, además del step inicial que se genera por defecto en ABAQUS.

3.1.6 Módulo Interaction

Es en este módulo, y no en el módulo Assembly, donde se definen las interacciones entre las diferentes partes que forman el modelo.

Estos modelos solo están formados por dos partes y existen dos tipos de interacciones entre ellas: hay una zona donde ambas partes se encuentran pegadas y otra donde se sitúa la delaminación, que queda libre, es decir, se mantienen independientes las superficies que pertenecen a cada parte pudiendo contactar o no, en función de la carga aplicada. Dentro de la zona donde no hay distinción entre ambas partes tenemos que diferenciar entre la que siempre se mantendrá así y la que puede abrirse si la grieta crece. Esto queda representado en la Figura 3-11:

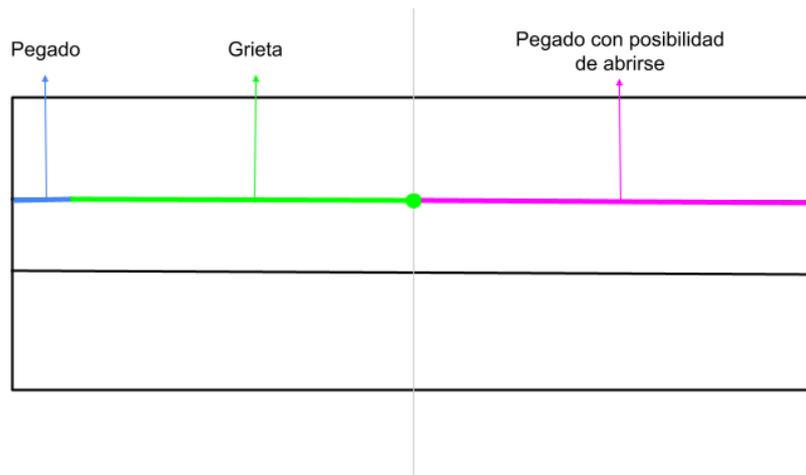


Figura 3-11. Esquema del modelo con la representación de los diferentes tipos de superficies que aparecen en la interfase superior

La zona denominada de pegado y representada en color azul hace referencia a la zona no dañada del modelo, la grieta representa, evidentemente, la zona dañada del mismo y la zona marcada en color magenta representa aquella que inicialmente no está dañada, pero que puede abrirse en caso de que la grieta crezca.

Para trasladar todo esto a ABAQUS es necesario definir:

- Constraint: Tie

Es la manera que tiene ABAQUS de pegar dos superficies pertenecientes a partes diferentes. Para ello, solo necesita que se definan una superficie esclava y una maestra, cada una perteneciente a una parte, y él se encarga de unirlas sin posibilidad de que se separen. Hay que añadir que los nodos aparecen duplicados tras el pegado, es decir, no desaparece una de las superficies, se mantienen las dos comportándose como una sola.

ABAQUS siempre muestra los resultados sobre la superficie que se haya tomado como esclava por lo que, al estar interesados en lo que ocurre en la capa de 90 (grieta que se interna en ella observada en las micrografías), las superficies se definen de la siguiente manera:



Figura 3-12. Parte superior del modelo con superficie maestra del pegado marcada

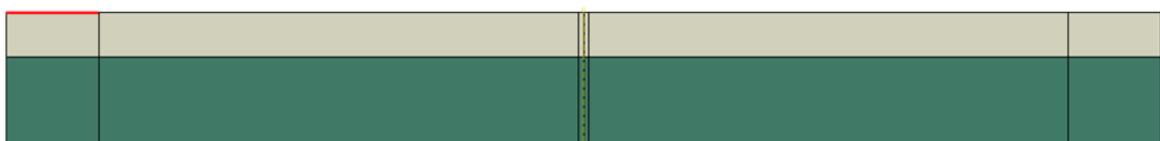


Figura 3-13. Parte inferior del modelo con superficie esclava del pegado marcada

- Interaction Property: VCCT

Llegados a este punto es necesario implementar en ABAQUS todo lo que se explicó en el capítulo 2 de este documento acerca del criterio de fractura VCCT.

Antes de definir la grieta en sí, es necesario seleccionar el “criterio de fractura”, en este caso VCCT, para asignarlo al contacto, que se definirá después.

En la siguiente imagen queda reflejado cómo se realiza esta definición dentro del programa aplicando todo lo visto anteriormente.

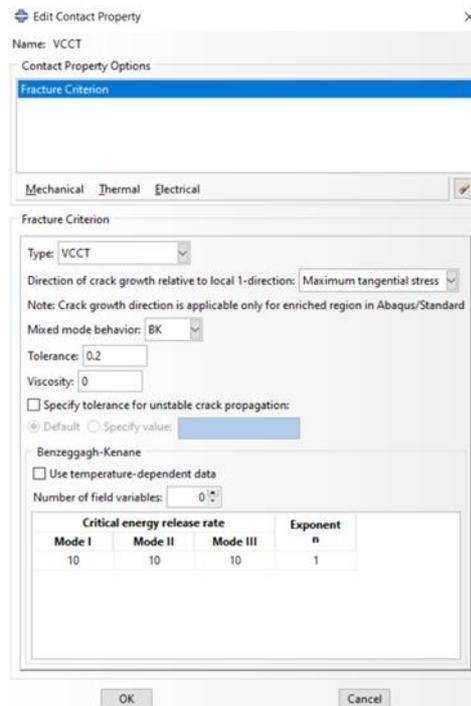


Figura 3-14. Definición del criterio de fractura dentro de ABAQUS

- Interaction: surface-to-surface contact

Para generar la grieta en sí es necesario definir la interacción entre las dos superficies como contacto.

En esta definición entrarían las superficies que forman los labios de la grieta y las que están pegadas, pero que pueden separarse en caso de que la grieta crezca. Las primeras se mantendrían separadas pudiendo comportarse de manera independiente mientras que las segundas tienen que redefinirse dentro del contacto como lo que el programa llama ‘bonding’, tratándolas como una sola superficie hasta que la grieta crezca separando sus nodos.

Es necesario definir una superficie esclava y una maestra para el contacto, pero solo la esclava del ‘bonding’. De nuevo, por el mismo motivo que con el pegado, se eligen las superficies esclavas las de la capa de 90 y como maestra la de la capa de 0.

En las siguientes imágenes puede verse qué superficies se han usado, ya que es más fácil de entender con un apoyo visual.

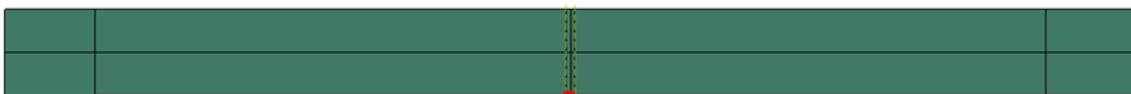


Figura 3-15. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada

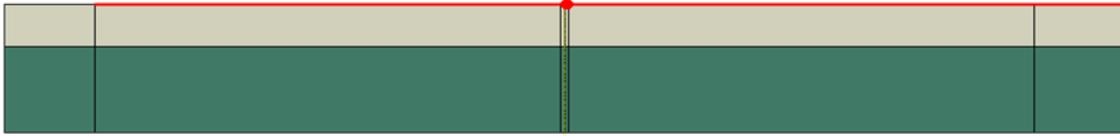


Figura 3-16. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada



Figura 3-17. Parte inferior del modelo con la superficie por la que puede crecer la grieta marcada (bonding)

Cuando se quiere definir el contacto, ABAQUS pide varias cosas de manera obligatoria y da la posibilidad de incluir algunos detalles más.

Evidentemente pide las superficies esclava y maestra para saber a qué va a aplicarse esta interacción. Permite elegir como método de discretización entre ‘node to surface’ y ‘surface to surface’, aunque se ha comprobado que para estos modelos los resultados no son dependientes de cuál de las opciones se elija. En la pestaña ‘bonding’ es donde hay que limitar la zona que se quiere que esté inicialmente pegada, pero disponible para el crecimiento de la grieta, seleccionando el set que se ha creado con la superficie que aparece en la última imagen vista. Por último, también hay que añadir que la pestaña ‘clearance’ se usa para definir una mínima holgura entre los labios de la grieta para evitar problemas de interpenetración que podrían aparecer. En este caso se ha definido una holgura de 10^{-8} mm.

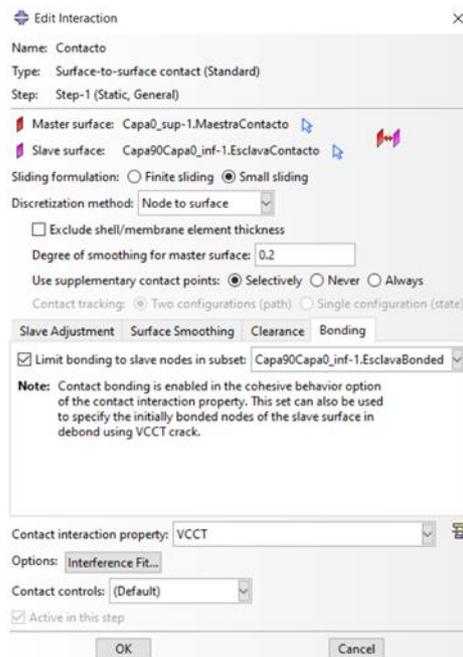


Figura 3-18. Definición del contacto dentro de ABAQUS

Antes de salir de este módulo de ABAQUS es necesario generar la grieta en sí. Para esto solo hay que crear lo que el programa llama ‘Crack (Debond using VCCT)’, situarla en el step generado y asignarla al contacto previamente definido.

3.1.7 Módulo Load

Llegados a este punto es necesario imponer las condiciones de contorno sobre el modelo.

En primer lugar, hay que limitar los movimientos como sólido rígido usando los apoyos pertinentes. En todos los modelos realizados en este trabajo, esto se ha hecho como se ve en el esquema que aparece a continuación:

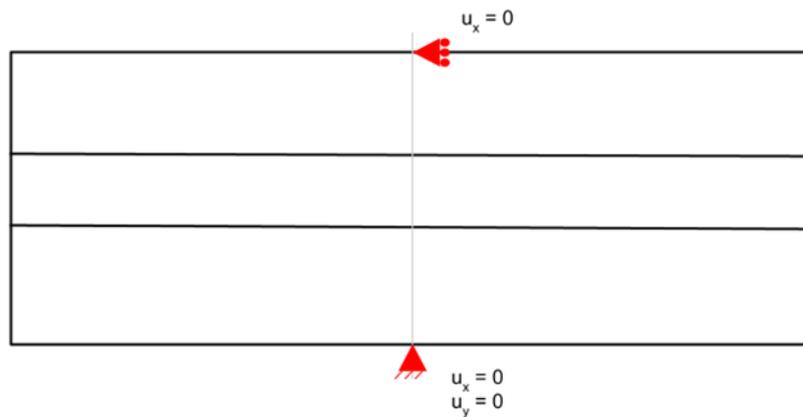


Figura 3-19. Representaciones de los apoyos usados para restringir los movimientos como sólido rígido del modelo

Por otro lado, hay que imponer las cargas a las que quiera someterse al modelo. Teniendo en cuenta que el objetivo principal es estudiar la aparición de grietas (fallo del material) de diferentes formas, tiene sentido usar la tensión de rotura para traccionar el modelo.

La tensión de rotura del laminado con el que se está trabajando, y en el que se observaron las grietas cuya aparición se quiere explicar, es de 1195 MPa.

Por un lado, se obtuvieron los resultados aplicando la condición de contorno de tensiones, usando esta tensión aplicada tanto en el extremo izquierdo como en el derecho. Además, también se planteó la posibilidad de obtener resultados sustituyendo la condición de contorno en tensiones por una en desplazamiento aplicada sobre las mismas zonas del modelo.

Para ver qué desplazamiento se aplicaba, se realizaron unos cálculos muy sencillos para obtener un número que podría darnos un comportamiento similar a la tensión de rotura, al menos para usarlos como punto de partida. Las ecuaciones aplicadas son, evidentemente, impensables para modelar el comportamiento de un material compuesto, pero, como ya se ha mencionado, se usaron para obtener un punto de partida.

$$\varepsilon = \frac{X_T}{E} = \frac{1195}{135 \cdot 10^3} = 0.00885 \quad (3-1)$$

$$u' = \varepsilon \cdot L = 0.044 \text{ mm} \quad (3-2)$$

$$u = \frac{u'}{2} = 0.022 \text{ mm} \quad (3-3)$$

En las ecuaciones anteriores con X_T se hace referencia a la tensión de rotura del laminado estudiado; con E , al módulo de Young (en la dirección de la fibra); con L , a la longitud, anchura, del modelo; con u' , al desplazamiento total; con u , al desplazamiento para cada lado del modelo; y con ε , a las deformaciones

Como último apunte, por un lado, se obtuvieron los resultados aplicando como condición de contorno una tracción de valor la tensión de rotura y, por otro, aplicando como condición de contorno un desplazamiento en dirección x (dirección 1) de 0.022 mm tanto en el extremo izquierdo del modelo como en el derecho.

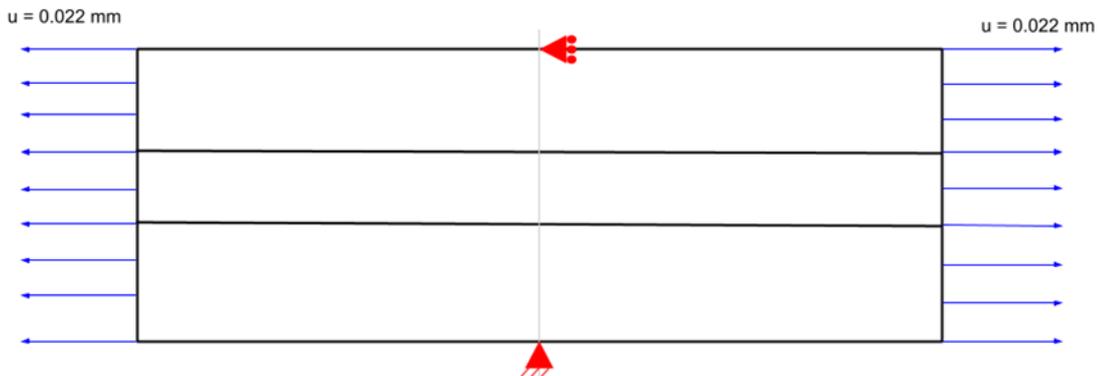


Figura 3-20. Representación de la aplicación de la condición de contorno en desplazamiento

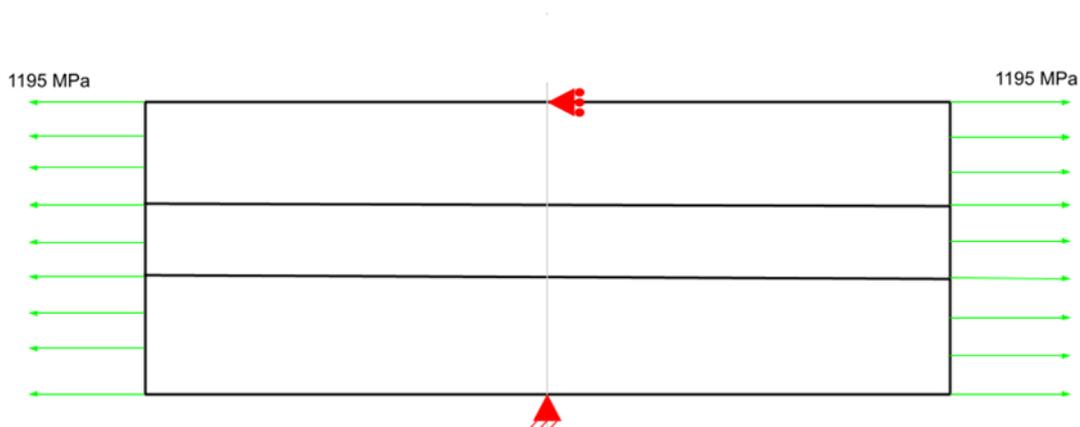


Figura 3-21. Representación de la aplicación de la condición de contorno en tensiones

3.1.8 Módulo Job

En este módulo se genera un apartado, trabajo, para cada uno de los estudios que se quieran realizar con el modelo. Es desde aquí, desde donde empieza a trabajar el programa y donde se crean los ficheros de salida.

3.2 Grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones a partir de una delaminación

Tras obtener los resultados pertinentes de los modelos con delaminaciones de diferentes tamaños, se decidió empezar a trabajar con una pequeña grieta que se internara en la capa de 90.

Los modelos ahora presentan una delaminación de tamaño relativamente grande (2.1 mm) y del fondo de la misma surge una microgrieta (0.02 mm) que se adentra en la capa de 90° con diferentes orientaciones para cada modelo. Las diferentes orientaciones con las que se ha trabajado son $\alpha = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 160^\circ$.

Para facilitar el entendimiento de la forma general de estos modelos, se muestra un esquema a continuación:

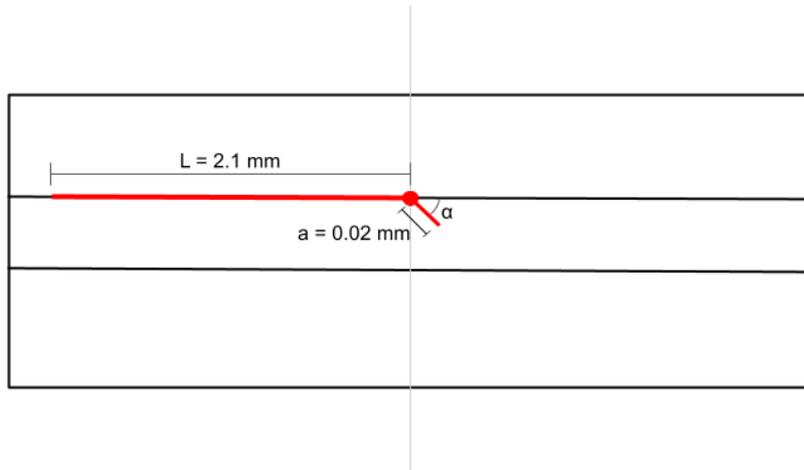


Figura 3-22. Esquema que representa los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de 90

Mucho del trabajo realizado para estos modelos es exactamente igual que el que se hizo para generar los modelos que solo presentan una delaminación. Por este motivo, en el presente apartado y los dos siguientes no se pasará por cada uno de los módulos de ABAQUS, ya que solo se podría repetir información que ya se ha dado haciendo más pesada la lectura.

Para ilustrar la generación de los modelos se usará el de $\alpha=45^\circ$, pero el procedimiento es análogo para cada una de las alfas cambiando únicamente la geometría de las partes que componen el modelo.

3.2.1 Módulo Part

Estos modelos también se generan a partir de dos partes que se crean en este módulo de ABAQUS. Siguen siendo necesarias únicamente dos porque, aunque existan dos grietas, la delaminación y la que se interna en la capa de 90, pueden ser tratadas como una sola al estar una a continuación de la otra.

La geometría de las partes que componen el modelo aparece representada en las imágenes siguientes:

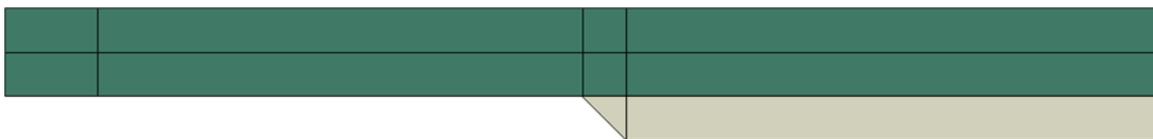


Figura 3-23. Parte superior del modelo con $\alpha = 45^\circ$

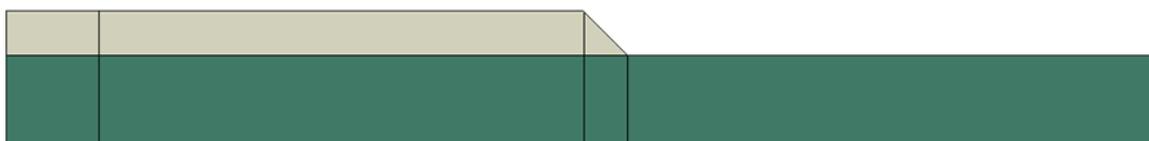


Figura 3-24. Parte inferior del modelo con $\alpha = 45^\circ$

De nuevo se representan en color verde las dos capas de 0 y el color gris la capa de 90. Todas las particiones, líneas, que aparecen en cada una de las partes y que no representan la interfase entre dos capas, han sido creadas para facilitar el trabajo en alguno de los otros módulos de ABAQUS.

3.2.2 Módulo Mesh

El tipo de elementos usado para mallar estos modelos es el mismo que en los modelos anteriores, CPS4R, ya que el problema sigue siendo plano, se está abordando como uno de tensión plana y se recurre a elementos lineales.

Sin embargo, el tipo de mallado ahora sí varía. Al tener las partes que componen el modelo una geometría ligeramente más compleja por la presencia de una línea inclinada (donde se sitúa la grieta que entra en la capa de 90), es necesario usar el tipo de mallado Free en algunas regiones del modelo. Dichas regiones son la capa de 90 y la mitad inferior de la capa de 0 superior (para conseguir que la malla sea igual por encima y por debajo de la delaminación). En las imágenes que aparecen a continuación quedan representadas en color amarillo las zonas donde el mallado es tipo Sweep y en color rosa en las que se usa tipo Free.

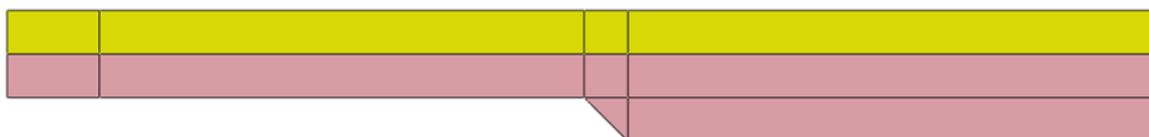


Figura 3-25. Asignación del tipo de mallado a la parte superior del modelo con $\alpha = 45^\circ$

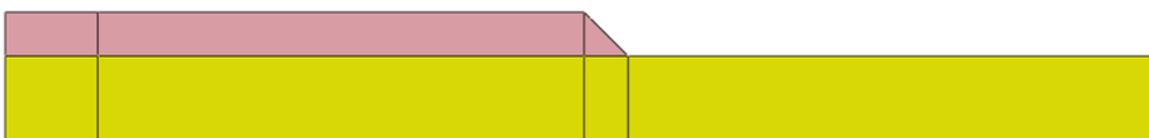


Figura 3-26. Asignación del tipo de mallado a la parte inferior del modelo con $\alpha = 45^\circ$

Una vez definido el tipo de elemento que se va a usar y el tipo de mallado que se va a aplicar a cada región, se colocan las semillas de mallado en cada una de las líneas del modelo.

La zona de interés en estos modelos no es el fondo de la delaminación, sino el fondo de la microgrieta que aparece en la capa de 90 ya que es aquí donde se van a obtener los resultados y el punto a partir del cual la grieta podría crecer.

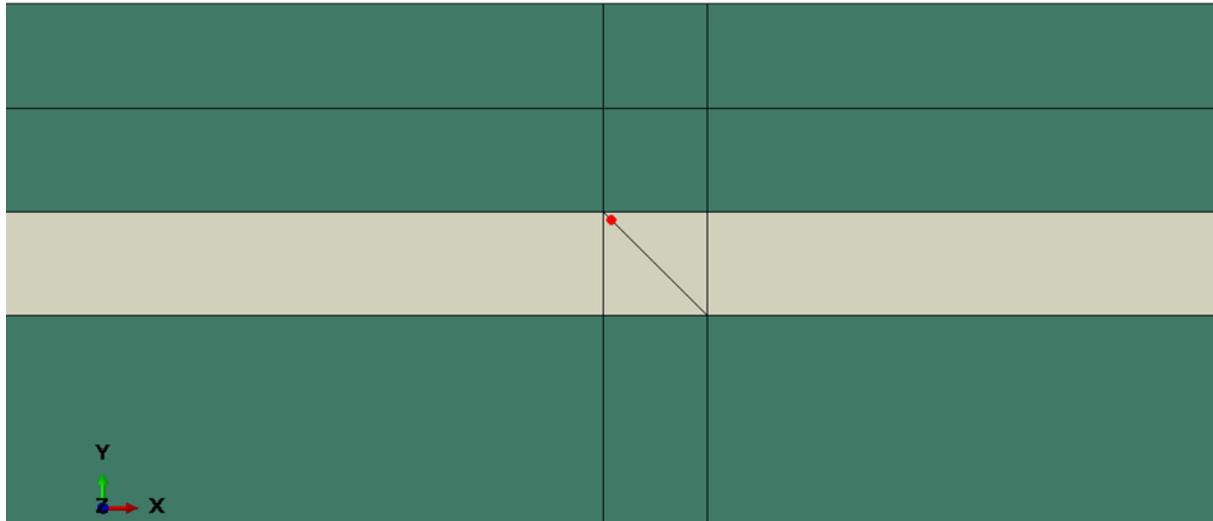


Figura 3-27. Fondo de la grieta que se interna en la capa de 90 (punto rojo)

El tamaño de los elementos que aparecen inmediatamente antes e inmediatamente después del fondo de la microgrieta tienen un tamaño de 0.0001 mm, existiendo en toda la longitud de la misma, 0.02 mm, 441 elementos que van aumentando su tamaño conforme se alejan del fondo de la misma. Todo esto quiere decir que se está trabajando con una malla muy fina que también fue sometida a un análisis de convergencia.

A continuación, se muestran algunas imágenes donde puede apreciarse el aspecto de la malla a lo largo del modelo:

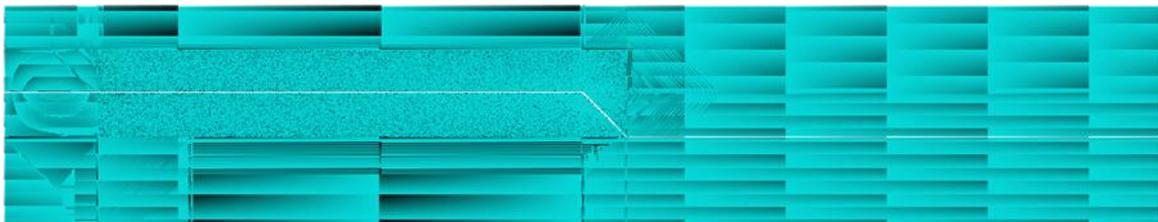


Figura 3-28. Imagen de la malla para el modelo con $\alpha = 45^\circ$

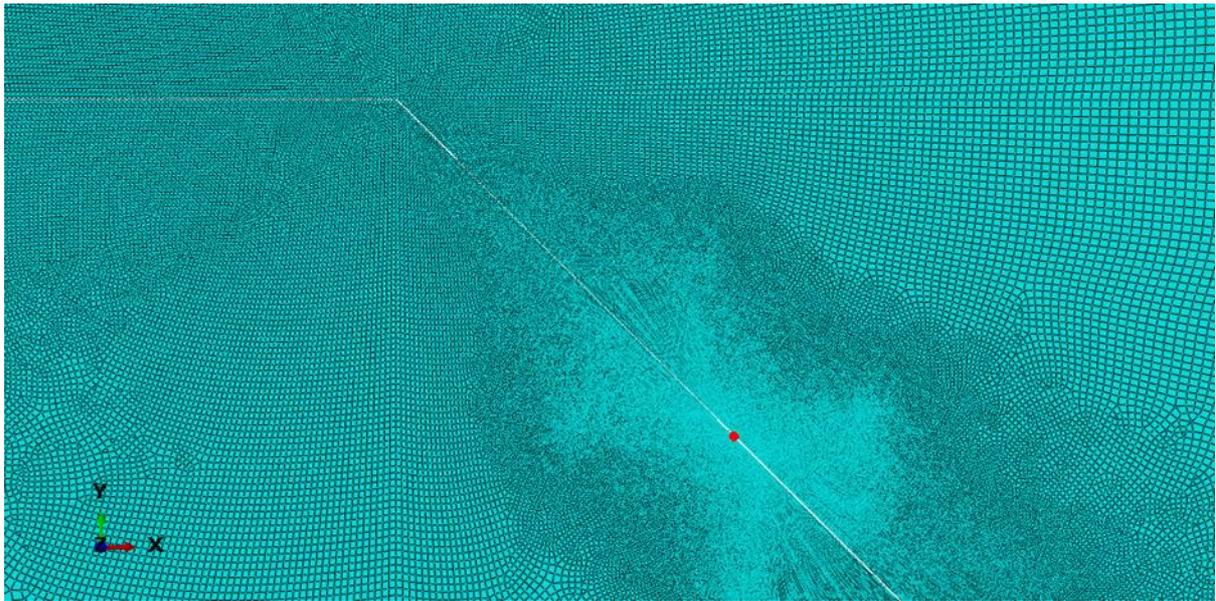


Figura 3-29. Zoom de malla acercándose a la zona de interés (fondo de la grieta señalado con un punto rojo)

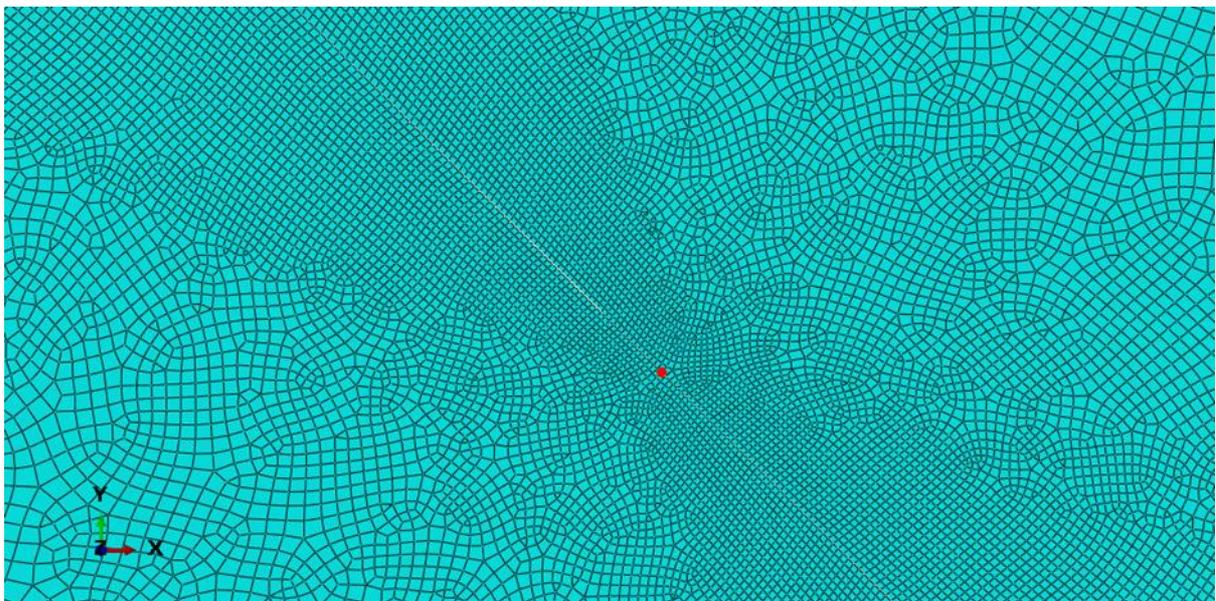


Figura 3-30. Zoom de la malla en la zona de interés (fondo de la grieta señalado con un punto rojo)

3.2.3 Módulo Step

Estos modelos sí se han sometido a un decremento térmico, que simula el efecto del enfriamiento tras el curado, además de a las cargas exteriores que se definen en el módulo Load.

Para generar un cambio de temperatura en ABAQUS solo hay que definir temperaturas diferentes en el step inicial y el step generado por el usuario.

En este caso el decremento térmico con el que se quiere trabajar es de 133°C: de la temperatura de transición vítrea (155°C) a la temperatura ambiente (22°C).

La temperatura se define dentro de cada step, en la opción 'Predefined Fields' del árbol de modelado. Se ha introducido en grados Celsius por las unidades en las que se han añadido los coeficientes de dilatación térmica a la definición de los materiales.

Cuando no quieran considerarse los efectos del decremento térmico, basta con modificar la temperatura asignada a uno de los steps y hacerla igual a la del otro.

3.2.4 Módulo Interaction

Las interacciones necesarias para definir estos modelos son exactamente las mismas que las que se usaron en los modelos anteriores. Es necesario pegar una zona, dejar abiertas la delaminación y la grieta que se encuentra en la capa de 90 y definir una superficie por la que la grieta pueda crecer.

Lo único que cambia son las superficies usadas al definir cada una de las interacciones, ya que la geometría del modelo ha cambiado, pero todo lo demás se mantiene exactamente igual.

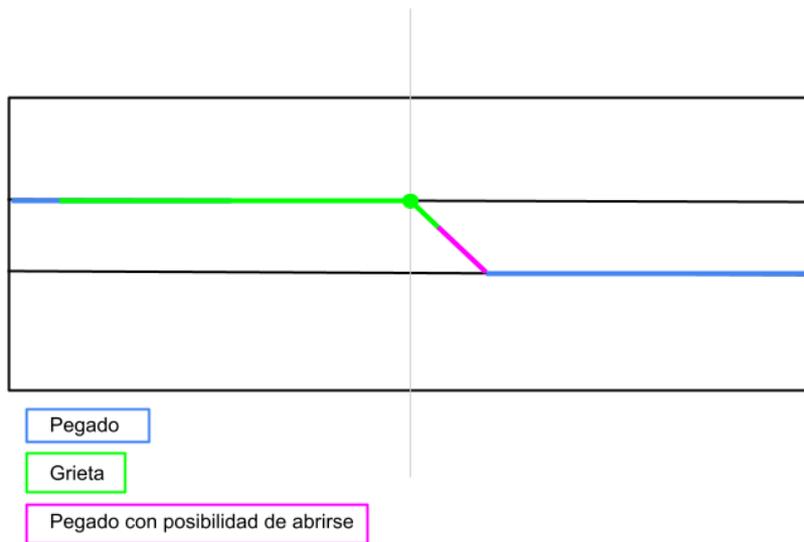


Figura 3-31. Esquema del modelo con la representación de los diferentes tipos de interacciones

- Constraint: Tie

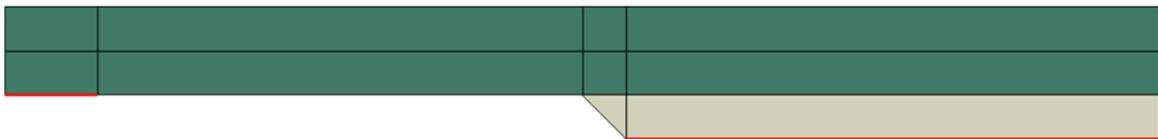


Figura 3-32. Parte superior del modelo con la superficie maestra del pegado marcada

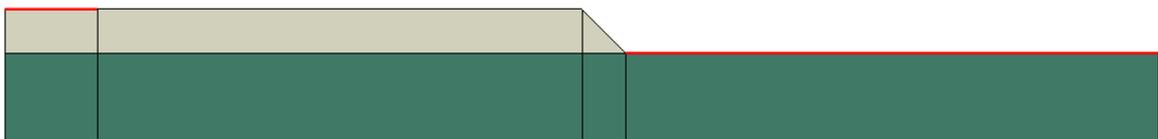


Figura 3-33. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del pegado marcada

- Interaction Property: VCCT

La definición del criterio de fractura es exactamente igual que en los modelos en los que solo aparecía una delaminación.

- Interaction: surface-to-surface contact

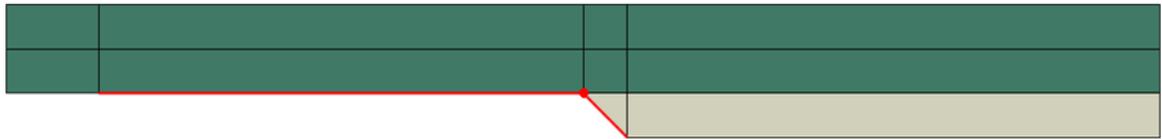


Figura 3-34. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada

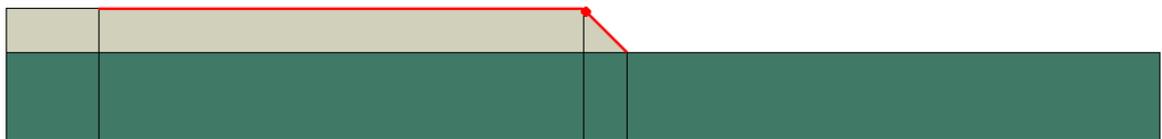


Figura 3-35. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada

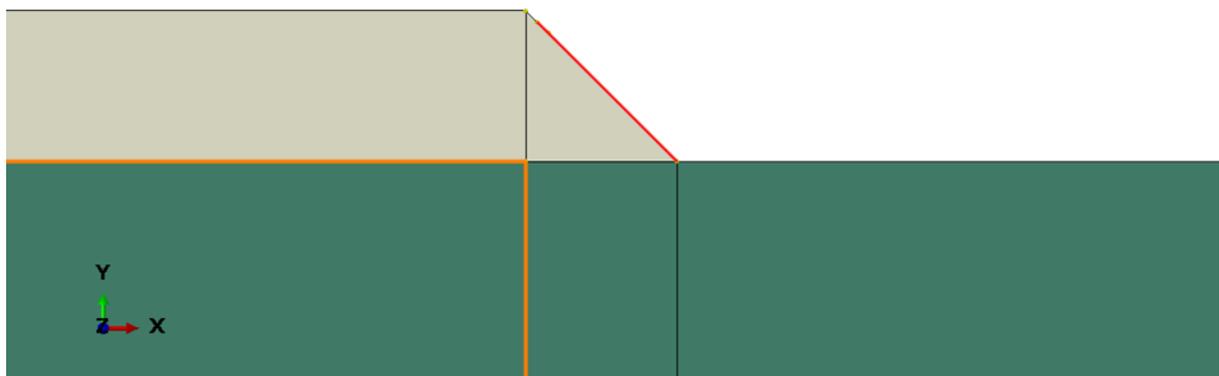


Figura 3-36. Parte inferior del modelo con la superficie por la que puede crecer la grieta marcada (bonding)

3.2.5 Módulo Load

Tras analizar los resultados obtenidos de los modelos en los que solo aparecía una delaminación, se decidió que era más interesante aplicar la condición de contorno en tensiones. Por este motivo, todos los modelos de este apartado y los siguientes, se han estudiado sometidos a una tracción de valor 1195 MPa (tensión de rotura del laminado).

3.3 Grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones

Al observar las micrografías que suponen el punto de partida de este proyecto se pensó que una posibilidad es que primero se produjese la delaminación y, a partir de esta, la grieta que crece a 45° atravesando la capa de 90.

Tras realizar los estudios pertinentes con los modelos anteriormente presentados, se planteó estudiar si habría

mucha diferencia entre lo que ocurre con la delaminación y la grieta que se interna en la capa de 90 y lo que ocurriría si solo existiese esta última.

Para abordar este nuevo estudio se generaron otros seis modelos con diferentes orientaciones de grieta ($\alpha = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 160^\circ$) partiendo de los presentados en el apartado anterior. El único cambio que hay que realizar con respecto a ellos es cerrar la delaminación, es decir, dejar de considerar unas superficies en el contacto para empezar a hacerlo en el pegado.

3.3.1 Módulo Interaction

Como ya se ha mencionado, todo se mantiene igual que en los modelos del apartado anterior, a excepción de la definición de las superficies maestra y esclava tanto del pegado como del contacto.

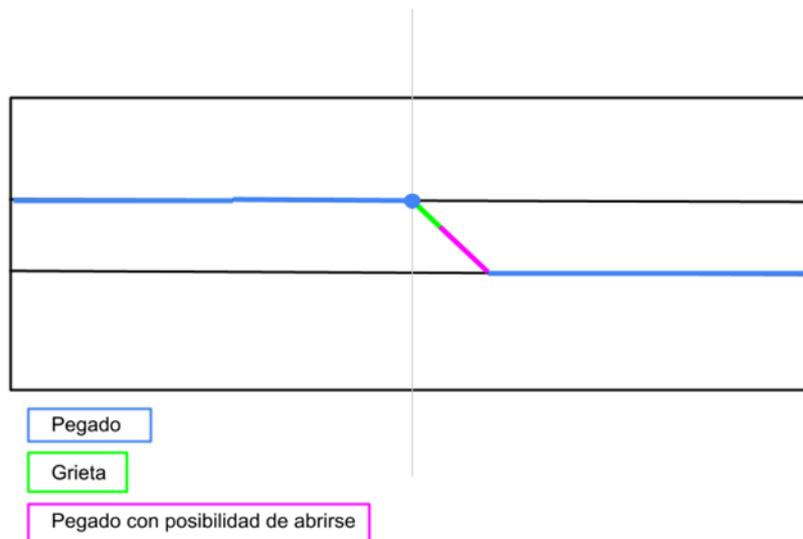


Figura 3-37. Esquema del modelo sin delaminación con la representación de los diferentes tipos de interacciones

Se muestran a continuación, mediante imágenes obtenidas de ABAQUS para el modelo con $\alpha=45^\circ$, las nuevas superficies que intervienen en cada interacción. Quedan así definidos estos modelos, siendo válido todo lo demás explicado en el apartado anterior.

- Constraint: Tie

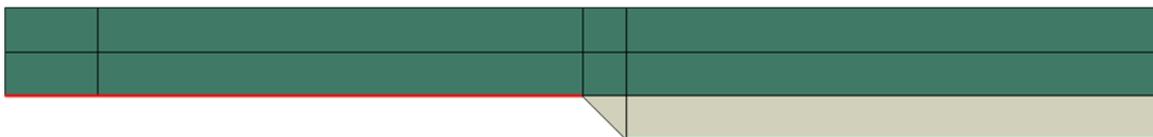


Figura 3-38. Parte superior del modelo con la superficie maestra del pegado marcada



Figura 3-39. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del pegado marcada

- Interaction: surface-to-surface contact

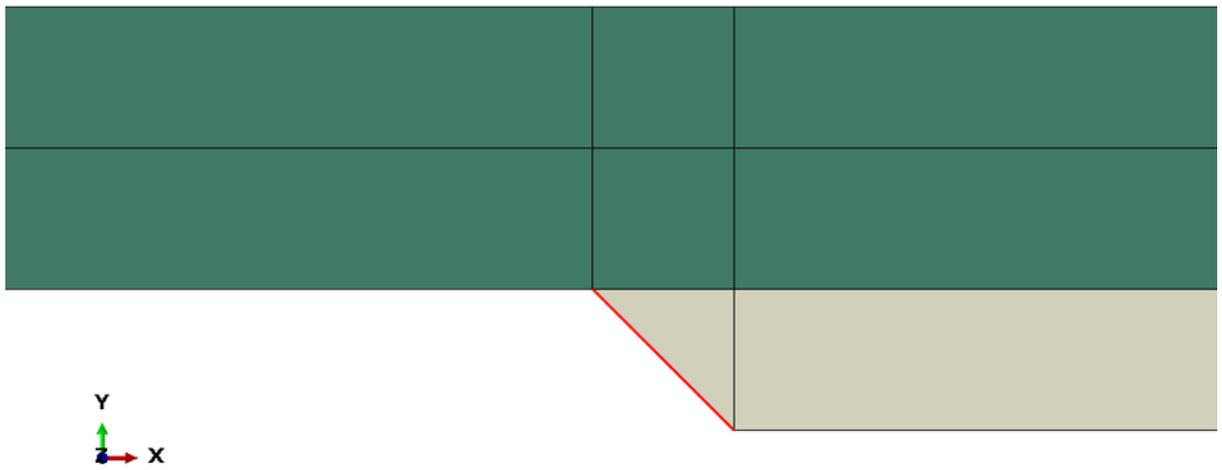


Figura 3-40. Parte superior del modelo con la superficie maestra del contacto marcada

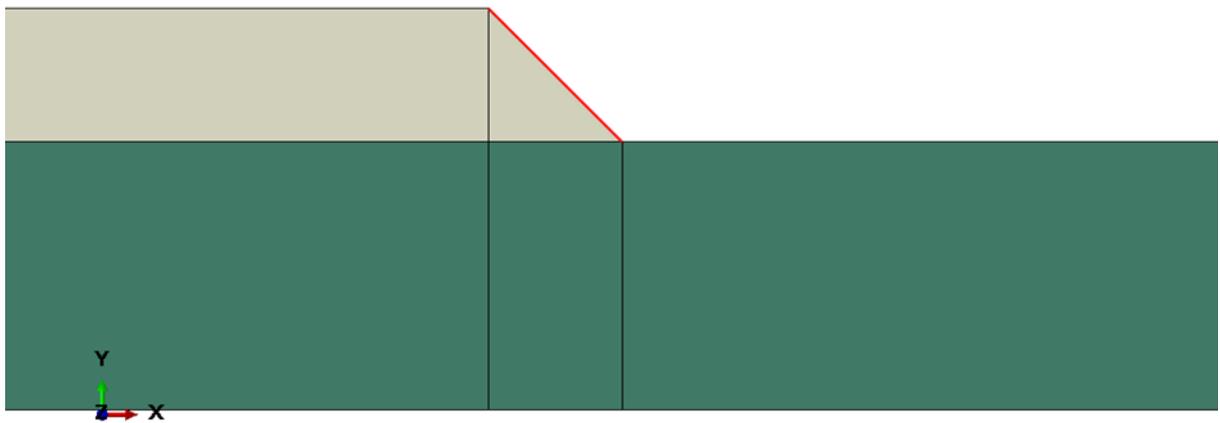


Figura 3-41. Parte inferior del modelo con la superficie esclava del contacto marcada

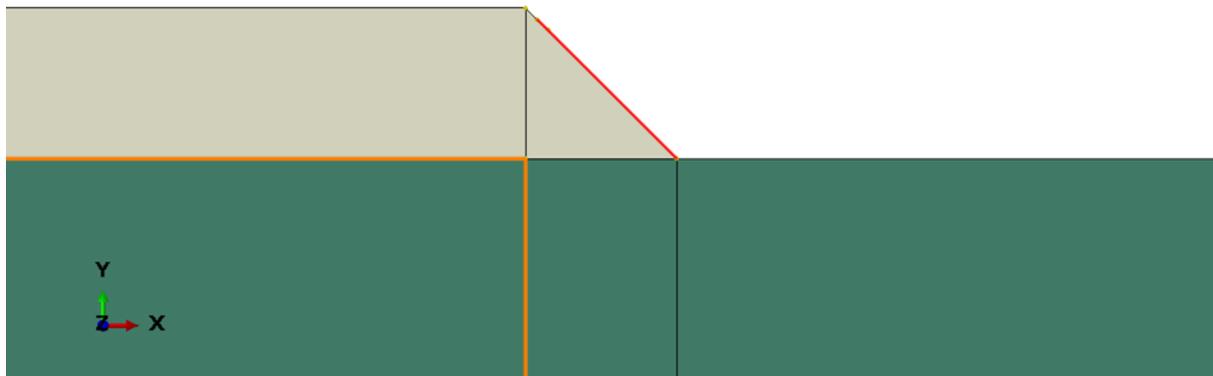


Figura 3-42. Parte inferior del modelo con la superficie por la que la grieta puede crecer marcada (bonding)

3.4 Dos delaminaciones

El último estudio realizado para este proyecto se basa en la idea de que es posible que existan dos delaminaciones de gran tamaño, una en cada interfase.

Se trata de una ampliación de los primeros modelos vistos, ya que se pensó que la presencia de otra delaminación podría variar el comportamiento del material en el fondo de la primera. Si esto fuera así, podría estar aquí la explicación de la aparición de las grietas a 45° en la capa de 90° que se observaban en las micrografías.

En la Figura 3-43 puede verse un esquema que refleja la forma de este modelo:

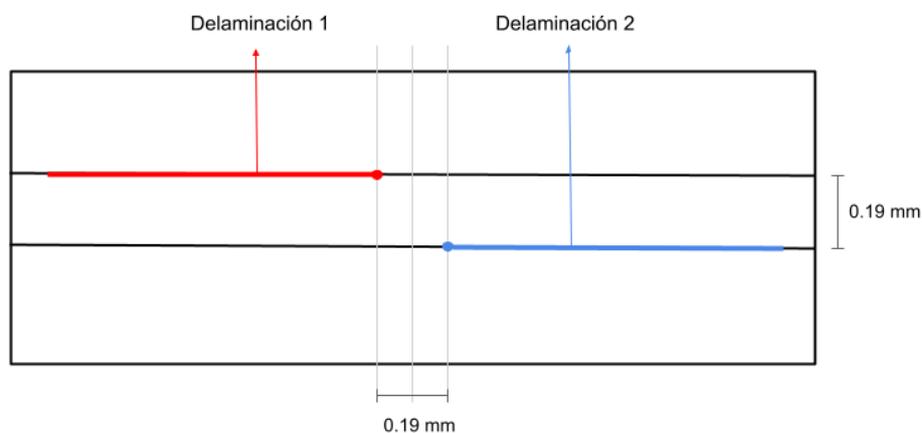


Figura 3-43. Esquema del modelo con dos delaminaciones

Solo se ha realizado un modelo planteando esta idea, en el que ambas delaminaciones tienen un tamaño de 2.1 mm.

En este apartado tampoco se explicará lo realizado en cada uno de los módulos de ABAQUS para evitar repetir información que ya ha sido aportada.

3.4.1 Módulo Part

En este modelo, al existir dos delaminaciones y estar estas localizadas en interfases diferentes, es necesario definir tres partes.

Existirá ahora una parte para cada una de las capas que integran el modelo, tal y como puede verse en las

siguientes imágenes:

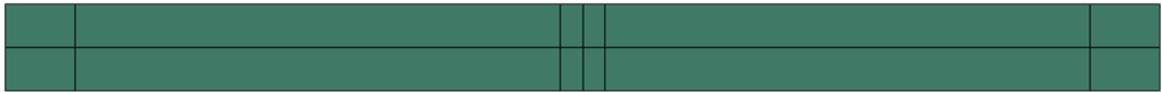


Figura 3-44. Parte superior del modelo con dos delaminaciones



Figura 3-45. Parte central del modelo con dos delaminaciones

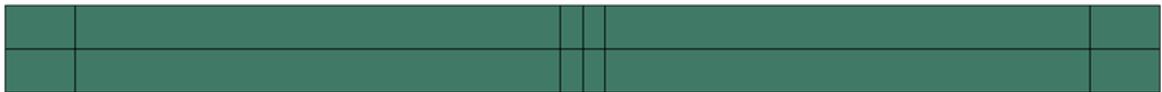


Figura 3-46. Parte inferior del modelo con dos delaminaciones

Igual que en todos los modelos ya vistos, las particiones que aparecen en cada una de las capas tienen utilidad en otros módulos de ABAQUS, ya sea a la hora de definir superficies o de colocar las semillas de mallado.

3.4.2 Módulo Mesh

Los elementos usados para mallar este modelo son los mismos que se han utilizado hasta el momento (CPS4R), debido a que el enfoque del problema no ha variado.

En cuanto al tipo de mallado, ahora también existen zonas en las que se ha aplicado el tipo Free. A pesar de que la geometría de este modelo es bastante sencilla (no existen líneas inclinadas como en los modelos de los dos últimos apartados), la colocación de las semillas de mallado es más cómoda si se usa el mallado tipo Free en algunas zonas, ya que ABAQUS nos da una mayor libertad de esta manera que usando cualquiera de los otros dos tipos de mallado. Las zonas de las que se habla son la capa de 90 y las mitades inferior y superior de las capas de 0 superior e inferior, respectivamente, es decir, las regiones que aparecen de color rosa en las siguientes imágenes. El resto del modelo se malla usando el tipo Sweep (color amarillo).

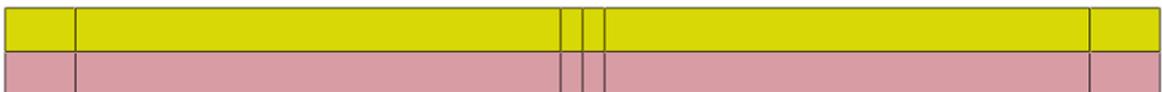


Figura 3-47. Asignación del tipo de mallado a la parte superior del modelo con dos delaminaciones



Figura 3-48. Asignación del tipo de mallado a la parte central del modelo con dos delaminaciones

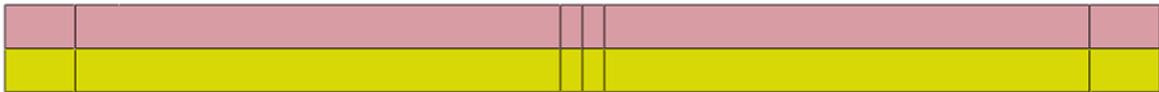


Figura 3-49. Asignación del tipo de mallado a la parte inferior del modelo con dos delaminaciones

A la hora de colocar las semillas de mallado hay que tener en cuenta que las zonas de interés en este modelo y, por tanto, donde la malla debe ser más fina son los fondos de grieta de ambas delaminaciones.

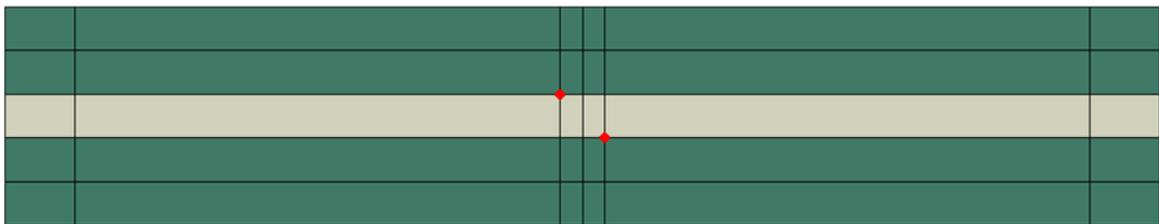


Figura 3-50. Imagen del modelo completo con los fondos de las dos delaminaciones marcados con puntos rojos

Las semillas de mallado se han colocado de manera que: la malla es la misma para ambas delaminaciones, igual por encima y por debajo de cada una de ellas y simétrica por delante y por detrás de cada uno de los fondos.

El tamaño de los elementos que se encuentran justo delante y detrás del fondo de cada una de las delaminaciones es de 0.0006 mm. Esto quiere decir que la malla en este modelo es un poco más gruesa que en todos los expuestos hasta el momento, pero es suficientemente fina para obtener buenos resultados en los análisis que quieren realizarse con el mismo.

Se muestra, en las siguientes imágenes el aspecto que presenta la malla:

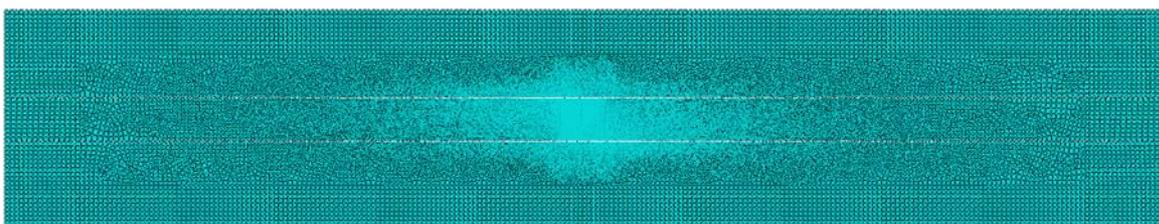


Figura 3-51. Visión completa de la malla del modelo con dos delaminaciones

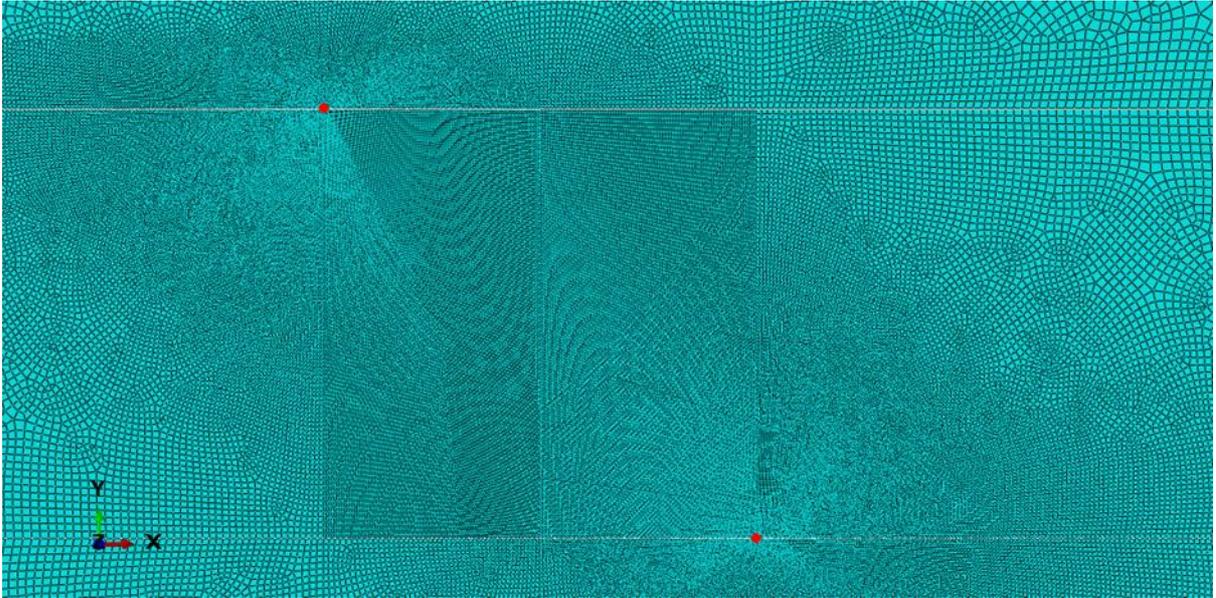


Figura 3-52. Zoom de la malla acercándose a la zona de interés (los dos fondos marcados con puntos rojos)

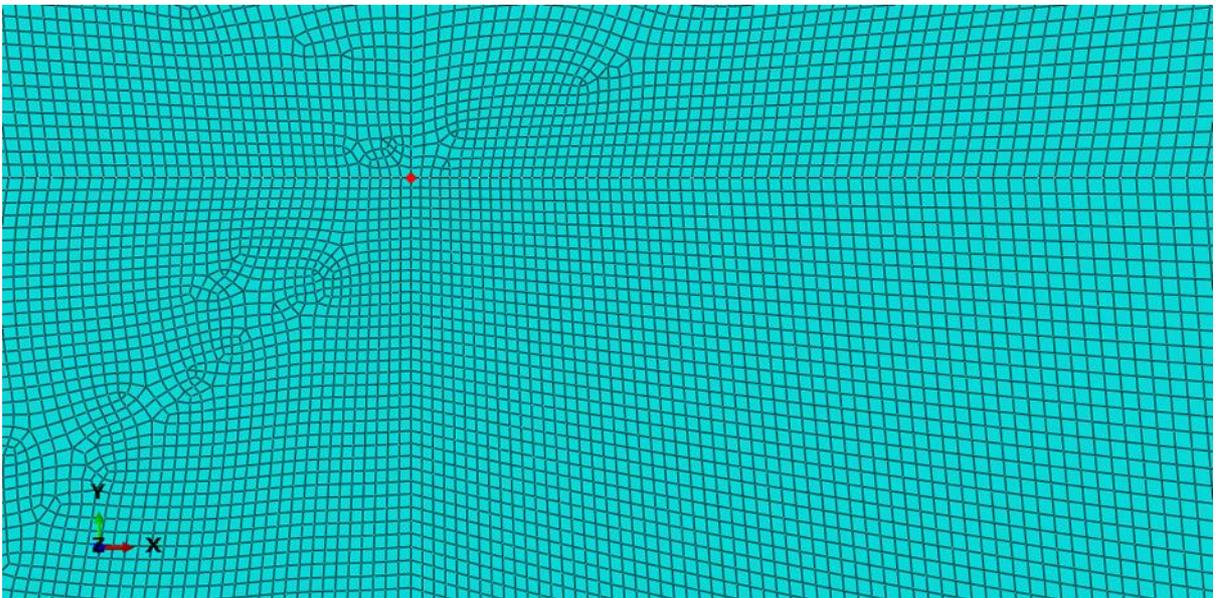


Figura 3-53. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo)

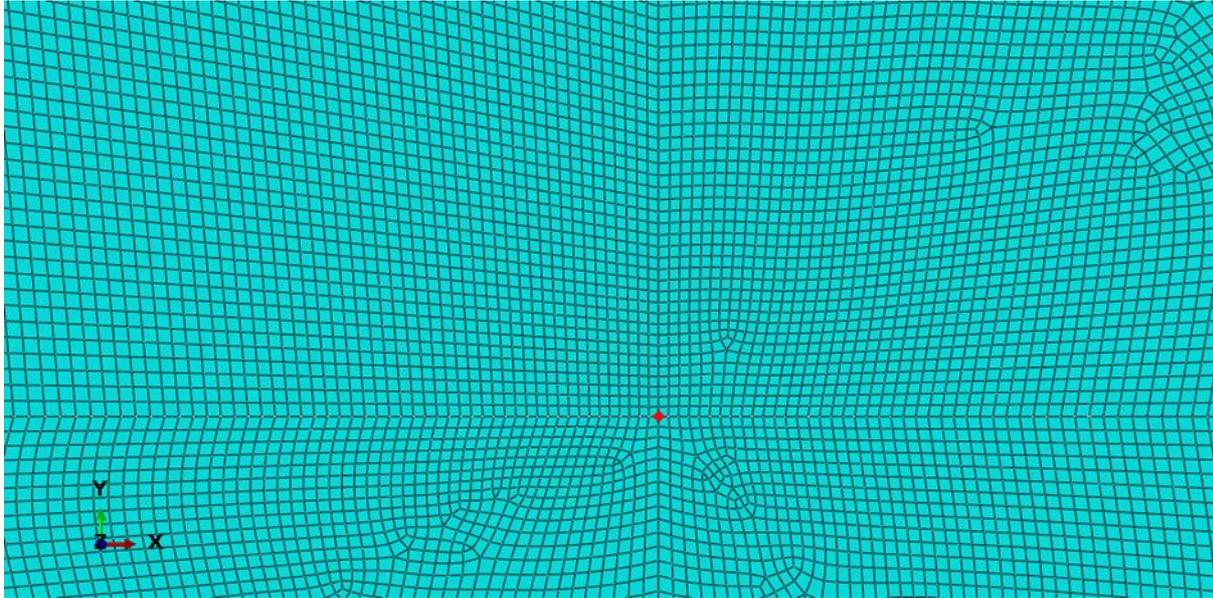


Figura 3-54. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo)

3.4.3 Módulo Interaction

Los tipos de interacciones necesarios para definir este modelo son los mismos que los usados en todos los modelos anteriores. Sin embargo, el hecho de que ahora existan dos delaminaciones independientes exige que se generen dos contactos.

Existen ahora dos zonas en las que es necesario pegar las superficies pertenecientes a dos partes diferentes, dos zonas en las que las superficies se mantienen separadas (que representan las delaminaciones) y dos zonas en las que en un principio las dos superficies se comportan como una sola, pero pueden separarse en caso de que la grieta crezca.



Figura 3-55. Esquema del modelo con dos delaminaciones con representación de los diferentes tipos de interacciones

Se han definido, por tanto, dos contactos, como ya se ha mencionado, para poder generar ambas grietas. Además, para pegar las zonas señaladas en color azul en la imagen anterior se ha usado una restricción tipo Tie para cada zona, aunque podría haberse hecho con una sola definiendo las superficies de manera discontinua. Esta decisión se tomó porque así queda más claro al solo intervenir dos partes de las que constituyen el modelo

en cada interacción.

La definición del criterio de fractura VCCT es exactamente como se ha visto anteriormente y se usa para ambos contactos. Una pequeña diferencia es que hay que definir dos grietas, es decir, existirán dos ‘Crack (Debond using VCCT)’, una asignada a cada uno de los contactos y, por tanto, modelando cada una de las delaminaciones.

- Constraint: Tie 1

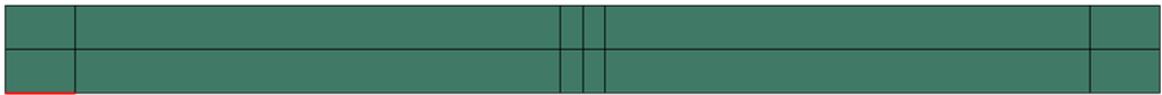


Figura 3-56. Parte superior del modelo con la superficie maestra del primer pegado marcada



Figura 3-57. Parte central del modelo con la superficie esclava del primer pegado marcada

- Constraint: Tie 2



Figura 3-58. Parte central del modelo con la superficie esclava del segundo pegado marcada

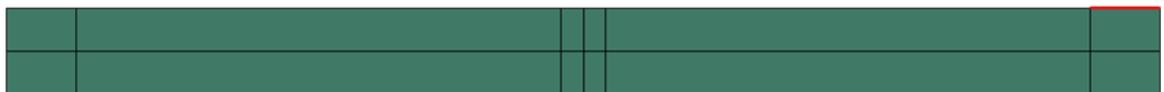


Figura 3-59. Parte inferior del modelo con la superficie maestra del segundo pegado marcada

- Interaction: surface-to-surface contact 1

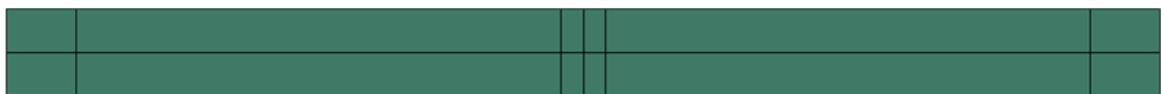


Figura 3-60. Parte superior del modelo con la superficie maestra del primer contacto marcada



Figura 3-61. Parte central del modelo con la superficie esclava del primer contacto marcada



Figura 3-62. Parte central del modelo con la superficie por la cual la delaminación puede crecer marcada (bonding)

- Interaction: surface-to-surface contact 2



Figura 3-63. Parte central del modelo con la superficie esclava del segundo contacto marcada

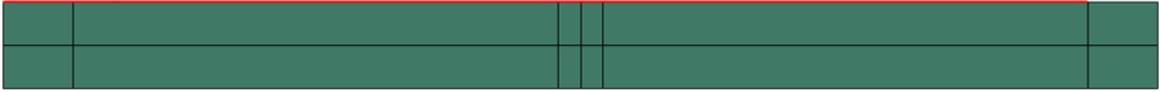


Figura 3-64. Parte inferior del modelo con la superficie maestra del segundo contacto marcada



Figura 3-65. Parte central del modelo con la superficie por la cual la delaminación puede crecer marcada (bonding)

4 RESULTADOS

Una vez definidos los modelos con los que se ha trabajado en el presente proyecto, se abre este capítulo con la finalidad de exponer los resultados que se han ido obteniendo y las decisiones que se han ido tomando en base a ellos.

Es este capítulo el de mayor interés del documento, pero no puede abordarse sin haber explicado todo lo que aparece en los capítulos anteriores que es, al fin y al cabo, lo que permite obtener los resultados que se presentan en este.

Se irán presentando, analizando y explicando los resultados en orden cronológico, es decir, en el orden en que se fueron obteniendo, con la finalidad de que el lector entienda el porqué de los pasos que se han seguido en la realización del proyecto.

4.1 Modelo con delaminaciones de diferentes tamaños

Tras analizar las micrografías en las que se observa el daño que supone el punto de partida de este proyecto, se planteó qué estudio debería abordarse en primer lugar.

Como ya se ha comentado, de entre las diferentes posibilidades existentes, se realizó la suposición de que existiese una delaminación y que, en algún determinado momento, creciera desde su fondo una grieta que se internara en la capa de 90 con una orientación de 45° respecto a la interfase.

Partiendo de esta suposición, pareció interesante realizar modelos con delaminaciones de diferentes tamaños para ver si en algún caso se obtenían indicios de que fuera posible que se generara una grieta a 45° en la capa de 90. Dichos indicios se buscaron basando los análisis en el criterio de máxima tensión circunferencial: respecto al fondo de la delaminación la orientación más probable de generación de una grieta es aquella en la que las tensiones circunferenciales sean mayores.

Los tamaños de delaminación que se consideraron, ya mencionados en el capítulo anterior, son 0.02, 1.25, 1.875, 2.1, 2.4 y 2.5 mm. Se parte de una delaminación muy pequeña, teniendo en cuenta que el ancho del modelo es de 5 mm, y se llega hasta un modelo en el que la mitad de la interfase superior completa se encuentra delaminada.

Estos modelos han sido analizados solo ante la acción de la carga mecánica a tracción. Se han obtenido y analizado los resultados aplicando la condición de contorno tanto en tensiones como en desplazamiento.

A continuación, se presentan los mapas de tensiones circunferenciales, representados solo en la capa de 90 y, más concretamente, en la zona de interés, es decir, en el fondo de la delaminación. Aunque a la vista de las diferentes figuras parezca que las mallas son diferentes, para todos los modelos en el fondo de la delaminación el mallado se ha realizado exactamente de la misma manera. En algunas parece que los elementos son más grandes que en otras, pero esto es debido al zoom usado para extraer las imágenes del programa.

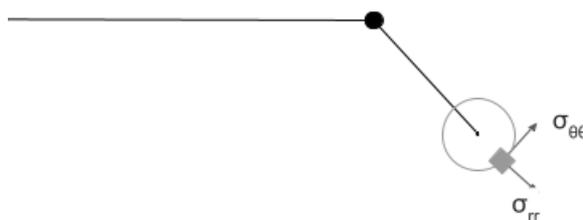


Figura 4-1. Esquema de la delaminación y la grieta de 90 en el que se define la tensión circunferencial

- Delaminación de 0.02 mm

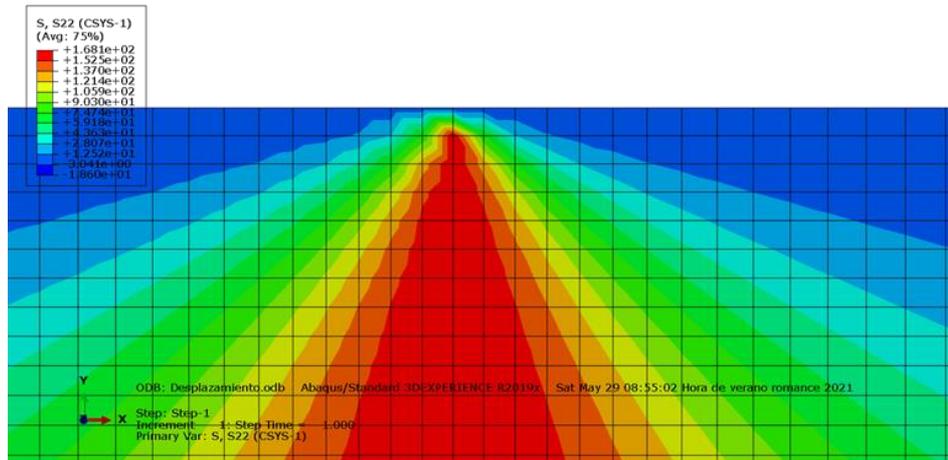


Figura 4-2. Mapa de tensiones circunferenciales para la grieta de 0.02 mm y condición de contorno en desplazamiento

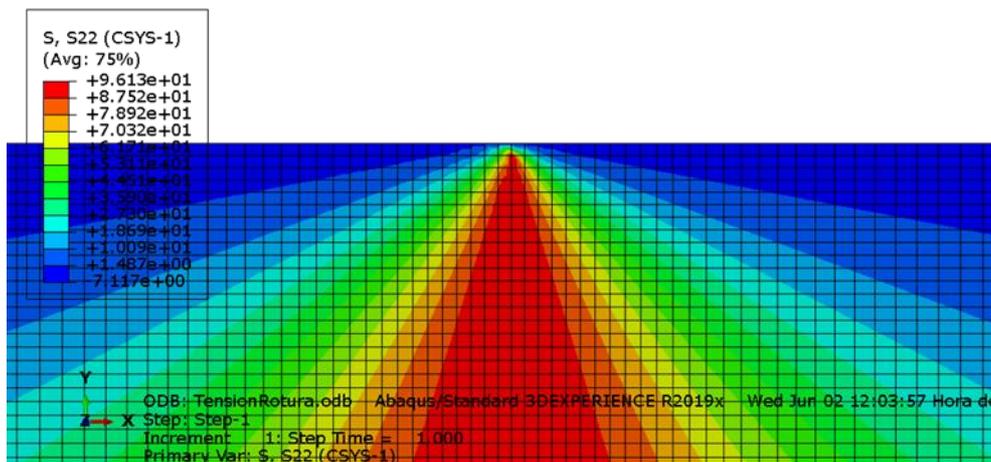


Figura 4-3. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 0.02 mm y condición de contorno en tensiones

- Delaminación de 1.25 mm

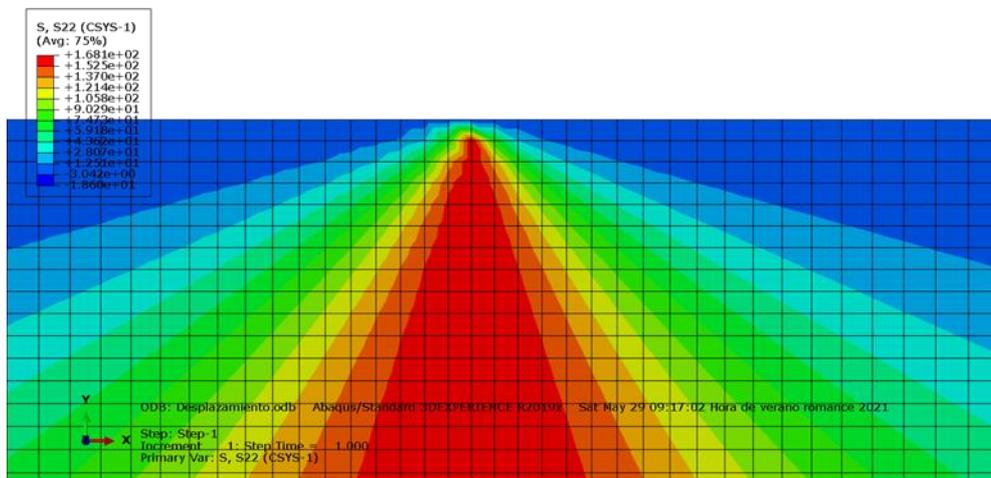


Figura 4-4. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm y condición de contorno en desplazamiento

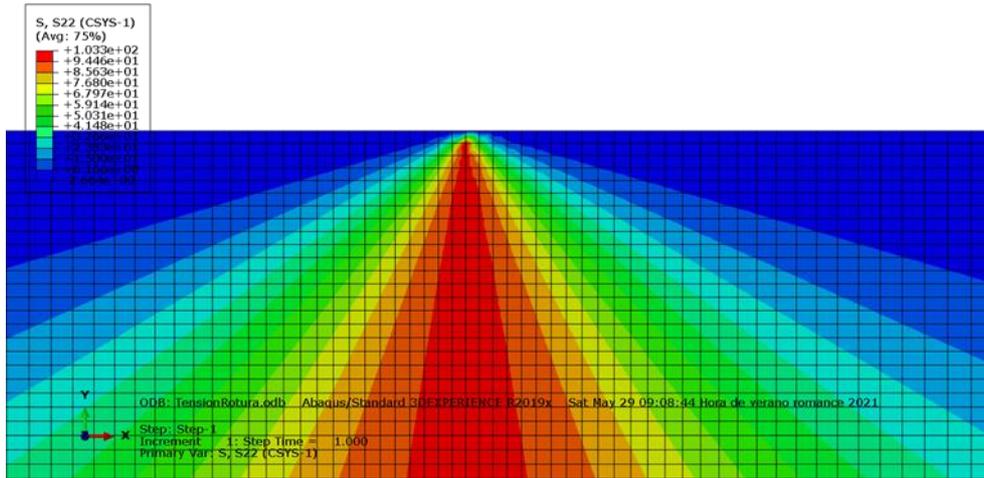


Figura 4-5. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm y condición de contorno en tensiones

- Delaminación de 1.875 mm

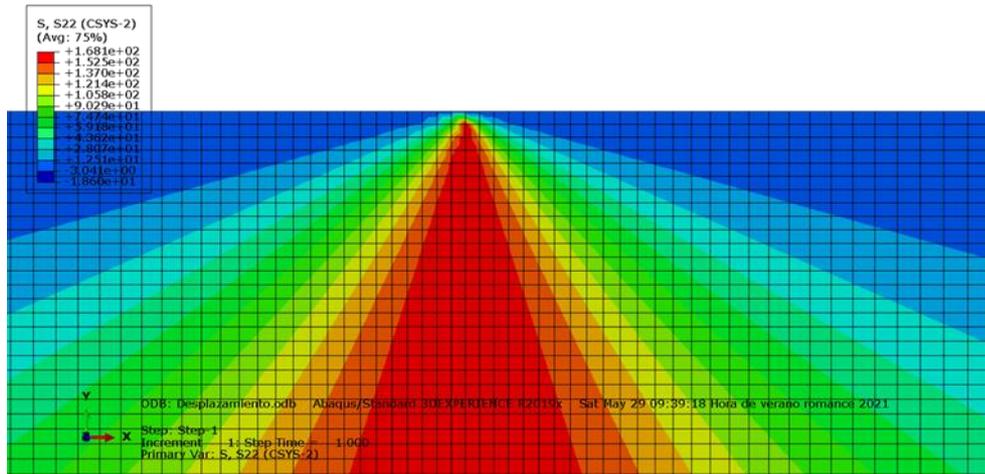


Figura 4-6. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.875 mm y condición de contorno en desplazamiento

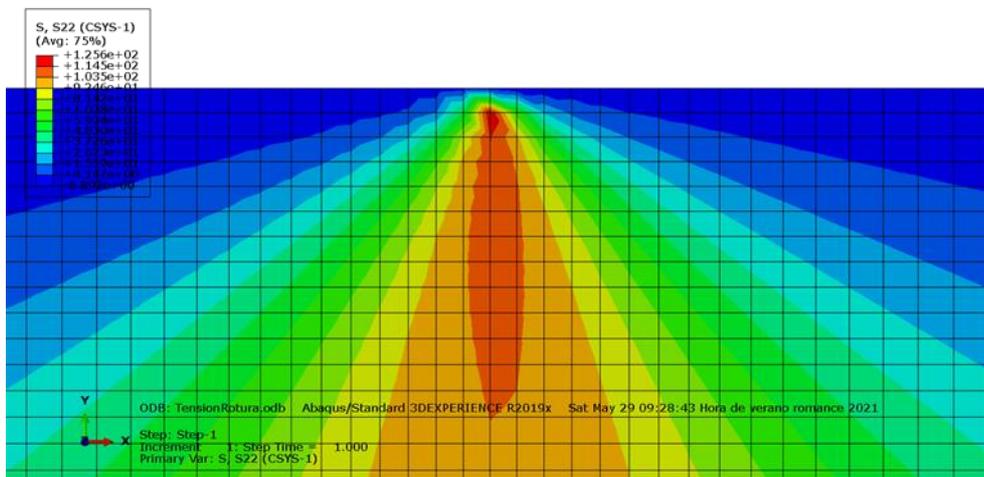


Figura 4-7. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.875 mm y condición de contorno en tensiones

- Delaminación de 2.1 mm

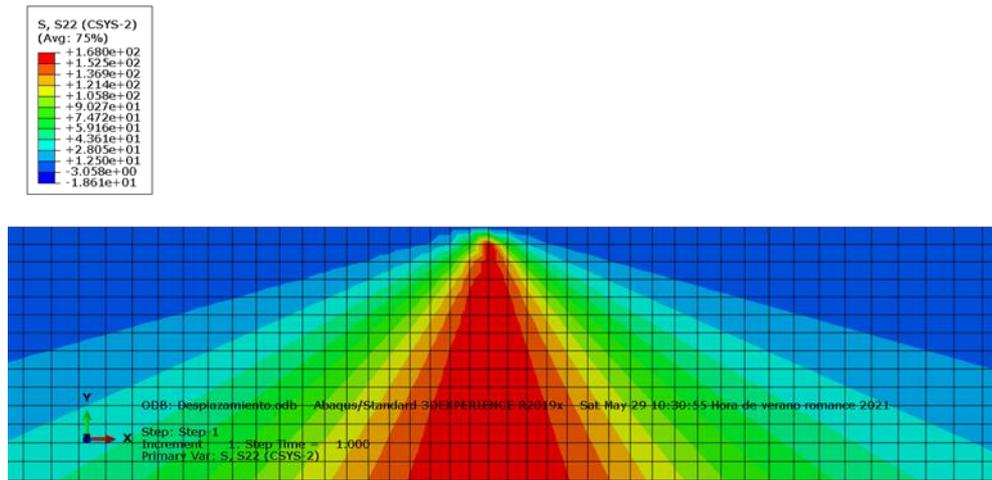


Figura 4-8. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm y condición de contorno en desplazamiento

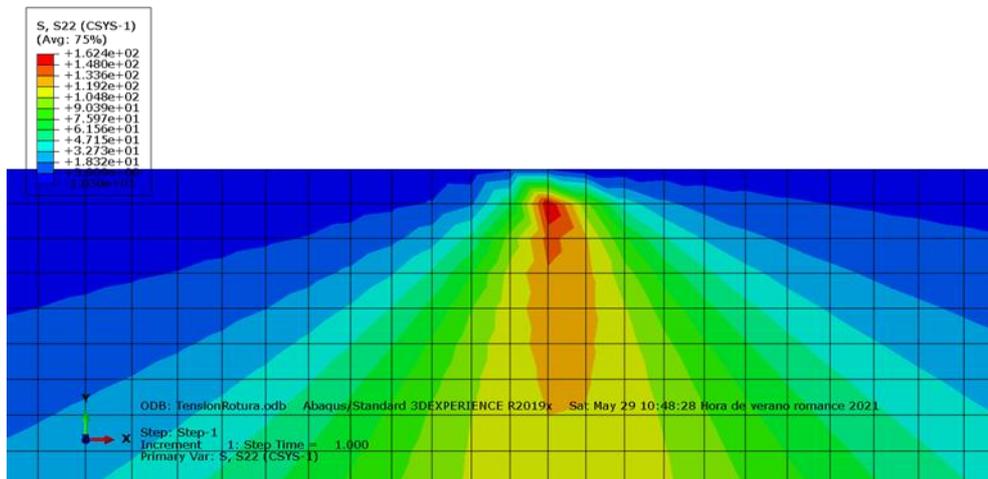


Figura 4-9. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm y condición de contorno en tensiones

- Delaminación de 2.4 mm

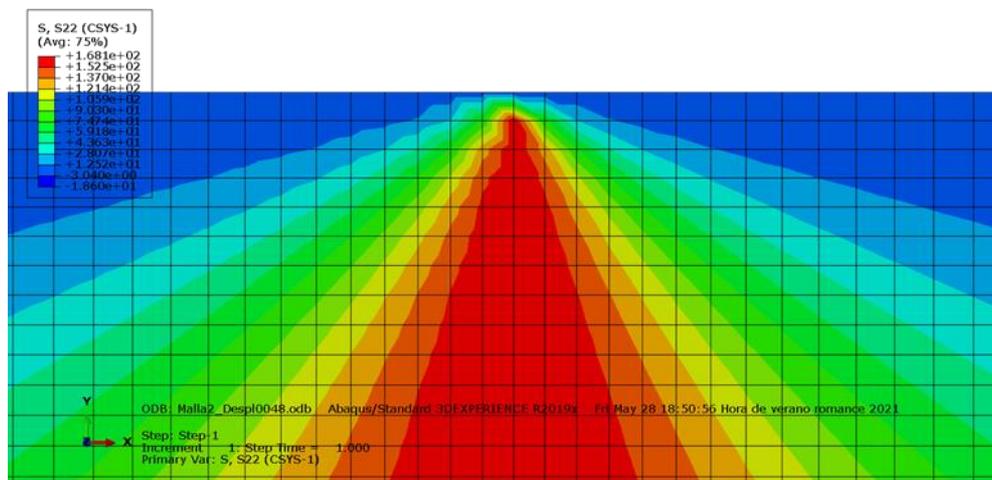


Figura 4-10. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.4 mm y condición de contorno en

desplazamiento

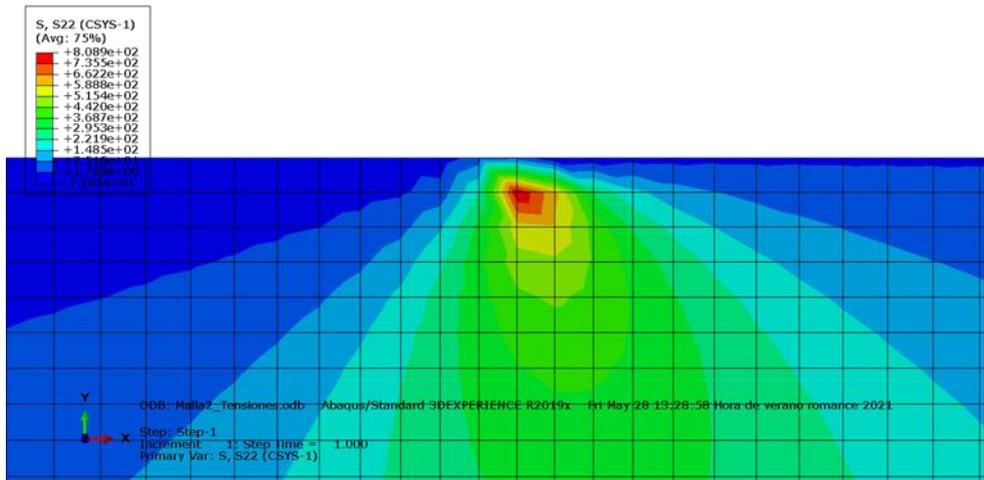


Figura 4-11. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.4 mm y condición de contorno en tensiones

- Delaminación de 2.5 mm

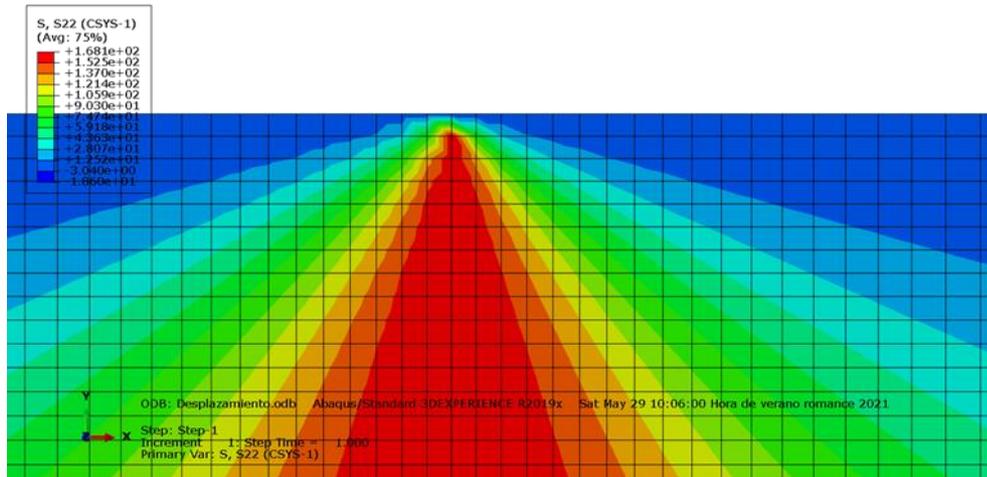


Figura 4-12. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.5 mm y condición de contorno en desplazamiento

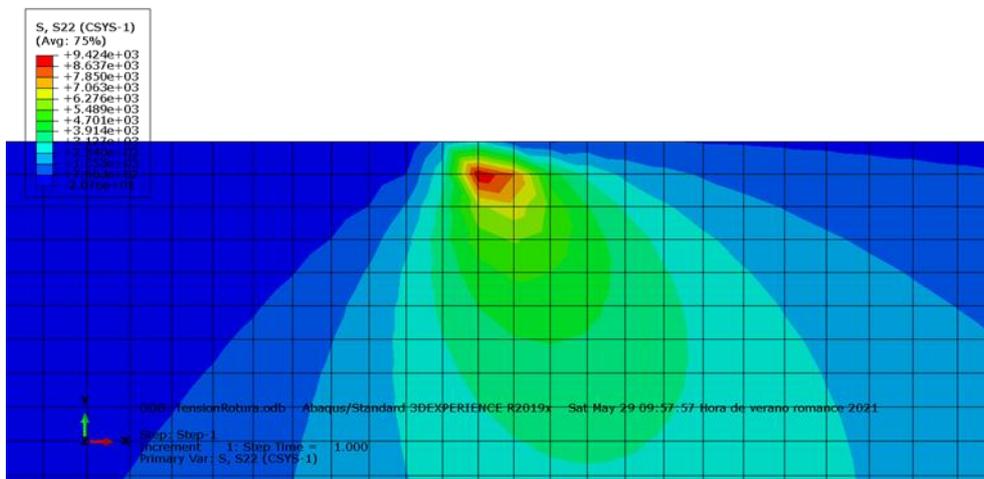


Figura 4-13. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.5 mm y condición de contorno en tensiones

Analizando estos mapas de tensiones puede verse que aplicando la condición de contorno en desplazamientos, la tensión circunferencial máxima que aparece es igual para cada uno de los tamaños de la delaminación, $1.681 \cdot 10^2$ MPa. Además, la zona donde aparece este valor de tensión está claramente orientada a 90° con respecto a la interfase. Esto quiere decir que, de momento, no parece que la presencia de la delaminación en el laminado vaya a hacer que aparezca una grieta a 45° en la capa de 90° .

Sin embargo, si se observan los mapas obtenidos cuando se impone la condición de contorno en tensiones, parece verse algo más interesante. En primer lugar, la zona donde aparece la tensión circunferencial máxima se va haciendo más pequeña conforme aumenta el tamaño de la delaminación, apareciendo una zona de concentración de tensiones mejor definida. Por otra parte, el valor de esta tensión circunferencial máxima también va aumentando con la longitud de la delaminación.

Las diferencias que aparecen al aplicar la condición de contorno en tensiones y desplazamiento pueden deberse a que al hacerlo de la primera manera los desplazamientos longitudinales de las capas de 0° y 90° son diferentes. Esto, en presencia de una delaminación grande, puede afectar a los desplazamientos relativos entre una capa y otra y también a las tensiones que aparecen en el fondo de grieta. Se muestran en las figuras 4-14 y 4-15 las deformadas para el modelo en el que la delaminación tiene un tamaño de 2.1 mm y en las figuras 4-16 y 4-17 las deformadas para el modelo con delaminación de 2.5 mm, ya que en este caso se ve mucho mejor el efecto anteriormente mencionado de la aplicación de la condición de contorno en tensiones.

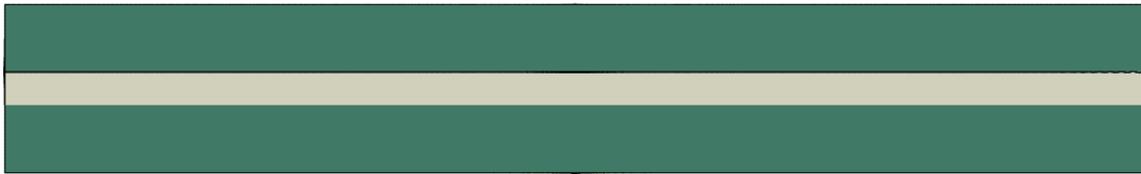


Figura 4-14. Deformada del modelo con delaminación de 2.1 mm aplicando la condición de contorno en desplazamiento

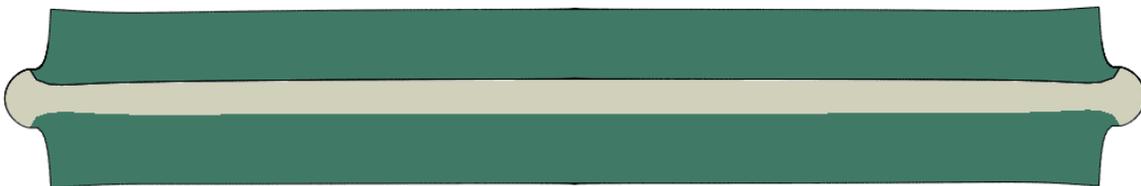


Figura 4-15. Deformada del modelo con delaminación de 2.1 mm aplicando la condición de contorno en tensiones

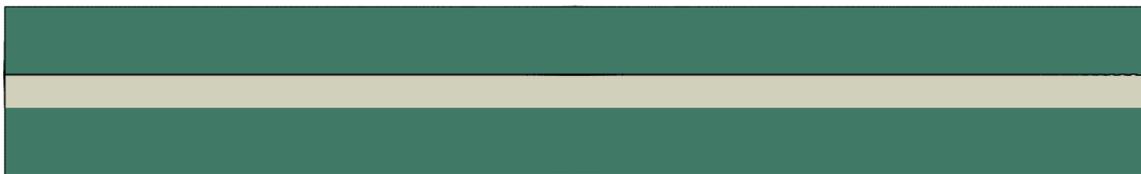


Figura 4-16. Deformada del modelo con delaminación de 2.5 mm aplicando la condición de contorno en desplazamiento

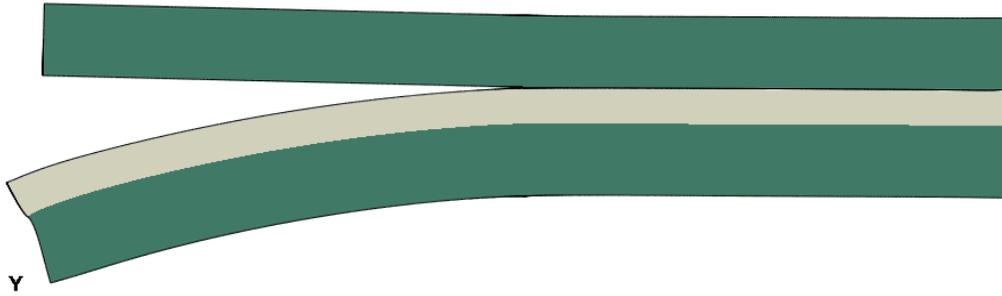


Figura 4-17. Deformada del modelo con delaminación de 2.5 mm aplicando la condición de contorno en tensiones

No obstante, lo más interesante es que al aplicar la condición de contorno de esta segunda manera, parece que con delaminaciones pequeñas la zona de concentración de tensiones sigue orientada a 90° con respecto a la horizontal, pero al aumentar el tamaño de la delaminación, no. Si se analiza bien la forma de la zona de máxima tensión circunferencial, en este caso, puede verse que aparenta una ligera orientación a 45° aunque no exactamente desde el nodo que representa el fondo de la grieta, sino desde el inmediatamente anterior (la distancia entre ambos es de 0.0001 mm). Esto puede apreciarse en la siguiente imagen en la que se ha aumentado el zoom, para el mapa de tensiones circunferenciales con condición de contorno en tensiones en el modelo con delaminación de 2.1 mm:

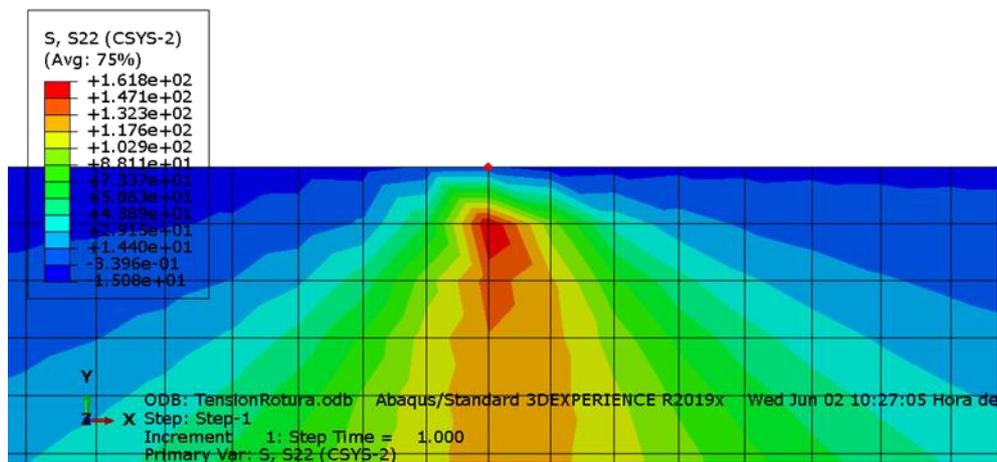


Figura 4-18. Zoom en la zona de interés del mapa de tensiones circunferenciales para la grieta de 2.1 mm y condición de contorno en tensiones (fondo de la delaminación marcado)

Profundizando un poco más en este mapa de tensiones circunferenciales, se decide obtener la evolución de esta variable con α , ángulo con respecto a la horizontal, para diferentes radios. La malla no está preparada para realizar esta operación, pero puede abordarse de manera aproximada.

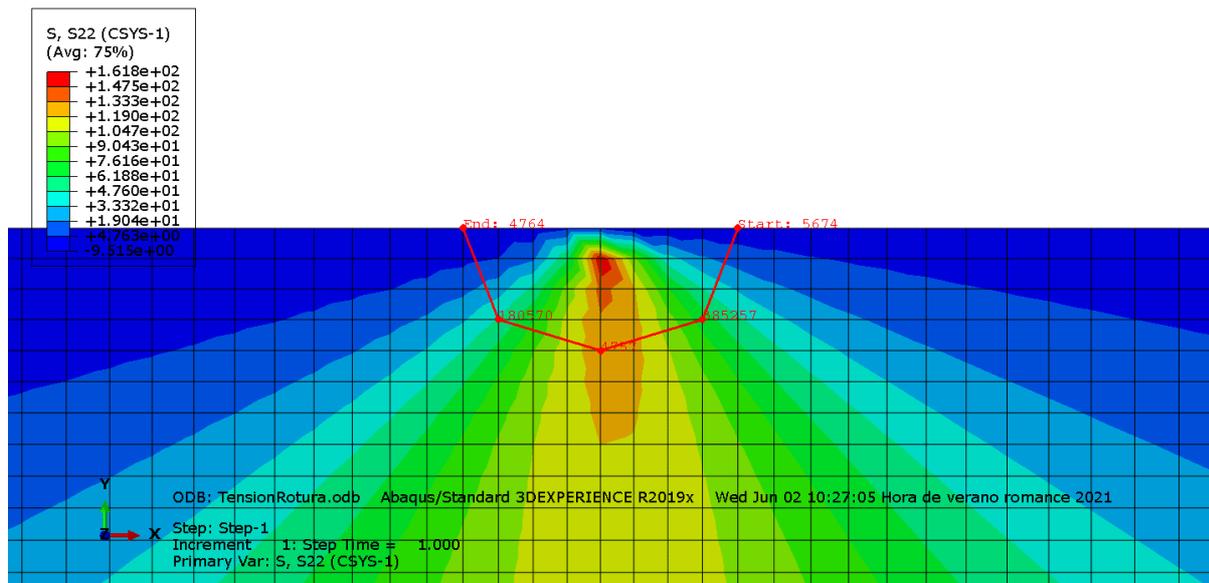


Figura 4-19. Representación de los nodos usados para el estudio aproximado con $r = 4E-4$ mm

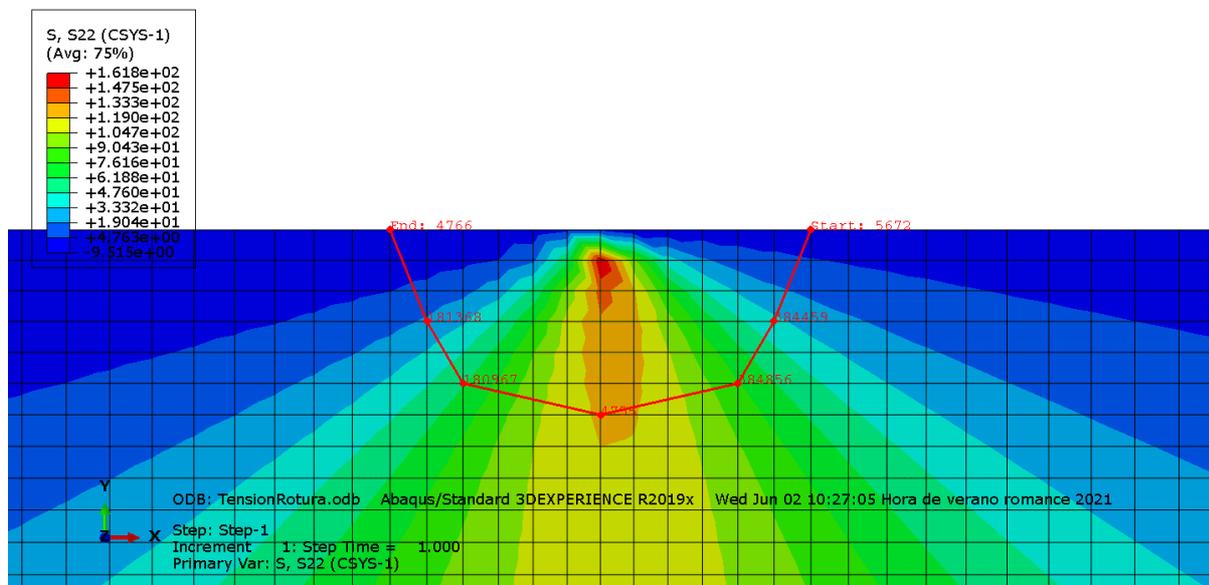


Figura 4-20. Representación de los nodos usados para el estudio aproximado con $r = 6E-4$ mm

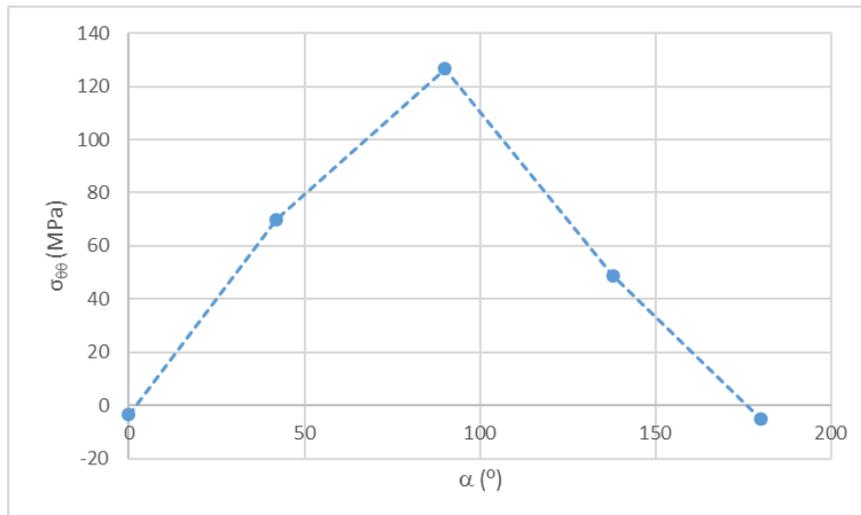


Gráfico 4-1. Evolución de las tensiones circunferenciales para el estudio aproximado con $r = 4 \cdot 10^{-4}$ mm

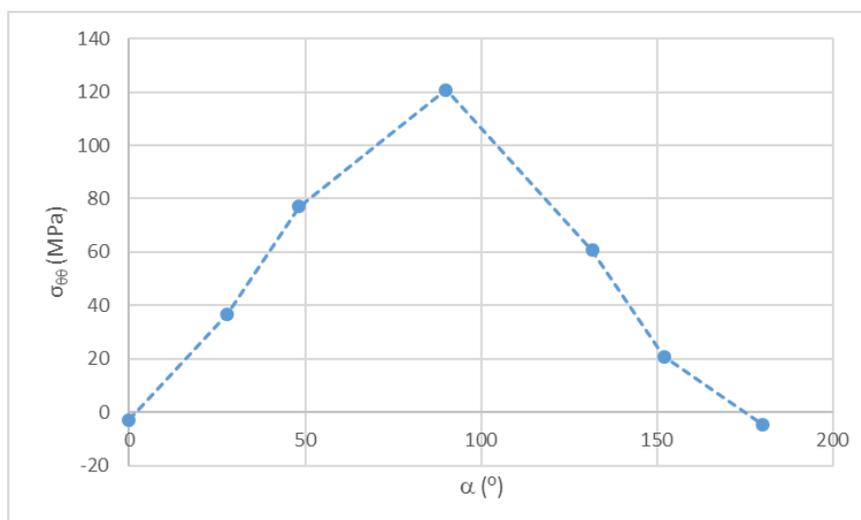


Gráfico 4-2. Evolución de las tensiones circunferenciales para el estudio aproximado con $r = 6 \cdot 10^{-4}$ mm

Como puede apreciarse en los gráficos presentados anteriormente, el máximo de las tensiones circunferenciales para los dos radios utilizados se da en 90° . Esto es lo que se esperaba a la vista de la forma del mapa, porque para comprobar si realmente la zona de concentración de tensiones se encuentra orientada a 45° habría que usar un radio mucho más pequeño y volver a realizar el mismo estudio. Esto no es posible, por la limitación que impone la propia malla. Al no poderse comprobar de esta manera la orientación real de la zona donde las tensiones circunferenciales son máximas, se continúa con el trabajo sin descartar la idea de que la aparente orientación a 45° puede ser real.

Nótese que las distancias a las que se están representando las circunferenciales, $4 \cdot 10^{-4}$ y $6 \cdot 10^{-4}$ mm, son menores que el diámetro de una fibra de carbono, $7.5 \mu\text{m}$, por lo que la representatividad de estos resultados es reducida teniendo en cuenta la hipótesis de homogeneidad en la capa de 90 asumida. En cualquier caso, dado que la dirección en la que se produce el máximo de tensiones circunferenciales no varía al aumentar la distancia al fondo de la grieta, las conclusiones obtenidas seguirían siendo válidas.

A partir de esta idea, se plantea el siguiente estudio a realizar: modelar grietas de muy pequeño tamaño que se internen en la capa de 90 con diferentes orientaciones con respecto a la interfase y que partan desde el fondo de una delaminación.

Se decide que el estudio se va a realizar imponiendo la condición de contorno en tensiones y usando una

delaminación de longitud 2.1 mm, porque es con estas condiciones con las que se ha observado esa aparente orientación de la zona de máxima tensión circunferencial a 45°.

Además de los mapas de tensiones circunferenciales también se ha extraído de cada uno de estos modelos la energía disponible para hacer crecer la grieta, es decir, G_I y G_{II} . Estos resultados junto con el valor de la tensión circunferencial máxima aparecen representados en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1. Resultados para el modelo con delaminación y condición de contorno en desplazamiento

Tamaño de la delaminación (mm)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	$\sigma_{\theta\theta}^{\text{máx}}$ (MPa)
0.02	0	4.74E-12	1.68E2
1.25	0	1.70E-10	1.68E2
1.875	0	2.04E-10	1.68E2
2.1	0	2.37E-10	1.68E2
2.4	0	2.11E-10	1.68E2
2.5	0	2.09E-10	1.68E2

Tabla 4-2. Resultados para el modelo con delaminación y condición de contorno en tensiones

Tamaño de la delaminación (mm)	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	$\sigma_{\theta\theta}^{\text{máx}}$ (MPa)
0.02	0	2.66E-12	9.61E1
1.25	0	1.66E-6	1.03E2
1.875	0	2.78E-5	1.26E2
2.1	0	1.36E-4	1.62E2
2.4	0	1.27E-2	8.10E2
2.5	0	4.97E-1	9.42E3

Los valores de los índices de liberación de energía eran esperables. Al estar la grieta situada en la interfase, delaminación, su orientación coincide con la dirección de aplicación de la carga. Esto quiere decir que la grieta no va a estar trabajando en modo I bajo ningún concepto, por esto los valores de G_I son para todos los casos nulos. Además, puede verse que los valores de G_{II} son mayores en caso de aplicar la condición de contorno en tensiones. La explicación de esto está en que al aplicar la condición de contorno en desplazamiento se está obligando a todas las láminas a desplazarse y, por tanto, deformarse de la misma manera. Esto limita los movimientos relativos entre las capas, que se deben a tener propiedades diferentes, y se reduce así la probabilidad de que la grieta trabaje en modo II, justificando esto que los valores de G_{II} sean menores para el caso con condición de contorno en desplazamiento.

4.2 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones desde el fondo de una delaminación

El siguiente análisis consiste en generar una serie de modelos en los que aparezcan grietas con diferentes orientaciones, respecto a la interfase, que se internan en la capa de 90 partiendo desde el fondo de una delaminación de 2.1 mm.

El objetivo que se persigue con este estudio es comprobar si realmente, con estas condiciones de partida, es más probable que una grieta aparezca en la capa de 90 a 45° frente a la orientación a 90° esperable. Para ello se va a realizar un análisis comparativo entre las diferentes orientaciones que podría tener la grieta creciendo desde el fondo de la delaminación. El criterio de comparación va a ser la energía disponible para hacer crecer la grieta, G , como suma de sus componentes en modo I y modo II, G_I y G_{II} , ya que en la orientación en la que esta sea mayor se podrá suponer que es la más probable para el crecimiento de la grieta. Además de estas tres

variables va a analizarse la mixicidad a partir de $\psi_G = \text{atan}\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right)$, como indicativo de la importancia de cada modo en el crecimiento de la grieta.

A continuación se presentan las gráficas de la evolución de todas estas variables con la orientación de la grieta en la capa 90, α , ya definido en el capítulo anterior al presentar los modelos.

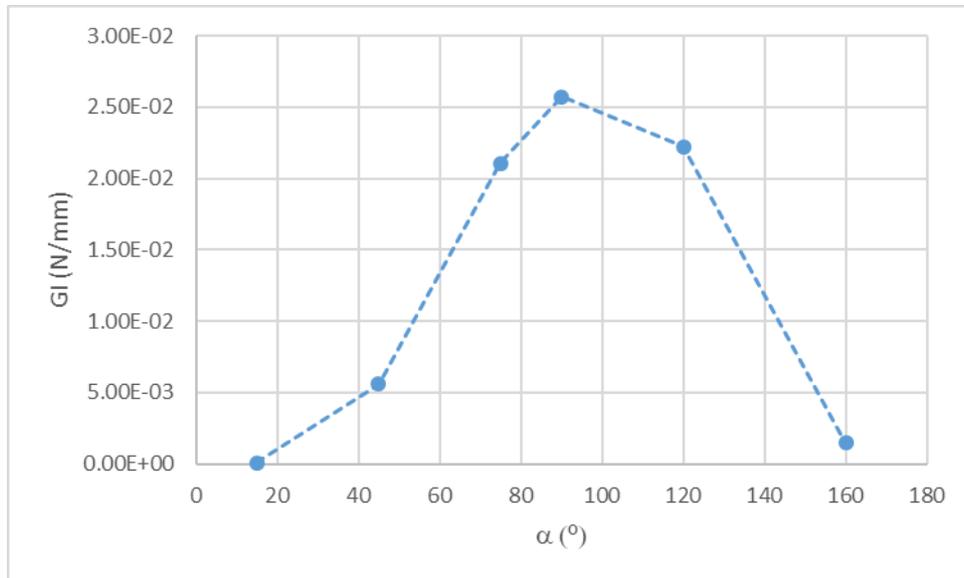


Gráfico 4-3. Evolución de G_I con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90

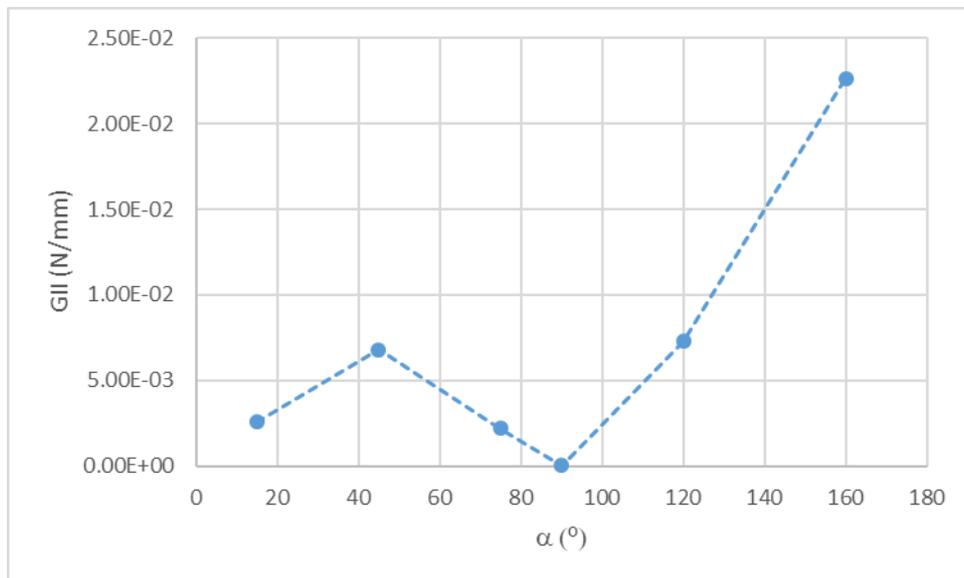


Gráfico 4-4. Evolución de G_{II} con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90

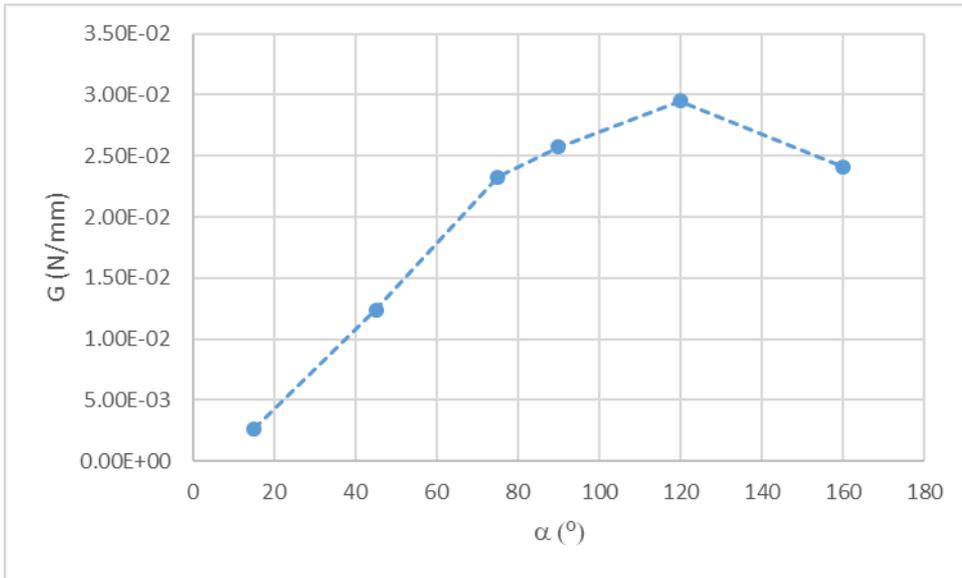


Gráfico 4-5. Evolución de G con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90

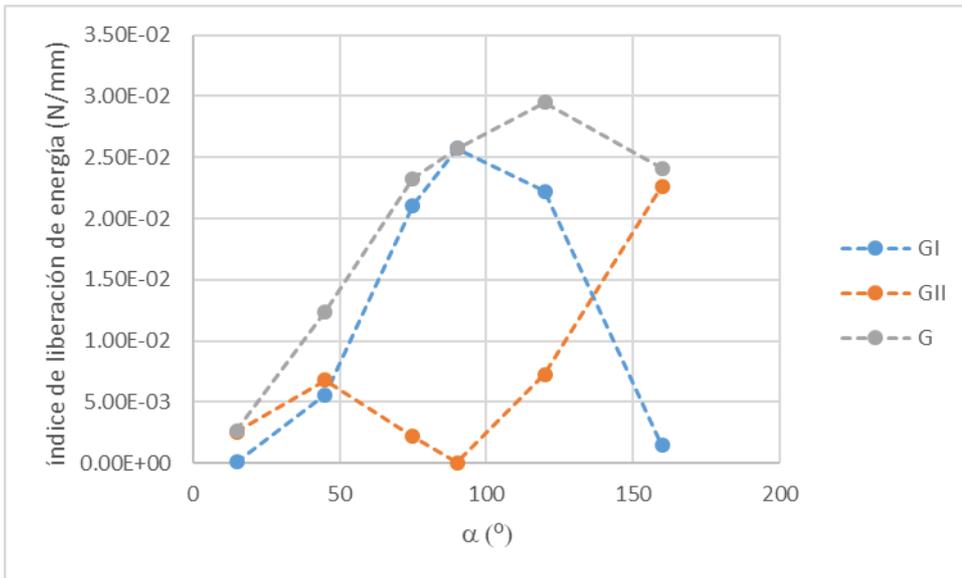


Gráfico 4-6. Evolución de las diferentes energías con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90

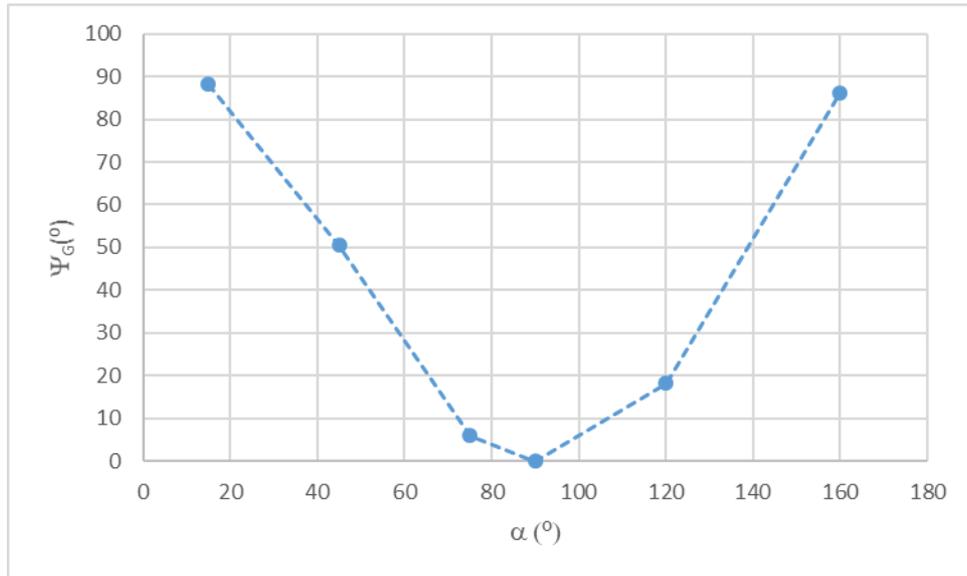


Gráfico 4-7. Evolución de la mixicidad con α para los modelos con delaminación y grieta en la capa de 90

Aunque en principio el foco de interés se encuentra entre $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$, dado que las grietas que se observan en los ensayos realizados se corresponden con la posición intermedia de este rango, se ha realizado el estudio más amplio por complitud.

Analizando estas gráficas puede verse que los resultados son coherentes. Cuando la grieta tiene una orientación de 90° (está trabajando en modo I puro) el valor de G_{II} es nulo (prácticamente nulo por los errores numéricos que arrastra la resolución de un problema usando el método de elementos finitos) y, por tanto, la mixicidad es de 0° . Cuando la grieta tiene una orientación de 0° , la mixicidad alcanza los 90° , indicando modo II puro, también como era de esperar.

El máximo de G_I se da en 90° como cabría esperar. La evolución de G_{II} , monótonamente creciente en el rango $[90-160^\circ]$, presenta sin embargo en el rango $[0-90^\circ]$ un máximo local en 45° .

Es de destacar también el hecho de que el máximo valor de G se produce para $\alpha = 120^\circ$, lo que, aplicando un Criterio de Máxima Energía, se traduciría en un internamiento en la capa de 90° de la grieta originada por la delaminación en esta dirección, hecho que no se corresponde con la evidencia experimental.

En general, no parece haber ningún indicio claro de que la grieta crezca internándose en la capa de 90 con una orientación de 45° . El único resultado asociado a ese hecho es que aparece para este valor de α un máximo local de G_{II} , como ya se ha comentado, lo cual sería relevante en el caso de que $G_{II}^{crítica}$ fuera mucho menor que $G_I^{crítica}$ para este material. Sería necesario en cualquier caso aplicar un criterio de rotura fiable asociado al crecimiento en la capa de 90° que contemplase la mixicidad.

Para completar el análisis realizado sobre estos modelos se decidió estudiar el valor de otras variables que también son de interés para el problema que se está planteando. Dichas variables son las tensiones σ y τ , en el nodo que se encuentra justo a continuación del fondo de la grieta (punto 3 representado en la Figura 4-21) y los desplazamientos normal y tangencial, que sufren los nodos que forman la última pareja dentro de la grieta, es decir, los dos inmediatamente anteriores al fondo, situados uno en cada labio de la misma (puntos 1 y 2), dado que son valores relacionado con los resultados que toma ABAQUS para el cálculo de la energía a partir de VCCT.

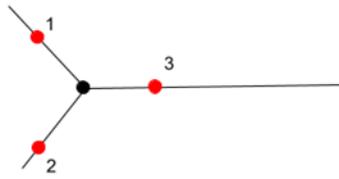


Figura 4-21. Definición gráfica de los puntos 1, 2 y 3 con respecto al fondo de grieta (punto negro)

Para obtener los desplazamientos en las direcciones normal y tangencial de la grieta y las tensiones σ y τ , es necesario definir un sistema de referencia local. Este sistema de referencia se ha definido en todos los casos, teniendo en cuenta las diferentes orientaciones de la grieta, tal y como aparece representado en el esquema de la Figura 4-22. La dirección 1 está siempre asociada a la tangente a la grieta y la 2 a la normal:

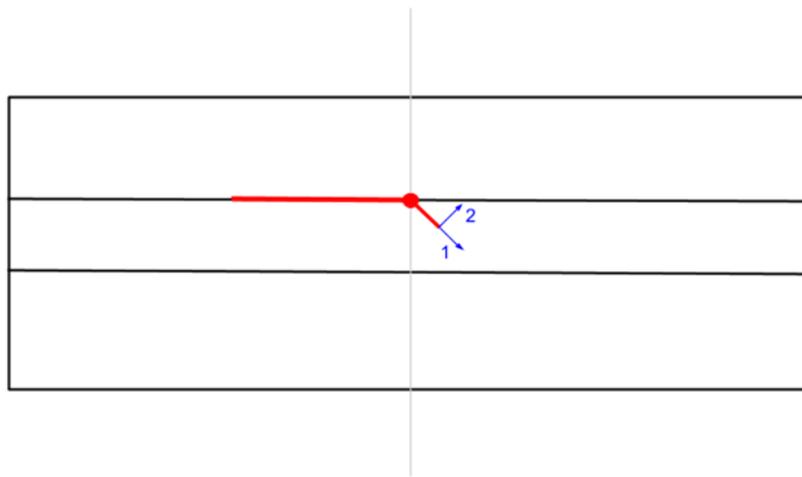


Figura 4-22. Definición del sistema de referencia local para la grieta

Los valores de todas estas variables pueden ven en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Desplazamientos y tensiones de interés para las diferentes orientaciones de grieta en coordenadas locales

Variable	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$	$\alpha = 160^\circ$
$u_t(1)$ (mm)	7.54E-4	1.48E-3	1.82E-3	1.88E-3	1.79E-3	9.85E-4
$u_n(1)$ (mm)	-1.98E-3	-1.33E-3	-5.33E-4	-1.14E-4	7.81E-4	1.87E-3
$u_t(2)$ (mm)	7.48E-4	1.47E-3	1.81E-3	1.88E-3	1.80E-3	9.94E-4
$u_n(2)$ (mm)	-1.98E-3	-1.34E-3	-5.54E-4	-1.36E-4	7.64E-4	1.87E-3
$\sigma(3)$ (MPa)	-469.599	-321.632	2294.31	2708.36	3058.71	896.702
$\tau(3)$ (MPa)	256.308	1995.91	3781	4045.3	3067.64	303.282

Analizando estos resultados, puede verse que, para los ángulos realmente interesantes (0° - 90°), los puntos 1 y 2 se comportan igual en todos los casos, aunque los desplazamientos tengan diferente valor, el cambio de posición queda descrito de la misma manera.

Por otro lado, puede verse que τ , tensión tangencial, representa una evolución de negativo a positivo con α , alcanzando su máximo en $\alpha = 120^\circ$. Analizando los valores de la tensión normal, σ , se ve que el máximo

aparece para $\alpha = 90^\circ$, como era de esperar, ya que en este caso la dirección 2, normal a la grieta, coincide con la dirección de la aplicación de la carga.

Estos resultados se obtuvieron, además de para usarlos en el análisis de convergencia de la malla, para intentar entender un poco mejor cómo está calculando VCCT los valores de los índices de liberación de energía. Si se recuerda, la fórmula implementada dentro de este “criterio de fractura” de ABAQUS para el cálculo de las energías en las que estamos interesados depende del desplazamiento relativo entre los puntos 1 y 2 y la fuerza necesaria para mantener cerrada la grieta. Para ver cómo está trabajando, se representan en función de α los desplazamientos relativos entre los puntos 1 y 2, Gráfico 4-8, y la tensión en el punto 3, Gráfico 4-9, para la dirección normal y tangencial. No es exactamente esto con lo que trabaja VCCT, pero puede ilustrarnos.

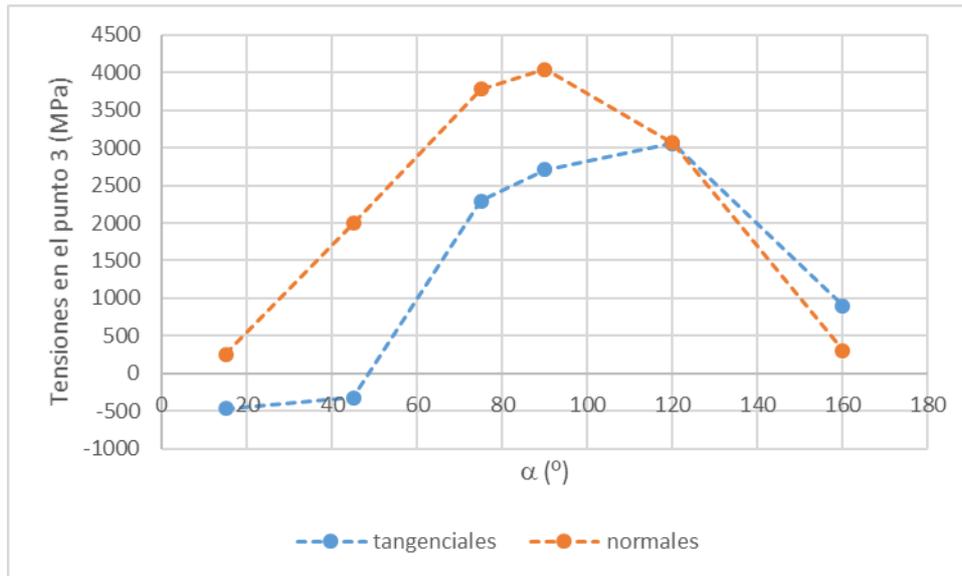


Gráfico 4-8. Evolución de las tensiones normales y tangenciales en el punto 3

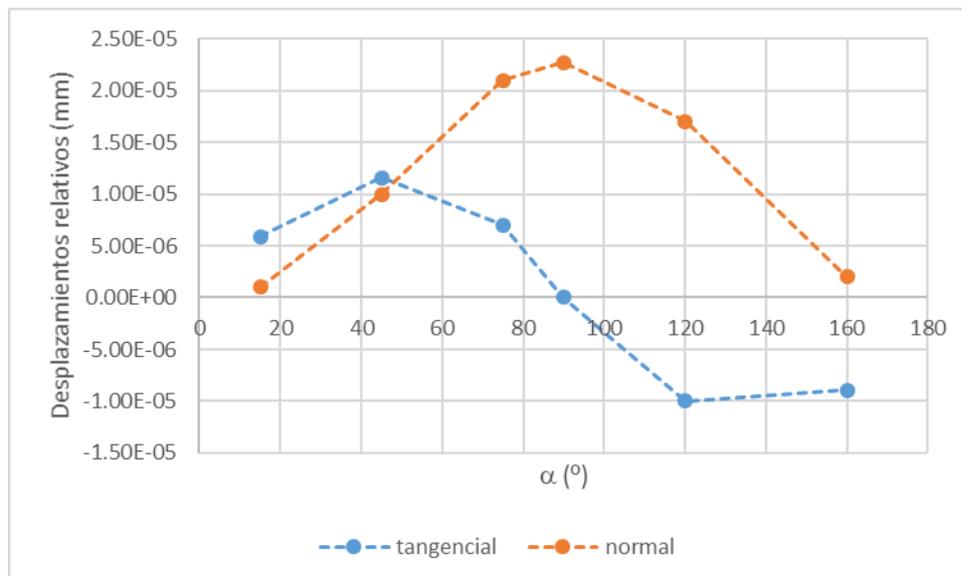


Gráfico 4-9. Evolución de los desplazamientos relativos

Analizando primero los resultados en la dirección tangente a la grieta, puede verse que la tensión se hace máxima en $\alpha = 120^\circ$, mientras que el máximo de los desplazamientos relativos aparece para $\alpha = 45^\circ$. Teniendo en cuenta que estos resultados están relacionados con el cálculo que realiza VCCT de G_{II} , la posición del máximo de los desplazamientos relativos permite entender la aparición de un máximo relativo en 45° en la evolución de G_{II} con α .

Centrándonos ahora en los resultados en la dirección normal a la grieta, puede verse que tanto el máximo de los desplazamientos relativos como el máximo de las tensiones aparecen para $\alpha = 90^\circ$. Estos resultados están relacionados con el cálculo que hace VCCT de G_I y, por tanto, es lógico que el máximo de esta variable aparezca para esta misma orientación.

Llegados a este punto, y dados los resultados obtenidos, se planteó ver cuánto y cómo cambiaría la energía disponible para hacer crecer la grieta en la capa de 90 en caso de que no existiera delaminación alguna, sino que esta se generase directamente desde la interfase entre la capa de 0 superior y la propia capa de 90. Para ello se generaron otros seis modelos, con los diferentes valores de α , pero ahora manteniendo cerrada la delaminación.

4.3 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones

Como ya se ha mencionado, el siguiente paso que se dio en el estudio fue analizar cómo cambiaban las energías, G_I , G_{II} y G , al cerrar la delaminación de los modelos usados para obtener los resultados anteriores.

El esquema que siguen estos nuevos modelos es el que aparece reflejado en la siguiente imagen:

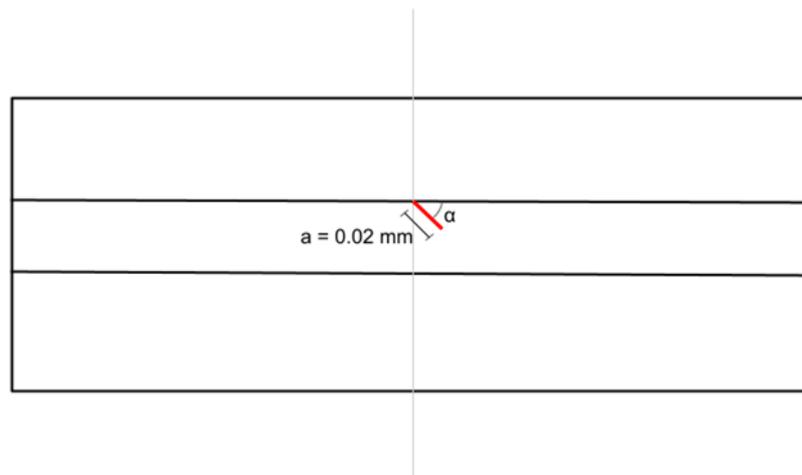


Figura 4-23. Esquema que siguen los modelos con grieta en la capa de 90, pero sin delaminación

Se representa a continuación, en una serie de gráficas, las evoluciones de G_I , G_{II} y G con α , para este nuevo planteamiento del problema:

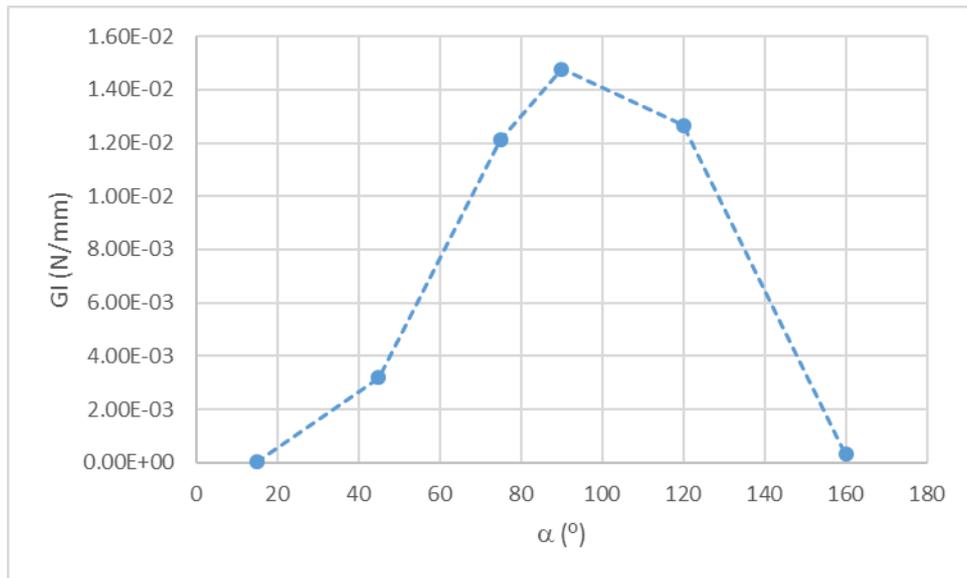


Gráfico 4-10. Evolución de G_I con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90

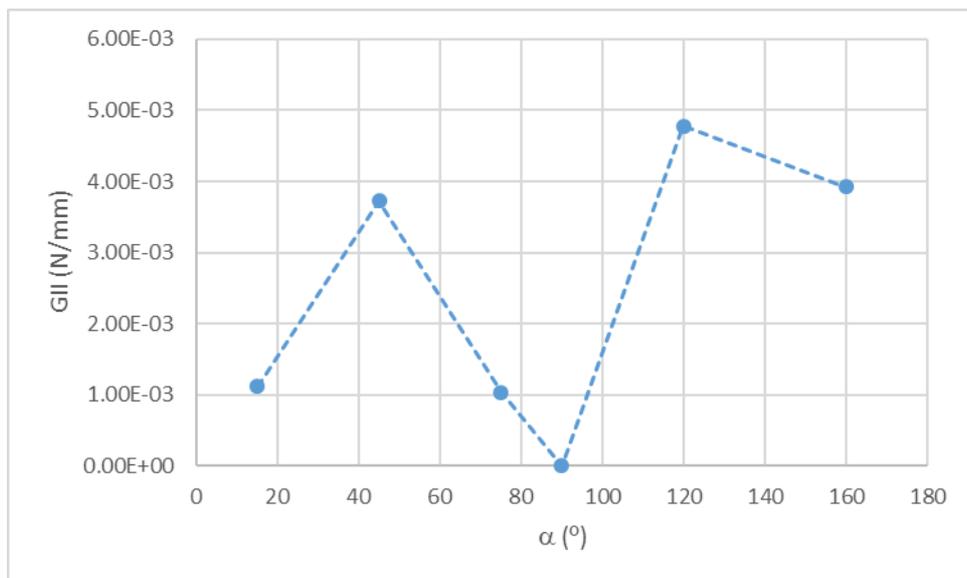


Gráfico 4-11. Evolución de G_{II} con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90

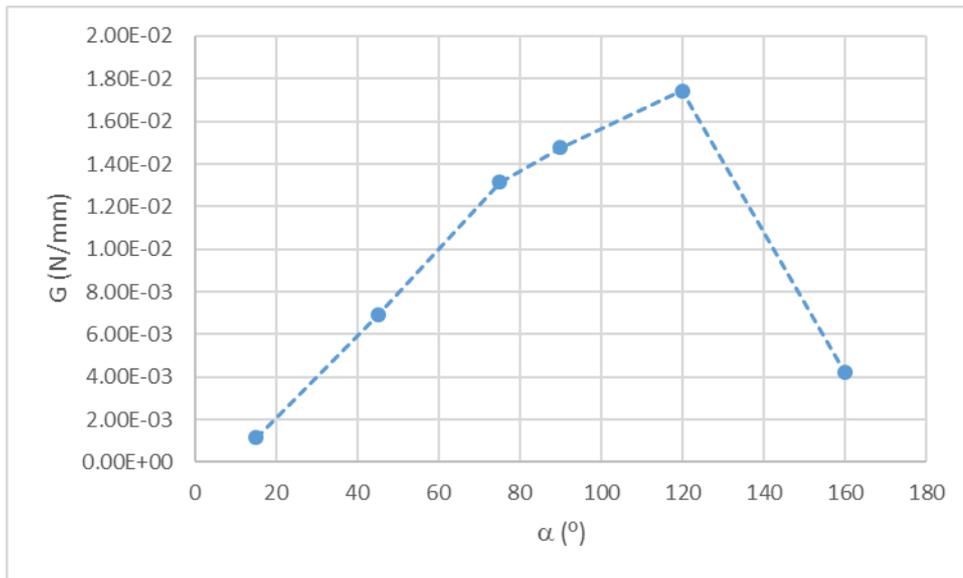


Gráfico 4-12. Evolución de G con α para los modelos solo con grieta en la capa de 90

A priori parece que las evoluciones de G_I y G con α , son bastante parecidas a las que se obtenían en el apartado anterior cuando sí se estaba considerando la presencia de una delaminación en el modelo. Sin embargo, la evolución de G_{II} sí que ha cambiado bastante respecto a la que se obtenía anteriormente. En concreto, el máximo local a 45° se acerca al máximo global en 120° produciendo una distribución más simétrica respecto a la posición vertical de la grieta, como era de esperar de acuerdo a esta nueva configuración sin la alteración que la delaminación producía en el anterior.

Para poder comparar realmente estos últimos resultados obtenidos con los del estudio realizado anteriormente en el que aparece la delaminación, se representan las evoluciones de cada una de las tres variables, conjuntamente para los dos estudios:

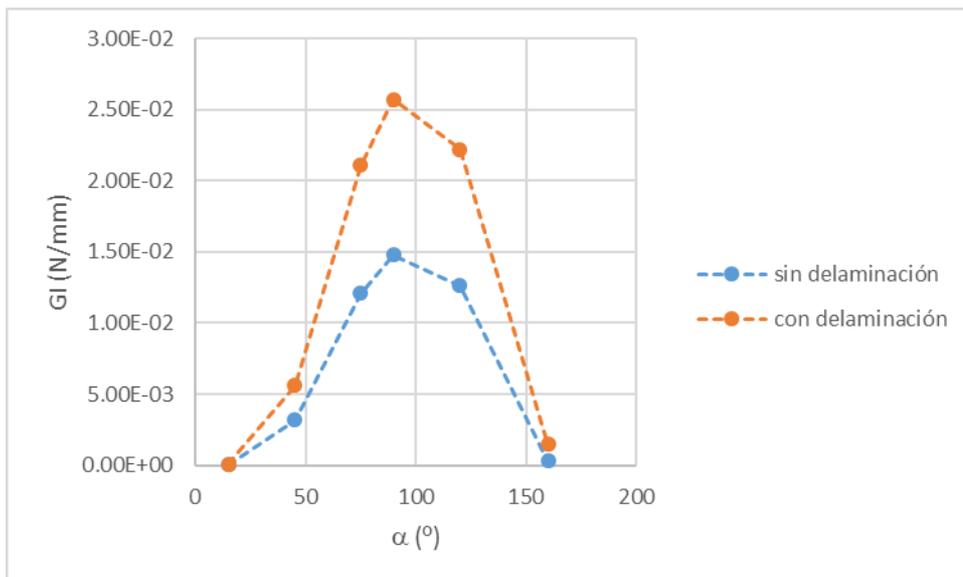


Gráfico 4-13. Comparación de G_I para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación

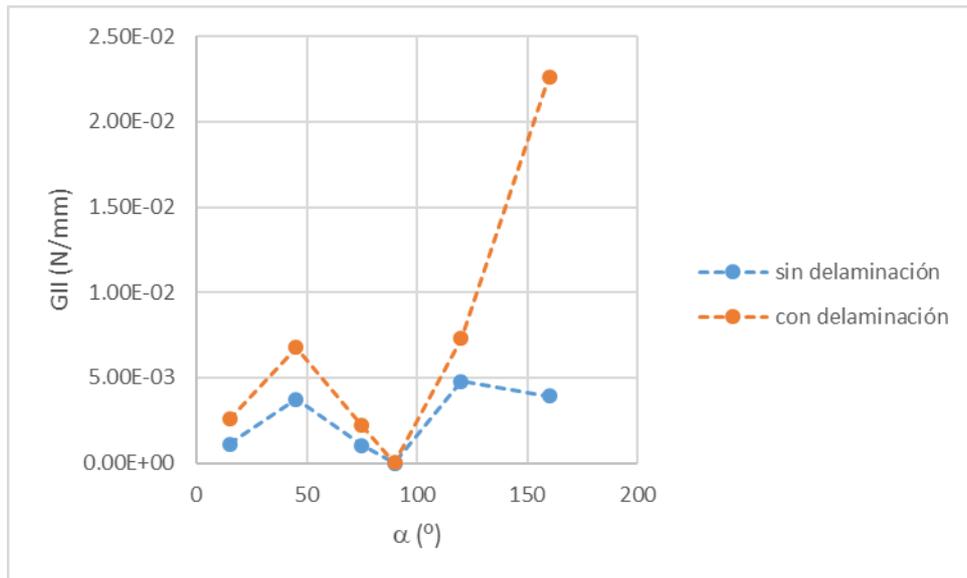


Gráfico 4-14. Comparación de G_{II} para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación

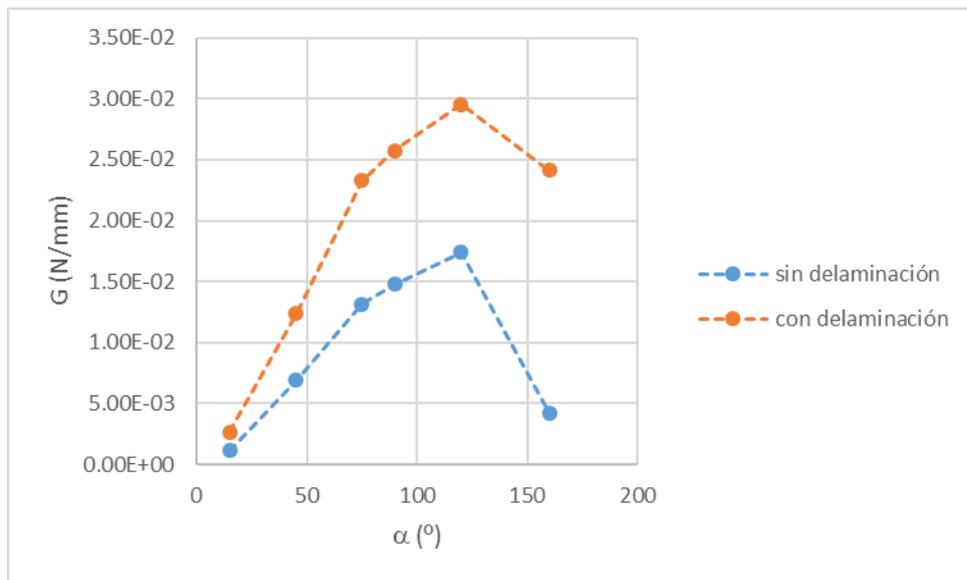


Gráfico 4-15. Comparación de G para los modelos con grieta en la capa de 90 con y sin delaminación

Efectivamente, como parecía, las evoluciones de G_I y G son muy similares en ambos casos, siendo la de G_{II} un poco más dispar. Sin embargo, mirando el gráfico de la evolución de G_{II} con α , puede verse que hasta $\alpha = 120^\circ$ puede decirse que en ambos se sigue la misma tendencia.

Como ya se ha mencionado en algún otro punto del documento, los resultados realmente interesantes son los relativos a las orientaciones por debajo de 90° , por ello, podemos decir que las evoluciones de las energías son, cualitativamente, muy parecidas en ambos casos.

Fijando ahora la atención en los valores, para las tres variables y todos los casos, puede verse que estos siempre son mayores en presencia de una delaminación. Esto quiere decir que para cualquier orientación es más probable que se genere una grieta en caso de que exista una delaminación de partida a partir de la cual crecer.

Esto corrobora lo esperado, ya que debe más fácil que se genere un daño cuando ya existe otro preexistente y,

por tanto, el material ya se encuentra dañado.

Partiendo de esta última idea, se decidió realizar un último modelo algo diferente a los anteriores.

4.4 Modelo con dos delaminaciones

Tras haber comprobado que es más probable que aparezca una grieta en la capa de 90 en presencia de una delaminación, se genera un nuevo modelo que podría ser interesante.

En este nuevo modelo se decide introducir dos delaminaciones, una en cada interfase, planteando así que puede que aparezca una grieta que atraviese la capa de 90 yendo de fondo a fondo de las delaminaciones.

La generación de este modelo, como de todos los demás ya fue explicada en el capítulo anterior. Las delaminaciones son modeladas con una longitud de 2.1 mm, cada una en una interfase, como ya se ha mencionado, y separadas en horizontal una distancia de 0.19 mm, que es el espesor de la capa de 90. La separación se toma de ese valor para que el camino desde el fondo de una delaminación hasta el fondo de la otra, tenga una orientación de 45° respecto a la interfase.

Lo que quiere analizarse en este modelo son las tensiones circunferenciales en los fondos de cada una de las delaminaciones, buscando algún indicio de la posible aparición de una grieta a 45°.

Los mapas de tensiones circunferenciales aparecen representados en las siguientes imágenes:

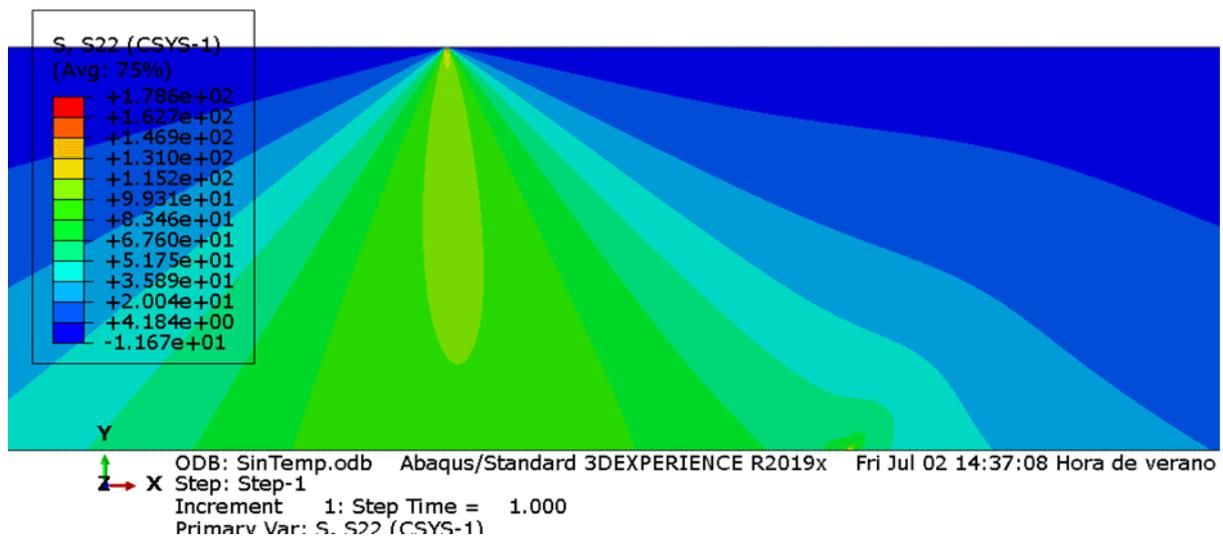


Figura 4-24. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación superior

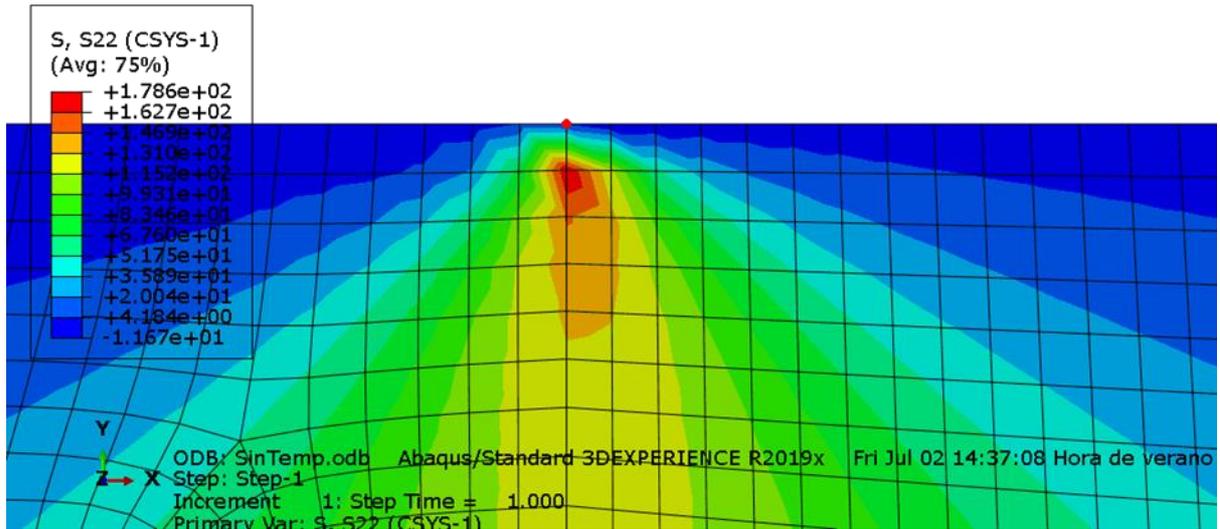


Figura 4-25. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo)

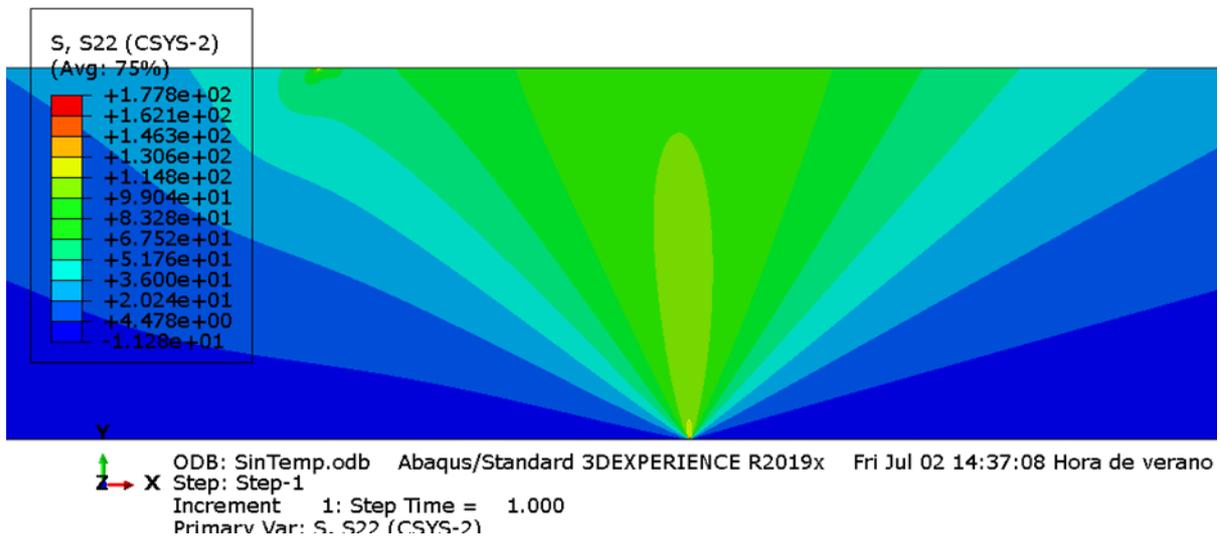


Figura 4-26. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación inferior

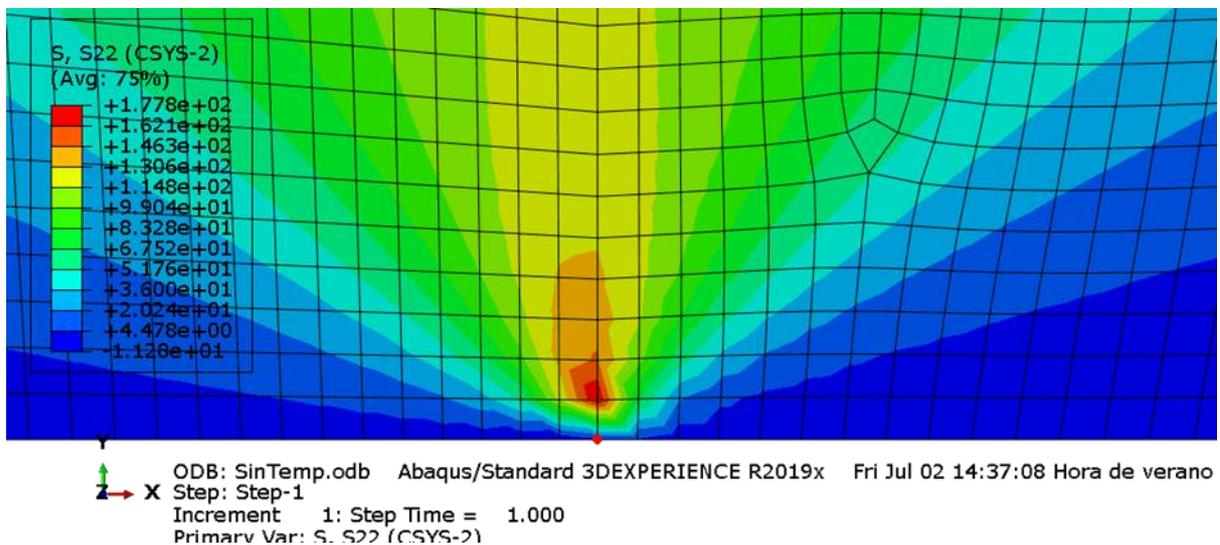


Figura 4-27. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo)

Puede apreciarse que estos mapas tienen el mismo aspecto para los fondos de las dos delaminaciones. Esto tiene sentido ya que se trata de delaminaciones exactamente iguales y la carga aplicada (tracción de valor igual a la tensión de rotura) debe afectar de la misma manera a ambas. Además, como era de esperar, el valor de la máxima $\sigma_{\theta\theta}$ aparece en una zona con la misma forma en ambos casos y el valor es prácticamente igual entre una y otra (178.6 MPa y 177.8 MPa).

Lo que se buscaba con este modelo era encontrar alguna diferencia cualitativa en los mapas presentados con respecto a los que se obtenían en el modelo con una sola delaminación del mismo tamaño aplicando la condición de contorno en tensiones. Comparando el aspecto general de los mapas es complicado diferenciar uno del otro. La zona de concentración de tensiones circunferenciales presenta también ahora esa ligera orientación a 45° que hizo en un primer momento pensar que ahí podría estar la explicación que se busca. Se esperaba que, con este modelo, esta zona apareciera más claramente orientada en esa dirección. En cuanto al valor en sí de la tensión circunferencial máxima, puede decirse que se ve incrementado, aunque no significativamente, en presencia de otra delaminación (162.4 MPa cuando solo existe una delaminación y 178.6 MPa cuando se modelan las dos).

En definitiva, el hecho de que exista otra delaminación no afecta significativamente a lo que ocurre en el fondo de la delaminación de estudio y, por tanto, tampoco parece estar aquí la explicación del fenómeno observado experimentalmente.

4.5 Efecto de la temperatura

Tras realizar todos los estudios expuestos hasta el momento y descartar la existencia de cualquier indicio que pudiera explicar la aparición de las grietas a 45° que se observaron experimentalmente, se decidió analizar el efecto de la temperatura sobre los diferentes modelos.

Durante la fabricación de los laminados aquí considerados el curado del material se completa con un enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Esto consiste en llevar al material desde su temperatura de transición vítrea (155°C para el material con el que se trabaja en este proyecto) hasta la temperatura ambiente (22°C aproximadamente).

La diferente contracción de las capas que componen el material debido a sus coeficientes de dilatación térmica podría alterar los mapas tensionales estudiados hasta el momento.

Es interesante, por tanto, ver cómo varían los resultados obtenidos con los diferentes modelos, en caso de que se contemple el cambio de temperatura anteriormente explicado por si la suma de este efecto pudiese acercar los resultados a la evidencia experimental.

Por este motivo se decide analizar de nuevo los modelos ya presentados, pero considerando la acción simultánea de un decremento térmico de 133°C y la carga exterior de tracción considerada hasta el momento.

4.5.1 Modelo con delaminación de 2.1 mm

A pesar de que en principio este tipo de modelos no iba a someterse al decremento térmico, pareció interesante ver cómo variaban las tensiones en este caso en concreto. Si se recuerda, la aparente orientación de la zona de concentración de tensiones circunferenciales a 45° para este modelo con condición de contorno en tensiones fue el punto de partida de los estudios realizados después. Se decidió entonces ver cómo afectaba el cambio de temperatura a este mapa.

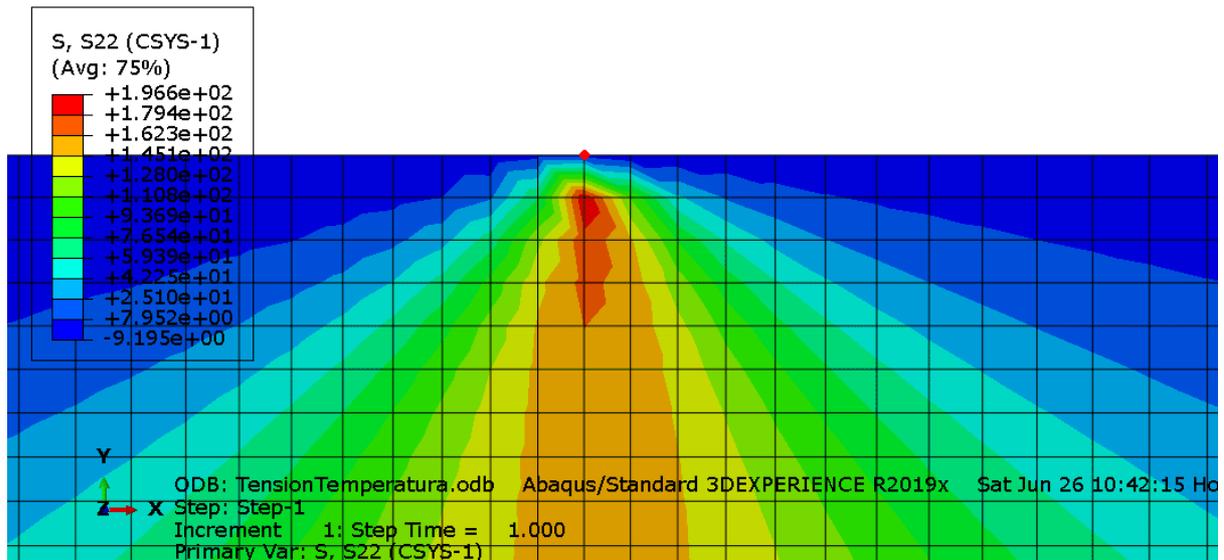


Figura 4-28. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm en el caso con decremento térmico

Como puede apreciarse en la Figura 4-27, el aspecto del mapa en general no ha cambiado. No ha variado la forma de la zona de máximas tensiones circunferenciales y parece que la explicación que buscamos no va a estar ligada al hecho de aplicar un decremento térmico.

Por otra parte, el valor máximo de $\sigma_{\theta\theta}^{\text{máxima}}$, sí que ha aumentado, lo cual era esperable.

4.5.2 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones desde el fondo de una delaminación

Con estos modelos, los resultados que se obtuvieron en un principio fueron: las evoluciones de G_I , G_{II} , G y la mixicidad con α , las tensiones en el nodo que se encuentra justo a continuación del fondo de la grieta y los desplazamientos que sufrían los nodos inmediatamente anteriores al fondo (tanto en coordenadas globales como en coordenadas locales).

En las siguientes gráficas pueden verse las evoluciones de cada una de las energías y la mixicidad comparando los casos con y sin decremento térmico.

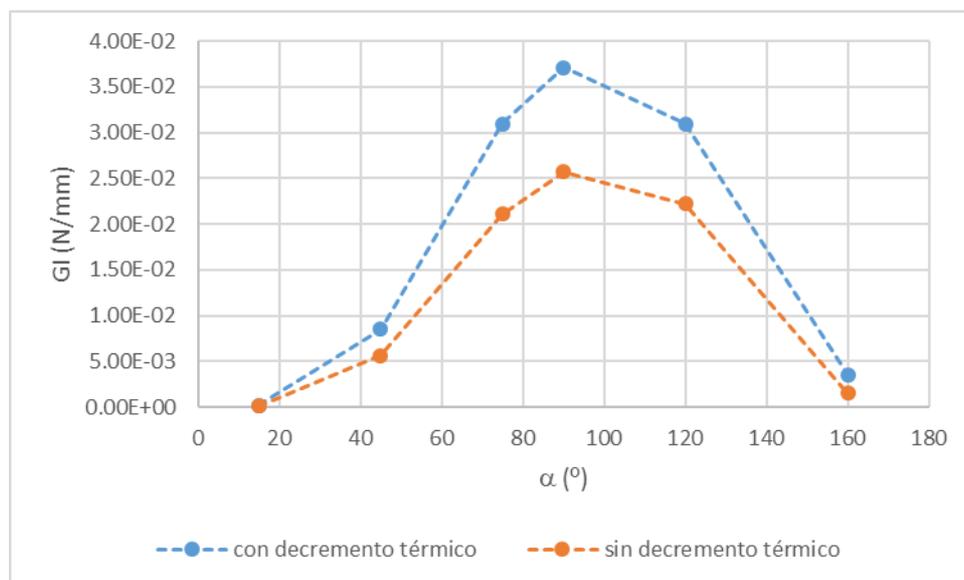


Gráfico 4-16. Comparación de G_I en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

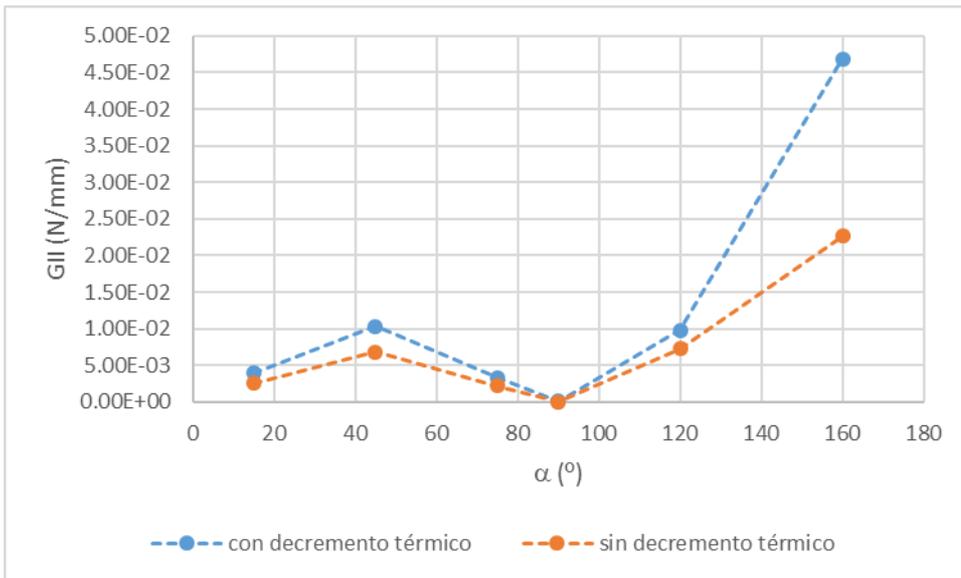


Gráfico 4-17. Comparación de G_{II} en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

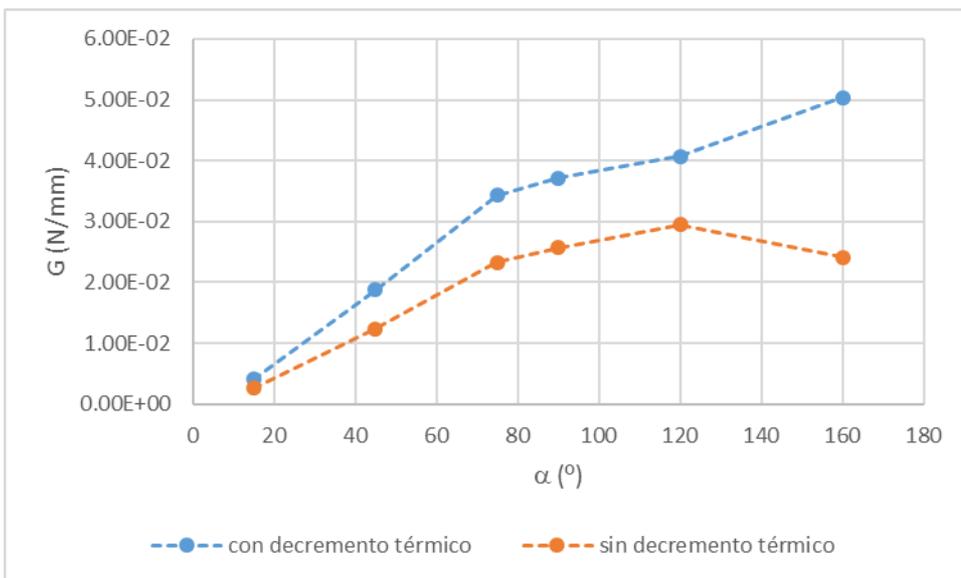


Gráfico 4-18. Comparación de G en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

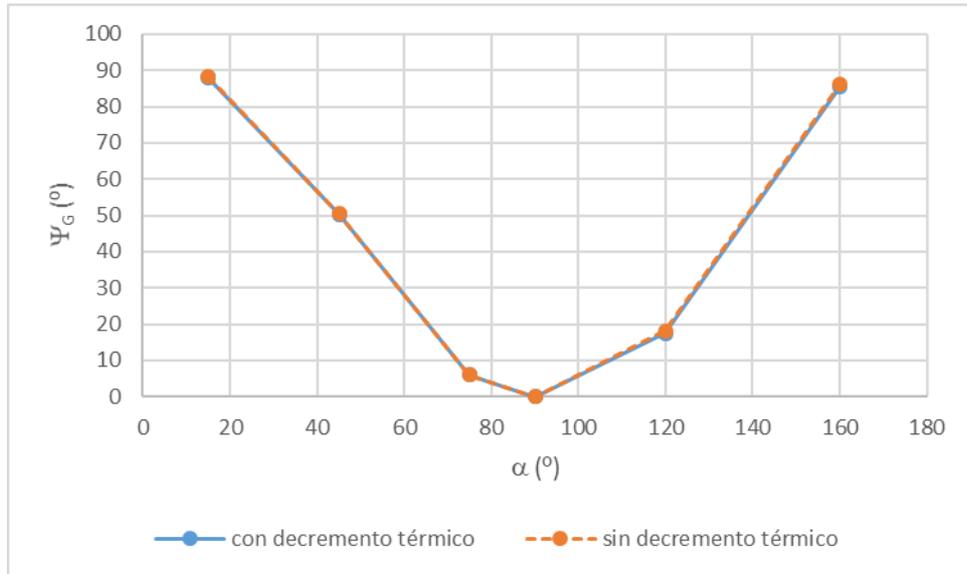


Gráfico 4-19. Comparación de la mixicidad en el modelo con delaminación y grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

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.

Las dos gráficas de la mixicidad, con decremento térmico y sin él, son prácticamente coincidentes, es decir, que esta variable no se ve afectada.

Por otro lado, se presentan en la Tabla 4-4 el resto de resultados obtenidos, tensiones y desplazamientos normales y tangenciales de interés, tal y como se explicaba en el apartado 4.2.

Tabla 4-4. Desplazamientos y tensiones de interés para las diferentes orientaciones de grieta en coordenadas locales con decremento térmico

Variable	α = 15°	α = 45°	α = 75°	α = 90°	α = 120°	α = 160°
u _t (1)	1.26E-3	2.79E-3	3.54E-3	3.67E-3	3.39E-3	1.66E-3
u _n (1)	-3.81E-3	-2.61E-3	-1.02E-3	-1.51E-4	1.64E-3	3.65E-3
u _t (2)	1.25E-3	2.77E-3	3.53E-3	3.66E-3	3.40E-3	1.67E-3
u _n (2)	-3.81E-3	-2.63E-3	-1.05E-3	-1.82E-4	1.62E-3	3.64E-3
σ(3)	-591.353	-448.857	3106.01	3671.6	4146.24	1255.86
τ(3)	343.232	2717.48	5131.23	5500.44	4197.97	439.961

Para el caso sin decremento térmico, se usaron estos resultados para comprender cómo realiza el cálculo de energías el “criterio de fractura” de ABAQUS VCCT. Fue un estudio muy clarificador y por eso vuelve a realizarse con los resultados obtenidos cuando se someten los modelos al decremento térmico además de a la tracción que ya estaba siendo aplicada.

En los Gráficos 4-20 y 4-21 se representan las tensiones en el punto 3 y los desplazamientos relativos entre los puntos 1 y 2, al igual que se hizo para el caso sin decremento térmico.

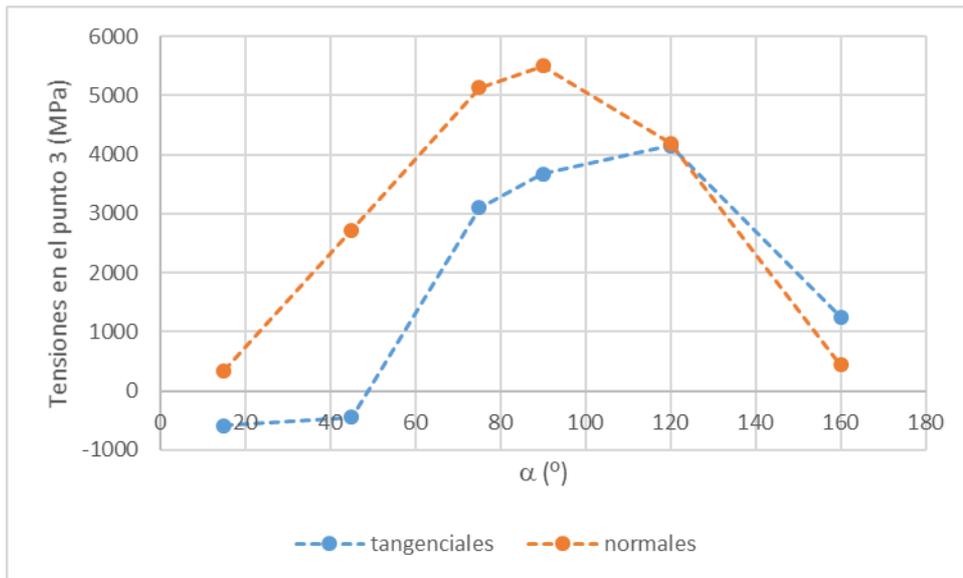


Gráfico 4-20. Evolución de las tensiones en el punto 3 para el caso con decremento térmico

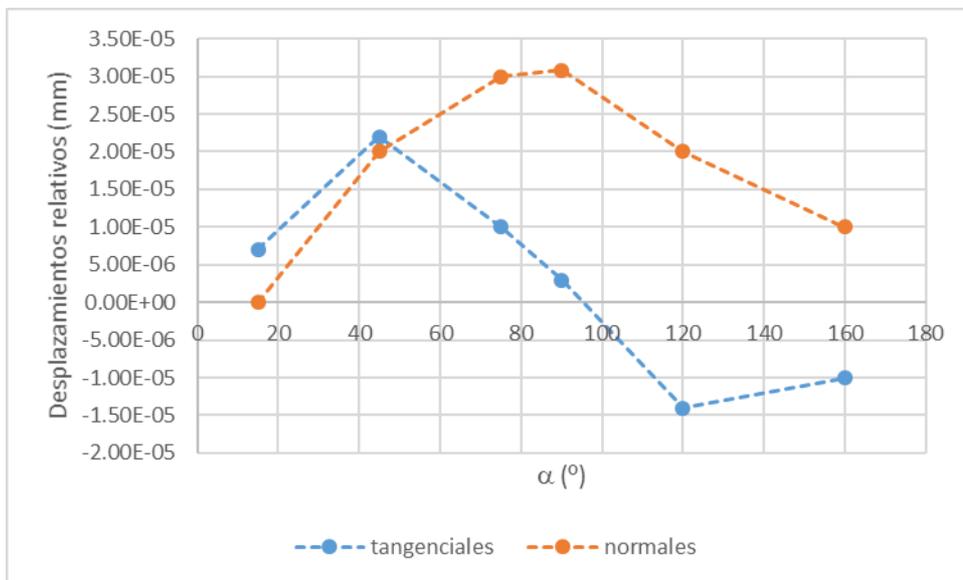


Gráfico 4-21. Evolución de los desplazamientos relativos para el caso con decremento térmico

Las evoluciones de estas variables con α , se mantienen prácticamente iguales cualitativamente que en el caso en el que no se modelaba el decremento térmico. Esto explica que las evoluciones de G_I y G_{II} tampoco varíen cualitativamente entre los dos casos. Sin embargo, los valores tanto de los desplazamientos relativos como de las tensiones aumentan, para todas las orientaciones, al considerar la acción de la temperatura sobre el modelo. Esto era algo esperable y justifica que los valores de los índices de liberación de energía aumenten en este caso.

Analicemos ahora cómo debe afectar el efecto de la temperatura al modelo. Al aplicar el decremento térmico ($\Delta T < 0$) se está haciendo que la capa de 90 se contraiga tanto en dirección 1 como en dirección 2, longitudinal y transversalmente, por el hecho de que los coeficientes de dilatación térmica sean positivos para ambas direcciones. Sin embargo, la capa de 0 se contrae en dirección 2, transversalmente, pero se alarga en dirección 1, longitudinalmente, por ser para esta capa α_2 positivo y α_1 negativo.

Comparando las Figuras 4-29 y 4-30 puede verse que la contracción transversal del modelo completo es mayor cuando se está aplicando el decremento térmico del modelo.

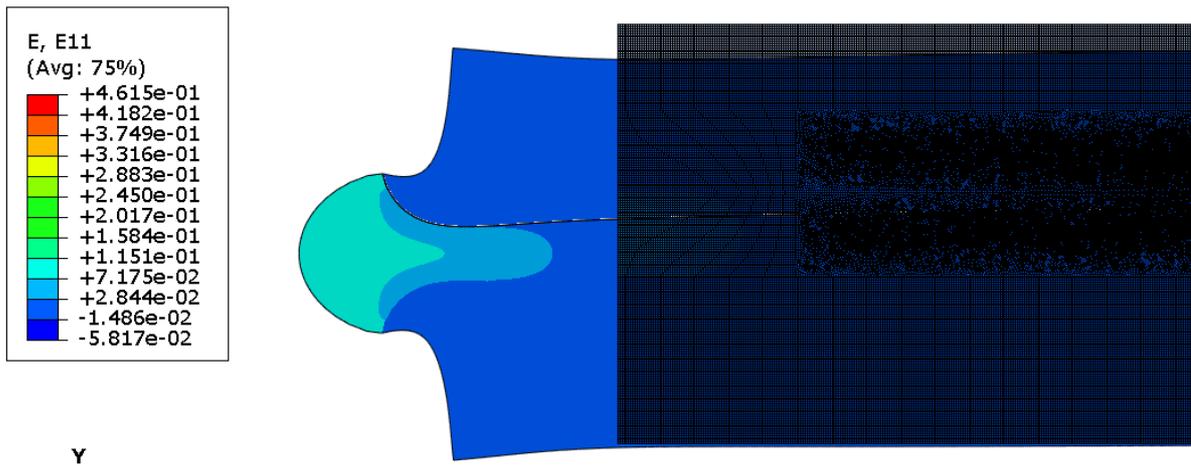


Figura 4-29. Representación de las deformaciones longitudinales en la deformada y en la indeformada para el caso sin decremento térmico

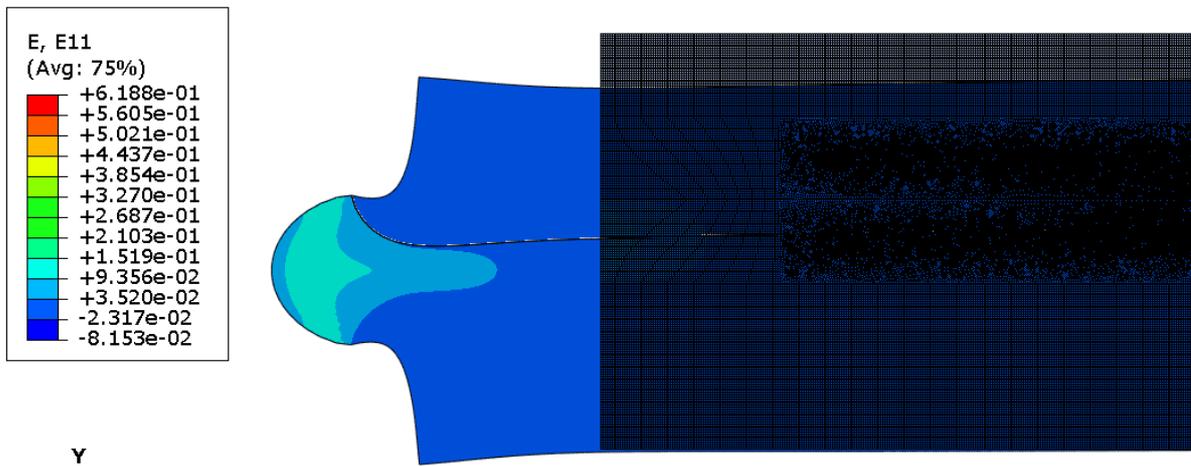


Figura 4-30. Representación de las deformaciones longitudinales en la deformada y en la indeformada para el caso con decremento térmico

En las Figuras 4-31 y 4-32, se ve la deformada de ambas capas de 0 para los casos con y sin decremento térmico. Es apreciable que las deformaciones longitudinales son mayores en el caso en el que se tiene en cuenta el efecto de la temperatura. Esto es debido a que están sufriendo un alargamiento adicional que se suma al que provocan la tensión aplicada como condición de contorno.

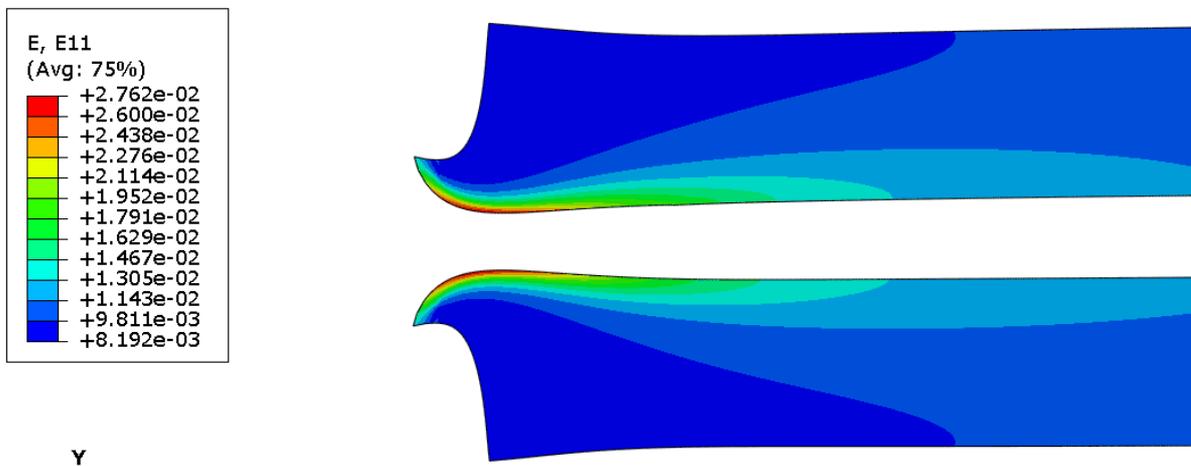


Figura 4-31. Representación de las deformaciones longitudinales en las capas de 0 deformadas para el caso sin decremento térmico

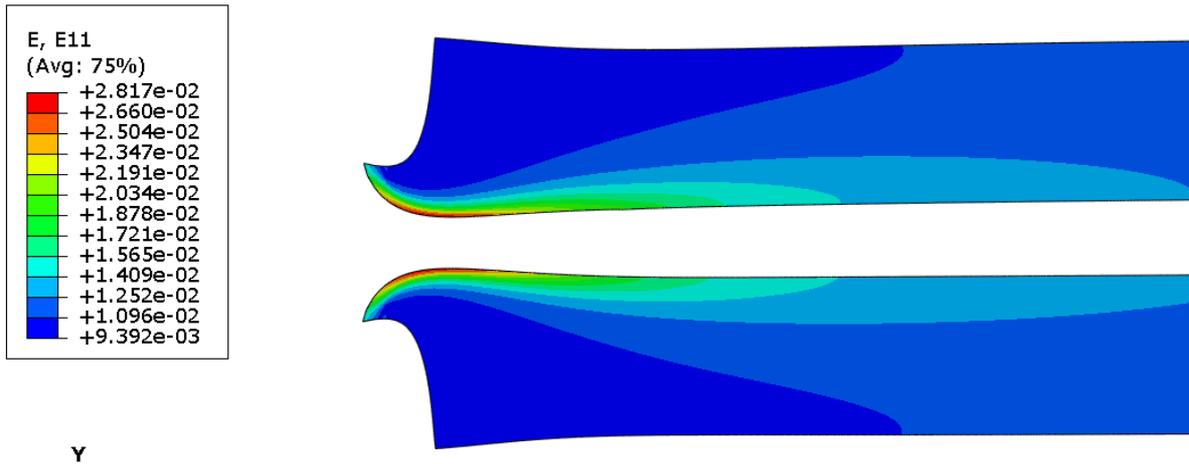


Figura 4-32. Representación de las deformaciones longitudinales en las capas de 0 deformadas para el caso con decremento térmico

En cuanto a la capa de 90, se espera que esta se alargue menos longitudinalmente en el caso con decremento térmico. Esto se debe a que por el efecto de la temperatura esta capa se está contrayendo en esa dirección y, por tanto, debería contrarrestar, al menos levemente, el alargamiento producido por la condición de contorno en tensiones. Sin embargo, en las Figuras 4-33 y 4-34, puede verse que los desplazamientos en la dirección longitudinal son mayores para el caso con temperatura. Este resultado parece sorprendente en un principio, pero puede explicarse si se tiene en cuenta la compatibilidad de las deformaciones entre capas: la capa de 90 sigue dilatándose para poder garantizarla. Por tanto, si sometiéramos a la capa de 90 de manera aislada al decremento térmico, esta actuaría como se espera, pero al estar en contacto con las dos capas de 0 se ve forzada a modificar su comportamiento.

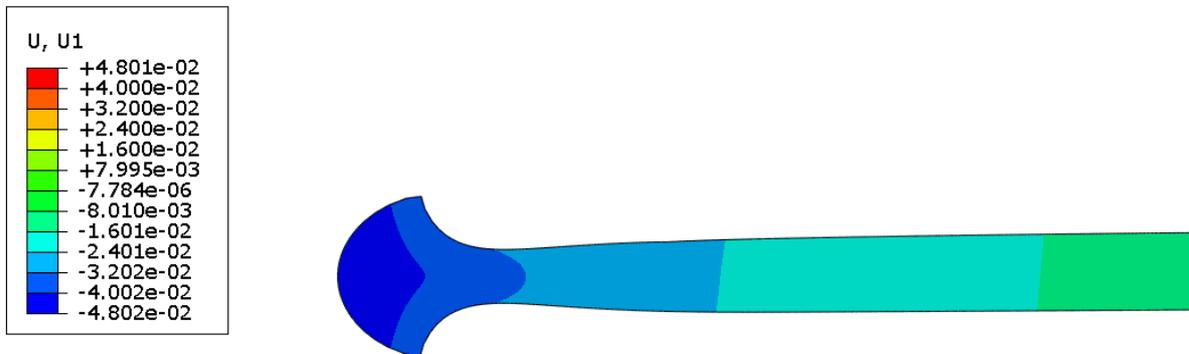


Figura 4-33. Representación de los desplazamientos longitudinales en la capa de 90 deformada para el caso sin decremento térmico

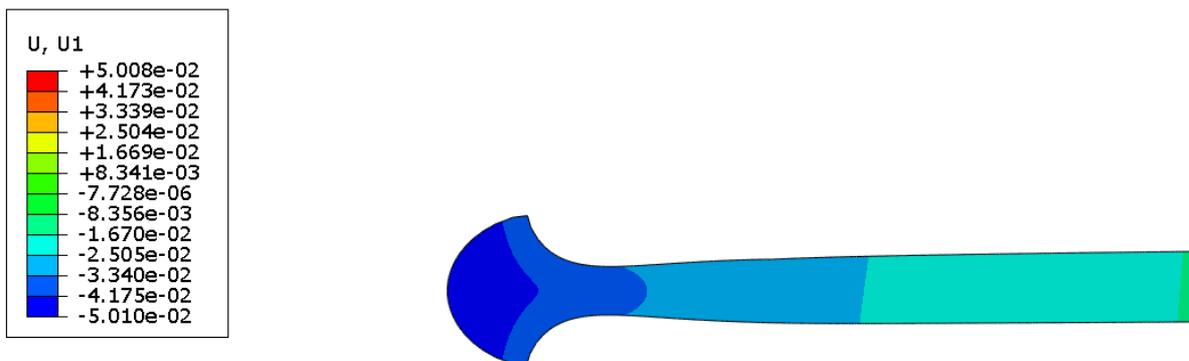


Figura 4-34. Representación de los desplazamientos longitudinales en la capa de 90 deformada para el caso con decremento térmico

Todo esto provoca una alteración en el estado tensional: al contraerse transversalmente de manera diferente, ya que los coeficientes de dilatación térmica no son iguales, dos capas que están en contacto y una alargarse longitudinalmente mientras la otra se acorta, es evidente que deben generarse unas tensiones que no aparecían en el caso en el que no se tenía en cuenta la variación de temperatura. De esta manera, se entiende que todas las tensiones hayan aumentado su valor.

4.5.3 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90 con diferentes orientaciones

Si se recuerda, el estudio que se realizó anteriormente con estos modelos tenía como objetivo ver cómo afectaba la no existencia de delaminación sobre las energías disponibles para hacer crecer la grieta.

Ahora, van a compararse los resultados obtenidos en aquel momento, con los obtenidos sometiendo además al modelo a un decremento térmico. Se representan en las siguientes gráficas las evoluciones de las energías para los casos con y sin decremento térmico.

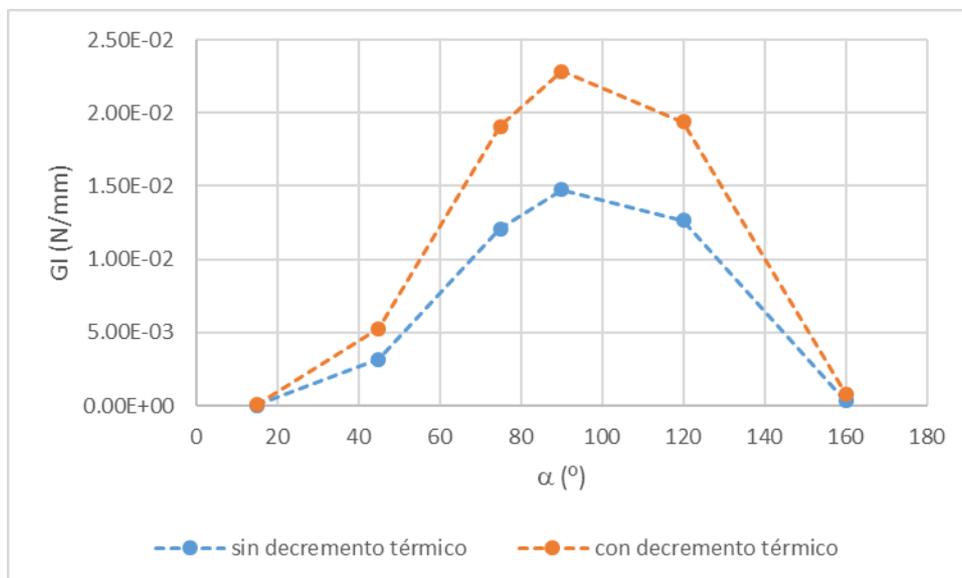


Gráfico 4-22. Comparación de GI en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

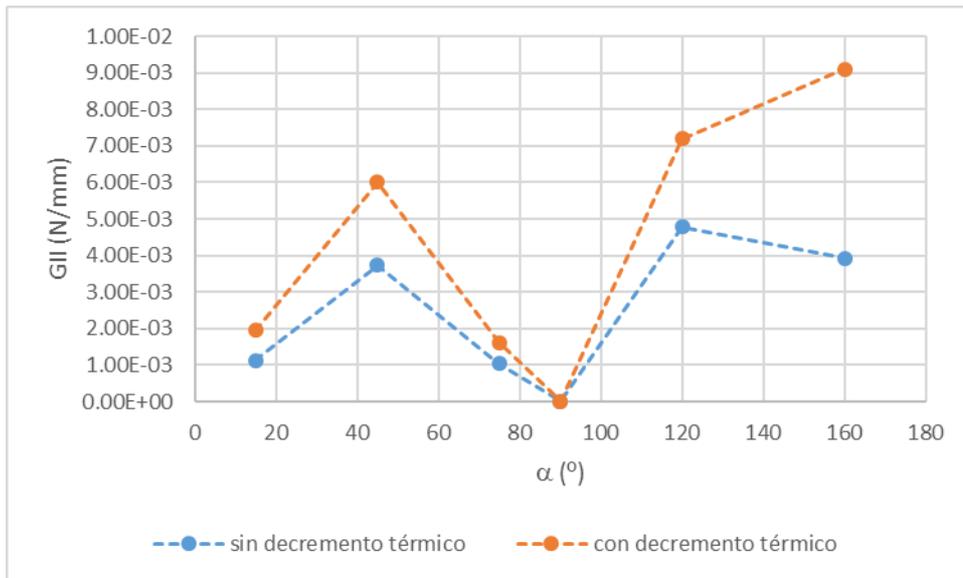


Gráfico 4-23. Comparación de GII en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

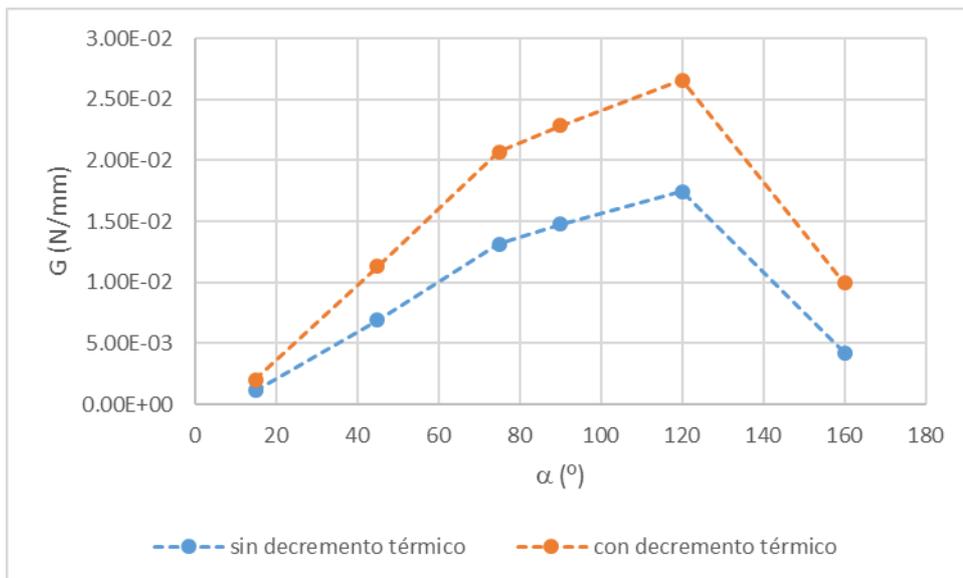


Gráfico 4-24. Comparación de G en los modelos con grieta en la capa de 90 para los casos con y sin decremento térmico

Puede apreciarse que, para estos modelos, al igual que en los que sí existía delaminación, los valores de las energías aumentan al considerar el efecto de la temperatura sobre el modelo, pero la forma de las evoluciones sigue siendo la misma.

4.5.4 Modelo con dos delaminaciones

En el estudio con el modelo en el que aparecían dos delaminaciones lo que se analizó fueron las tensiones circunferenciales en los fondos de ambas grietas.

Se van a obtener ahora, de la misma manera, los mapas de tensiones circunferenciales y a compararlos con los

obtenidos anteriormente sin considerar el decremento térmico.

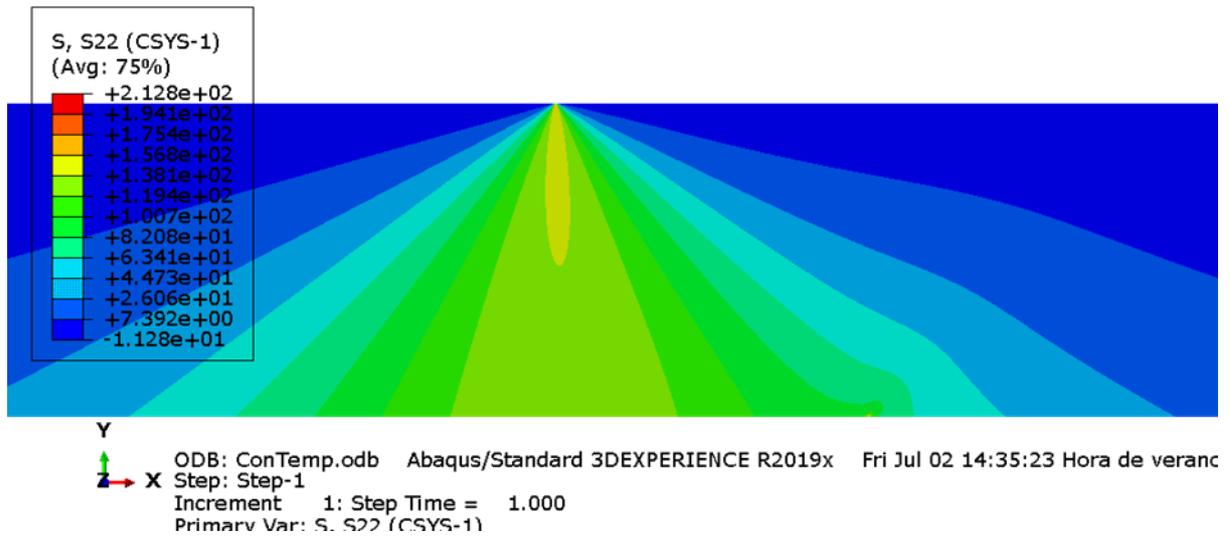


Figura 4-35. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación superior aplicando el decremento térmico

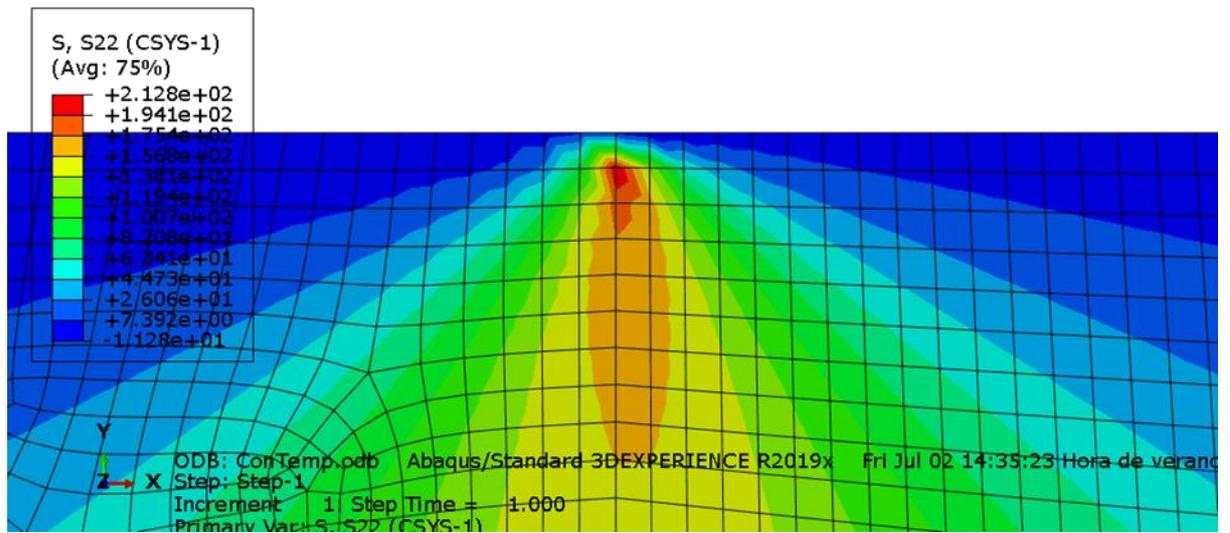


Figura 4-36. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior aplicando el decremento térmico

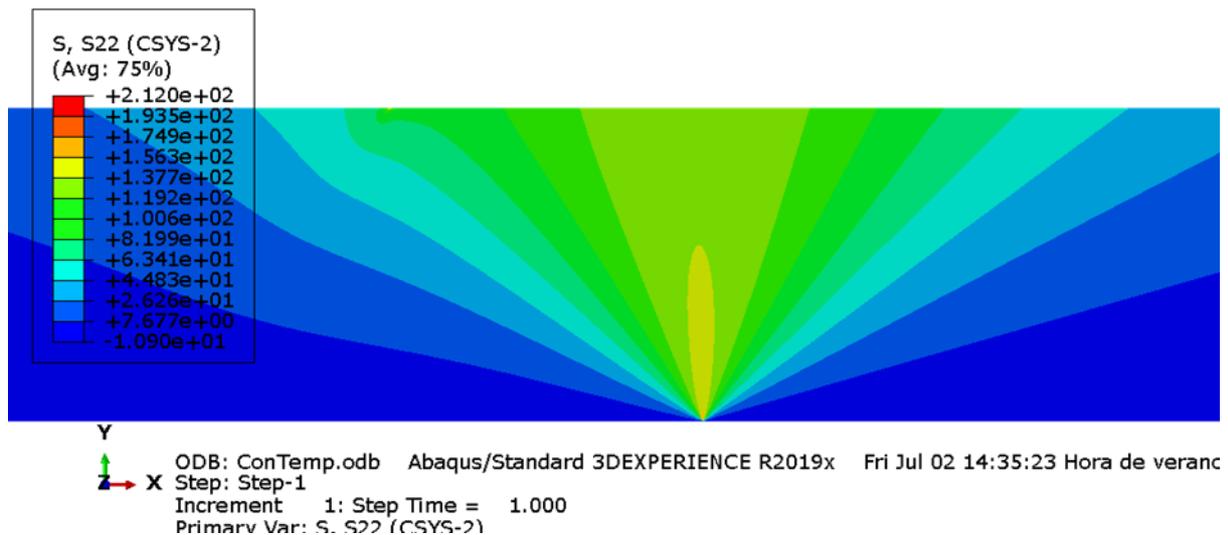


Figura 4-37. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación inferior aplicando el decremento térmico

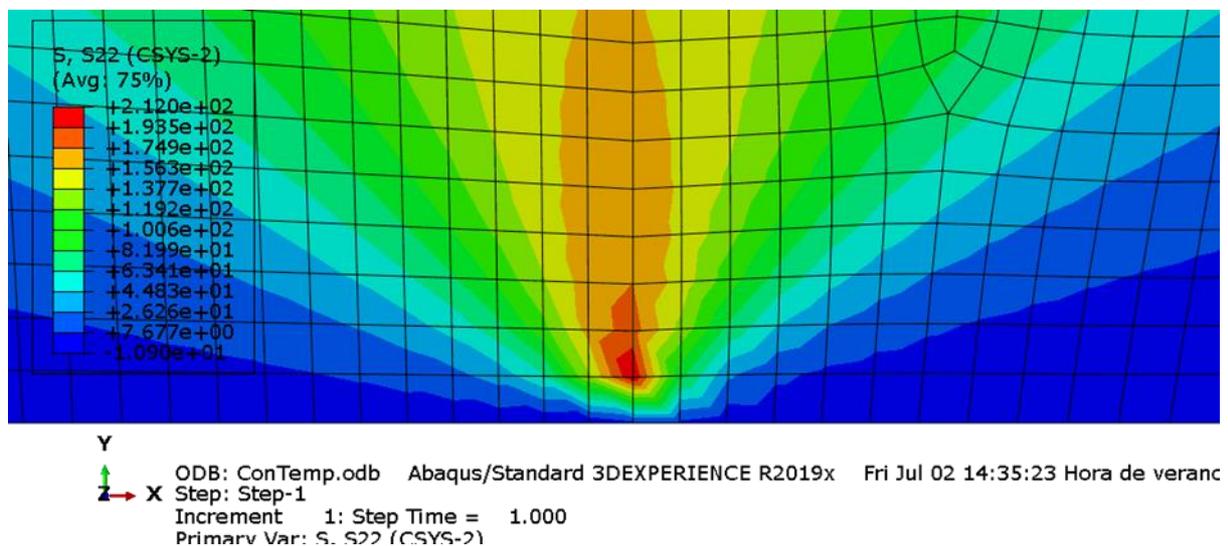


Figura 4-38. Zoom mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior aplicando el decremento térmico

El aspecto de los mapas no cambia en absoluto, siguen siendo iguales que los obtenidos cuando no se aplica el decremento térmico.

Basándonos en lo deducido anteriormente en función de cómo se comportan la capa de 90 y las capas de 0 frente a un cambio de temperatura, los valores de las tensiones circunferenciales deberían haberse visto incrementados. Efectivamente es esto lo que ocurre: para la delaminación superior, en la zona de máxima $\sigma_{\theta\theta}$ aparece ahora un valor de 212.8 MPa, mientras que sin considerar el efecto de la temperatura el valor era de 178.6 MPa; y para la delaminación inferior, el valor de esta $\sigma_{\theta\theta}^{\text{máxima}}$ es de 212 MPa, mientras que sin aplicar el decremento térmico era de 177.8 MPa.

También aumentan, por tanto, las tensiones en este caso, tal y como esperábamos. Sin embargo, al no variar la forma de los mapas de tensiones circunferenciales al aplicar el decremento térmico, tampoco sirve esto como explicación a la aparición de grietas a 45° en la capa de 90.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Tal y como se comentó en el primer capítulo del documento, el objetivo del trabajo es encontrar la justificación de la aparición de un daño no convencional en un determinado tipo de laminado. Experimentalmente se observó que sometiendo el laminado con el que se ha estado trabajando a tracción aparecían unas grietas que se internaban en la capa de 90, desde la interfase, con una orientación de 45°. Esto es algo sorprendente, ya que se esperaba que las grietas aparecieran en dirección perpendicular a la aplicación de la carga. Por eso se decidió realizar una serie de estudios en busca de la explicación a este fenómeno inesperado. Todos los estudios se han realizado numéricamente, mediante la implementación de modelos de elementos finitos en el programa ABAQUS.

Además de la grieta a 45°, en los laminados ensayados también aparecían delaminaciones de gran tamaño. Se pensó entonces que podían ser estas delaminaciones anteriores a la grieta de la capa de 90 y que su presencia en el laminado podía alterar el comportamiento, haciendo que este no fuera el esperado.

Partiendo de esta idea y como punto de inicio, se decidió generar una serie de modelos en los que solo aparecía una delaminación. Se usaron diferentes tamaños de la misma para ver si la variación de este parámetro era relevante en cuanto al objetivo buscado. El análisis de estos modelos se basó en el Criterio de Máxima Tensión Circunferencial, es decir, en cada uno de ellos se estudiaron las tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación sabiendo que la dirección más probable de aparición de una grieta es aquella en la que estas tensiones son máximas. Para la mayoría de los casos, la zona de concentración de tensiones circunferenciales estaba orientada a 90°, tal y como se esperaba. Sin embargo, para tamaños grandes de delaminación parece apreciarse una ligera orientación de esta zona a 45°.

Tras ese resultado ligeramente esperanzador, se decide continuar el estudio, analizando los valores de los índices de liberación de energía (G) para diferentes orientaciones de una microgrieta (0.02 mm) que se interna en la capa de 90 desde el fondo de una delaminación de 2.1 mm. Entre los resultados obtenidos con estos modelos no aparece evidencia clara de que la dirección más probable de crecimiento de la grieta esté orientada a 45° con respecto a la interfase.

Llegados a este punto, se plantea ver cómo cambian los resultados si no se considera la existencia de ninguna delaminación en el laminado, es decir, solo aparece la microgrieta que se interna en la capa de 90 desde la interfase. Como se esperaba, los valores de los índices de liberación de energía son menores en caso de que no haya una delaminación preexistente. Esto quiere decir que, en cualquier orientación, es más probable que la grieta se genere si parte desde el fondo de una delaminación de gran tamaño.

La siguiente idea planteada fue la existencia de dos delaminaciones, una en cada interfase, pensando que podría aparecer una grieta que fuera de fondo a fondo de las mismas atravesando la capa de 90 con una orientación de 45°. Analizando las tensiones circunferenciales en los fondos de ambas delaminaciones, se observó que la presencia de otra delaminación no afecta significativamente al estado tensional en el fondo de la primera. Por tanto, igual que en los modelos anteriores, sigue sin encontrarse la justificación buscada.

El último estudio realizado se basa en aplicar a todos los modelos un decremento térmico, simulando el enfriamiento al que se somete este tipo de laminado durante su fabricación tras el curado. Esto parte de la idea de que el comportamiento del laminado varía al sufrir un cambio de temperatura, pudiendo generarse tensiones que no han aparecido hasta el momento. Al obtener los resultados, se ve que, efectivamente, el comportamiento del laminado ha variado (mayores tensiones, deformaciones diferentes por la dilatación y contracción térmicas, etc.), pero dichas variaciones no justifican de la generación de una grieta a 45°.

Por tanto, como conclusión final puede decirse que no se ha encontrado evidencia con los modelos numéricos desarrollados y a partir de las hipótesis asumidas que apoye la aparición de una grieta a 45° en la capa de 90 de un laminado [0₂ 90]_s sometido a tracción.

Al no haber podido cumplirse el objetivo último del trabajo, encontrar una explicación para la aparición del daño no convencional observado experimentalmente, quedan varias líneas de investigación abiertas para seguir trabajando en busca de la explicación:

- 1) Explorar otras vías de inicio del daño

- A) Los estudios plasmados en este documento parten de la idea de que existe una delaminación a partir de la cual se genera la grieta que se interna en la capa de 90. Puede plantearse no considerar la preexistencia de una delaminación y suponer que la grieta aparece directamente centrada en la capa de 90, analizando los resultados para varios tamaños de la misma.
 - B) Considerar la rotura de una fibra en la capa de 0 a partir de la cual pudiera producirse la delaminación y posterior grieta a 45° en la capa de 90.
- 2) Explorar otro tipo de modelos:
- A) En vez de un modelo puramente mesomecánico, analizar el problema desde el punto de vista micromecánico (es decir, distinguiendo entre fibra y matriz en las diferentes capas, en particular en la de 90), incluso, emplear un modelo multiescala (modelando un volumen representativo de fibras y matriz en la capa de 90 próxima a la interfase con la capa de 0) insertando todo ello en un modelo mesomecánico.
 - B) Explorar un enfoque global de medición de la energía liberada asumiendo la generación directa de la grieta a 45° en la capa de 90, incluyendo también delaminaciones de distintos tamaños.
- 3) En el campo experimental pueden realizarse más ensayos con este laminado y otros con diferente apilado de capas intentando detectar las fases en las que se genera este daño no convencional.

REFERENCIAS

- [1]. Paris F., Cañas J., Marín J. C. y Barroso A. *Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos*, Sevilla: Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla.

- [2]. Peña, M.J., 2017. *Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

- [3]. Simulia, «Analysis Users Guide,» Abaqus 6.14 Documentation

- [4]. Irwin GR. *Analysis of stresses and strain near the end of a crack transversing a plate*. J Appl Mech 1957;24:361-4.

