

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Influencia del efecto borde en la aparición de grietas transversales con orientación no convencional en la capa de 90° de laminados cross-ply

Autora: Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutora: Elena Correa Montoto

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

**Influencia del efecto borde en la aparición de grietas  
transversales con orientación no convencional en la  
capa de 90° de laminados cross-ply**

Autora:

Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutora:

Elena Correa Montoto

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster: Influencia del efecto borde en la aparición de grietas transversales con orientación no convencional en la capa de 90° de laminados cross-ply

Autor: Carmen A. Izquierdo Dávila

Tutor: Elena Correa Montoto

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*





# Agradecimientos

---

A mi familia por acompañarme y apoyarme durante toda mi etapa universitaria que acaba con la presentación de este trabajo.

A Elena por su disponibilidad constante, por todo lo que me ha enseñado durante la realización de este trabajo y por hacerme ver una parte de la ingeniería con la que no había tenido contacto.

A mis amigos por escucharme siempre, ayudarme a salir de la rutina y enseñarme que hay más formas de vivir.

Gracias a todos.

Carmen A. Izquierdo Dávila

2023



# 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.

Todos los estudios presentados en este documento se apoyan en investigaciones anteriores que brindaron resultados muy interesantes, aunque sin llegar a la justificación que se buscaba. Tomando en consideración las conclusiones a las que ya se ha llegado, 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.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Gráficos</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Antecedentes y motivación</i>	1
1.1.1 Modelo con delaminaciones de diferentes tamaños aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa.	3
1.1.2 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90° con diferentes orientaciones desde el fondo de la delaminación de 2.1 mm aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa	5
1.1.3 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90° con diferentes orientaciones, sin partir de una delaminación, aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa	8
1.1.4 Modelo con dos delaminaciones aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa	9
1.1.5 Efecto de la temperatura	12
1.2. <i>Objetivo</i>	13
<b>2 Herramientas y métodos empleados</b>	<b>15</b>
2.1 <i>Método de Elementos Finitos y Abaqus</i>	15
2.2 <i>Mecánica de la Fractura</i>	16
2.3 <i>El efecto borde</i>	16
2.4 <i>Materiales</i>	17
<b>3 Modelos realizados y presentación de resultados asociados a ellos</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Efecto borde modelado como carga transversal aplicada de manera exterior al modelo</i>	11
3.1.1 Modelos solo con delaminación	12
3.1.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	16
3.1.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	19
3.2 <i>Efecto borde modelado como condición inicial aplicada en diferentes zonas de la capa de 90° del laminado</i>	20
3.2.1 Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	21
3.2.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	23
3.2.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	25
3.3 <i>Modelos con doble espesor de la capa de 90°</i>	27
3.3.1 Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	27
3.3.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	29

3.3.3	Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	31
3.4	<i>Modelos con espesor mitad de la capa de 90°</i>	33
3.4.1	Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)	34
3.4.2	Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño	36
3.4.3	Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño	38
3.5	<i>Crecimiento de la grieta que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm) en modelo con espesor original de la capa de 90°</i>	40
3.6	<i>Crecimiento de un pequeño despegue central en la interfase del modelo de espesor normal de la capa de 90°</i>	43
<b>4</b>	<b>Conclusiones y Desarrollos futuros</b>	<b>45</b>

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 1-1. Evolución de las diferentes energías con $\alpha$ para los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de $90^\circ$ .	8
Gráfico 1-2. Comparación de G para los modelos con grieta en la capa de $90^\circ$ con y sin delaminación.	9
Gráfico 3-1. Evolución de las tensiones circunferenciales, para diferentes ángulos, con la distancia al fondo de la delaminación de 2.1 mm.	15
Gráfico 3-2. Evolución de G frente a la orientación de una grieta que parte del fondo de una delaminación de 2.1 mm aplicando al modelo carga longitudinal y carga transversal del 40%.	18
Gráfico 3-3. Evolución G- $\alpha$ para diferentes valores de la carga transversal.	18
Gráfico 3-4. Evolución de G con $\alpha$ para grieta de triple tamaño aplicando carga transversal de diferentes valores y carga longitudinal.	20
Gráfico 3-5. Evolución G- $\alpha$ para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.	24
Gráfico 3-6. Evolución G- $\alpha$ para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	25
Gráfico 3-7. Evolución G- $\alpha$ (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.06 mm.	26
Gráfico 3-8. Evolución G- $\alpha$ (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	26
Gráfico 3-9. Evolución G- $\alpha$ en doble espesor para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.	31
Gráfico 3-10. Evolución G- $\alpha$ en doble espesor para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	31
Gráfico 3-11. Evolución G- $\alpha$ en doble espesor (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de la capa de $90^\circ$ de 0.06 mm de ancho.	33
Gráfico 3-12. Evolución G- $\alpha$ en doble espesor (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	33
Gráfico 3-13. Evolución G- $\alpha$ en espesor mitad para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.	37
Gráfico 3-14. Evolución G- $\alpha$ en espesor mitad para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	38
Gráfico 3-15. Evolución G- $\alpha$ en espesor mitad (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de $90^\circ$ .	39
Gráfico 3-16. Evolución G- $\alpha$ (simulación de crecimiento de la grieta que atraviesa la capa de $90^\circ$ partiendo de una delaminación).	41
Gráfico 3-17. Evolución G- $\alpha$ (simulación de crecimiento de la grieta que atraviesa la capa de $90^\circ$ sin delaminación).	41
Gráfico 3-18. Evolución de G con la longitud de la delaminación.	44





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Micrografía en la que se observa la grieta a 45° que aparece en la capa de 90°.	1
Micrografía en la que se observa la grieta a 45° que aparece en la capa de 90°.	1
Figura 1-2. Esquema general con las dimensiones de los diferentes modelos	2
Figura 1-3. Representación de los apoyos usados para restringir los movimientos como sólido rígido del modelo.	2
Figura 1-4 . Representación de la aplicación de la condición de contorno en tensiones.	3
Figura 1-5 . Esquema de los modelos con delaminación.	3
Figura 1-6 . Imagen de la malla para el modelo con delaminación.	4
Figura 1-7. Zoom de la malla en el fondo de la delaminación (punto rojo).	4
Figura 1-8. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm.	4
Figura 1-9. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm.	5
Figura 1-10. Esquema que representa los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de 90°.	6
Figura 1-11. Fondo de la grieta que se interna en la capa de 90° (punto rojo).	6
Figura 1-12. Imagen de la malla para el modelo con $\alpha = 45^\circ$ .	6
Figura 1-13. Zoom de la malla en la zona de interés para el modelo con $\alpha = 45^\circ$ (fondo de la grieta señalado en rojo).	7
Figura 1-14. Zoom 2 de la malla en la zona de interés para el modelo con $\alpha = 45^\circ$ (fondo de la grieta señalado en rojo).	7
Figura 1-15. Esquema que representa los modelos con y grieta que se interna en la capa de 90° sin delaminación.	8
Figura 1-16. Esquema del modelo con dos delaminaciones.	10
Figura 1-17. Visión completa de la malla del modelo con dos delaminaciones.	10
Figura 1-18. Zoom de la malla acercándose a la zona de interés (los dos fondos marcados con puntos rojos).	10
Figura 1-19. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo).	11
Figura 1-20. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo).	11
Figura 1-21. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior.	12
Figura 1-22. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior.	12
Figura 2-1. Esquema del modelo donde se representan las direcciones x e y.	17
Figura 2-2. Representación de la dirección 1 en cada una de las capas del laminado.	18
Figura 3-1. Representación de las condiciones de contorno aplicadas sobre el modelo.	12
Figura 3-2. Configuración de carga desde el módulo Load de Abaqus.	12
Figura 3-3. Visión general del mallado del modelo con delaminación de 2.1 mm.	13
Figura 3-4. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 2.1 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.	13
Figura 3-5. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 0.02 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.	14

Figura 3-6. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 1.25 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.	14
Figura 3-7. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 1.875 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.	14
Figura 3-8. Esquema que representa los puntos donde se consultaron las tensiones circunferenciales.	15
Figura 3-9. Configuración de cargas desde el módulo Load de Abaqus para el modelo con $\alpha = 45^\circ$ .	16
Figura 3-10. Imagen del mallado del modelo con $\alpha = 45^\circ$ marcando el fondo de la grieta.	16
Figura 3-11. Zoom de la malla del modelo con $\alpha = 45^\circ$ en la zona de interés marcando el fondo de la grieta.	17
Figura 3-12. Zoom 2 de la malla del modelo con $\alpha = 45^\circ$ en la zona de interés marcando el fondo de la grieta.	17
Figura 3-13. Imagen del mallado del modelo con $\alpha = 45^\circ$ y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.	19
Figura 3-14. Zoom en la zona de interés del mallado del modelo con $\alpha = 45^\circ$ y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.	19
Figura 3-15. Zoom 2 en la zona de interés del mallado del modelo con $\alpha = 45^\circ$ y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.	20
Figura 3-16. Esquema en el que se representan las dos opciones en cuanto a zonas de aplicación de la tensión transversal como condición inicial.	21
Figura 3-17. Imagen del modelo en que se ven las particiones de la capa de $90^\circ$ ( $c = 0.02$ mm).	21
Figura 3-18. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la delaminación tras realizar las particiones.	22
Figura 3-19. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (carga longitudinal y carga transversal como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).	22
Figura 3-20. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 m (carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en toda la capa de $90^\circ$ ).	23
Figura 3-21. Imagen del modelo para $\alpha = 45^\circ$ en que se ven las particiones de la capa de $90^\circ$ ( $c = 0.02$ mm).	23
Figura 3-22. Imagen de la malla para el modelo con $\alpha = 45^\circ$ en la que se aprecia la variación de la malla con la partición (en rojo el fondo de la grieta).	24
Figura 3-23. Imagen del modelo para $\alpha = 45^\circ$ en que se ven las particiones de la capa de $90^\circ$ ( $c = 0.06$ mm).	25
Figura 3-24. Imagen de la malla del modelo con $\alpha = 45^\circ$ tras remallar por las particiones (en rojo el fondo de la grieta).	26
Figura 3-25. Esquema general de los modelos con doble espesor.	27
Figura 3-26. Imagen del modelo solo con delaminación de doble espesor.	28
Figura 3-27. Zoom de la malla en la zona del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con doble espesor.	28
Figura 3-28. Zoom 2 de la malla en la zona del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con doble espesor.	28
Figura 3-29. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (doble espesor, carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).	29
Figura 3-30. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (doble espesor, carga longitudinal y carga transversal del 40% en toda la capa de $90^\circ$ ).	29
Figura 3-31. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.02 mm en doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	30

Figura 3-32. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	30
Figura 3-33. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	30
Figura 3-34. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.06 mm en doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	32
Figura 3-35. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	32
Figura 3-36. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para $\alpha = 45^\circ$ .	32
Figura 3-37. Esquema general de los modelos con espesor mitad.	34
Figura 3-38. Imagen del modelo solo con delaminación en espesor mitad.	34
Figura 3-39. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con espesor mitad.	35
Figura 3-40. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con espesor mitad.	35
Figura 3-41. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (espesor mitad, carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).	35
Figura 3-42. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (espesor mitad, carga longitudinal y carga transversal del 40% en toda la capa de $90^\circ$ ).	36
Figura 3-43. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.02 mm en espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	36
Figura 3-44. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	37
Figura 3-45. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	37
Figura 3-46. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.06 mm en espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	38
Figura 3-47. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	39
Figura 3-48. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para $\alpha = 45^\circ$ .	39
Figura 3-49. Esquema de los modelos para estudiar el posible crecimiento de una grieta atravesando la capa de $90^\circ$ a $45^\circ$ desde el fondo de una delaminación.	40
Figura 3-50. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 0.02 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de $90^\circ$ ).	42
Figura 3-51. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 1.52 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de $90^\circ$ ).	42
Figura 3-52. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 2 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de $90^\circ$ ).	43
Figura 3-53. Esquema que representa el crecimiento de delaminación que se intentó modelar en este apartado.	43



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Por todos es sabido que el ámbito de los materiales compuestos actualmente contextualiza muchos proyectos de diferentes ramas de la ingeniería. Este trabajo se encuentra en el marco de estos interesantes materiales y se basa en el uso de modelos de Elementos Finitos y conocimientos relativos a Mecánica de la Fractura para estudiar el comportamiento de un laminado concreto.

Este trabajo está motivado por una serie de ensayos de tracción realizados a un determinado laminado de los que se obtuvieron resultados inusuales: se produjo un fallo no convencional aparentemente sin explicación. El punto de partida del mismo, sin embargo, no son directamente estos ensayos ya que tras la realización de mi Trabajo Fin de Grado [1] se llegó a una serie de conclusiones que servirán como base para entender el porqué de lo realizado en el presente trabajo. Es cierto que no se consiguió dar explicación a lo observado experimentalmente, pero sí se descartaron ciertas explicaciones que se plantearon al inicio.

Este primer capítulo tiene la finalidad de contextualizar al lector presentando un resumen de lo realizado en el trabajo anteriormente mencionado, explicando los antecedentes e ilustrando el objetivo que se pretende conseguir.

## 1.1. 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, participa activamente en la investigación en el ámbito de los materiales compuestos, entre otros.

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 estaban ensayando probetas del laminado  $[0_2 90 0_2]$  hechas de material AS4/8552 (fibra de carbono en matriz polimérica). Al someter estas probetas a ensayos de tracción se produjeron delaminaciones de gran tamaño, desde cuyo fondo aparecía una grieta que atravesaba la capa de  $90^\circ$  con una orientación de aproximadamente  $45^\circ$  con respecto a la interfase  $0^\circ$ - $90^\circ$ . En la Figura 1-1 puede verse una micrografía de las probetas ensayadas.



Figura 1-1. Micrografía en la que se observa la grieta a  $45^\circ$  que aparece en la capa de  $90^\circ$ .

Como resultado de estos ensayos se esperaba obtener una grieta que atravesara el laminado perpendicularmente a la dirección de aplicación de la carga y el sorprendente fallo observado es lo que llevó al desarrollo de varios trabajos, entre ellos mi Trabajo Fin de Grado, cuyo objetivo era encontrar una explicación a lo observado experimentalmente.

El trabajo que sirve como punto de partida a los estudios plasmados en el presente documento se basó, también, en la realización de modelos de Elementos Finitos, usando el programa Abaqus, que simularan las diferentes condiciones que parecían poder provocar el fallo observado experimentalmente.

El ensayo de tracción realizado decidió modelarse como un problema plano (2D) para simplificación de los modelos a realizar y de los resultados a analizar. Todos ellos modelaban la probeta con las mismas dimensiones, siendo el esquema general de los mismos representado en la Figura 1-2 y las condiciones de contorno aplicadas sobre el mismo las mostradas en las Figuras 1-3 y 1-4.

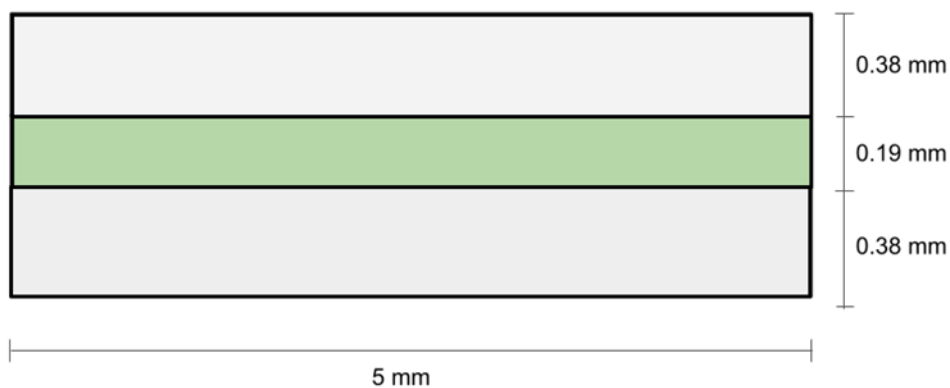


Figura 1-2. Esquema general con las dimensiones de los diferentes modelos

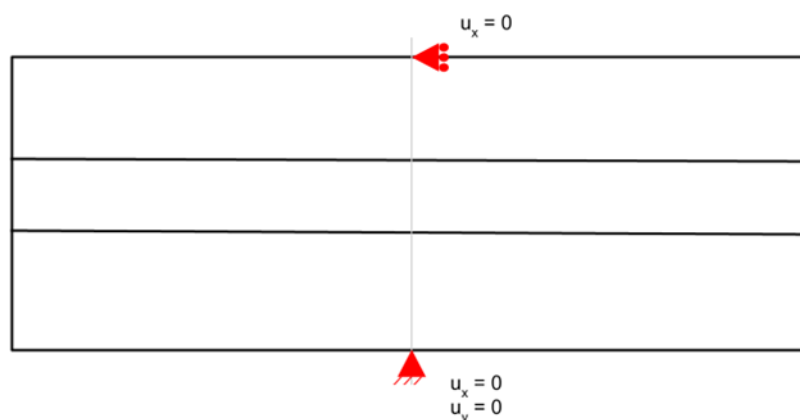


Figura 1-3. Representación de los apoyos usados para restringir los movimientos como sólido rígido del modelo.

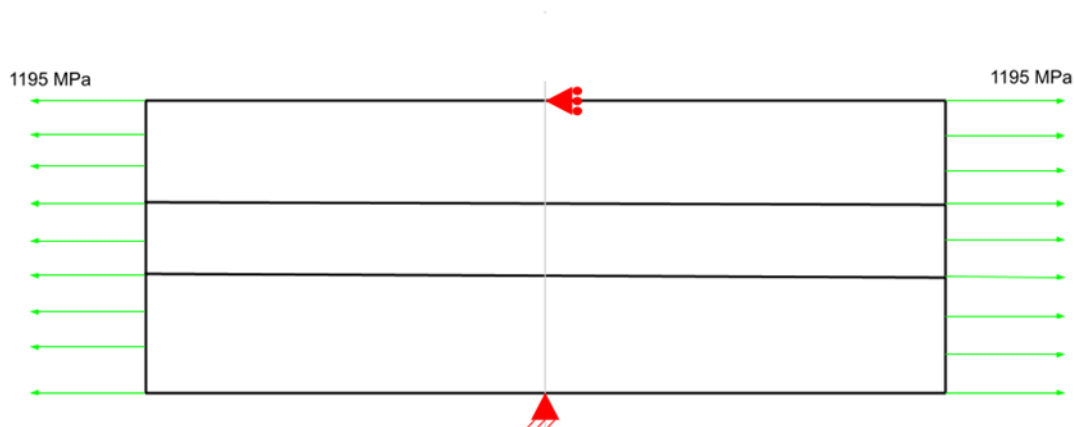


Figura 1-4 . Representación de la aplicación de la condición de contorno en tensiones.

El hecho de que la aplicación de la carga en las probetas en el ensayo de tracción sea modelada en tensiones (de valor 1195 MPa por ser esta la tensión de rotura del laminado) no es trivial. Intentando ser lo más fieles posible a la realidad se probó la aplicación sobre el modelo de la condición de contorno en desplazamiento, que anulaba la posibilidad de que aparecieran desplazamientos diferentes en la capa de  $0^\circ$  y la capa de  $90^\circ$ , afectando esto al estado tensional de las diferentes zonas del modelo. Tras las primeras pruebas, se decidió aplicar sobre todos los modelos la condición de contorno en tensiones porque se obtenían resultados ligeramente más cercanos a lo que se observaba experimentalmente.

A continuación, van a exponerse todos los estudios realizados y resultados obtenidos hasta el momento.

### 1.1.1 Modelo con delaminaciones de diferentes tamaños aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa.

En un primer momento se decidió partir de la idea de la preexistencia de una delaminación desde el fondo de la cual creciera la grieta internándose en la capa de  $90^\circ$  con orientación a  $45^\circ$  respecto a la interfase. Los tamaños de delaminación ( $L$ ) considerados fueron 0.02, 1.25, 1.875, 2.1, 2.4 y 2.5 mm. En la Figura 1-5 puede verse un esquema de los modelos con delaminación y en las Figuras 1-6 y 1-7 quedan representados el aspecto general de la malla de estos modelos y un zoom para apreciar en detalle el mallado en la zona de interés.

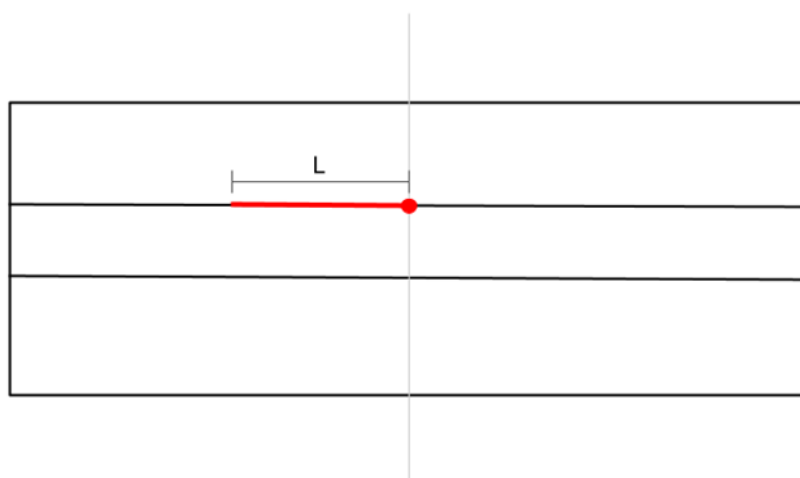


Figura 1-5 . Esquema de los modelos con delaminación.

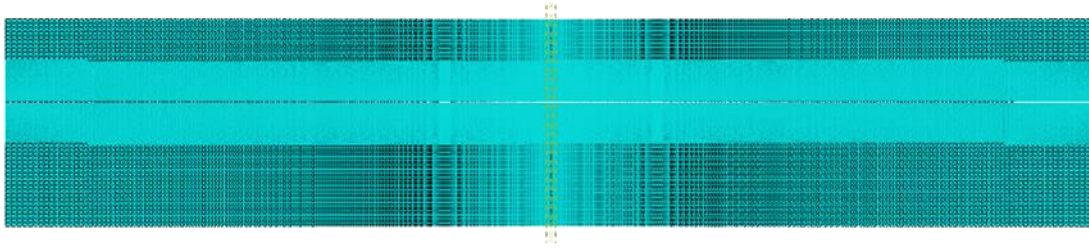


Figura 1-6 . Imagen de la malla para el modelo con delaminación.

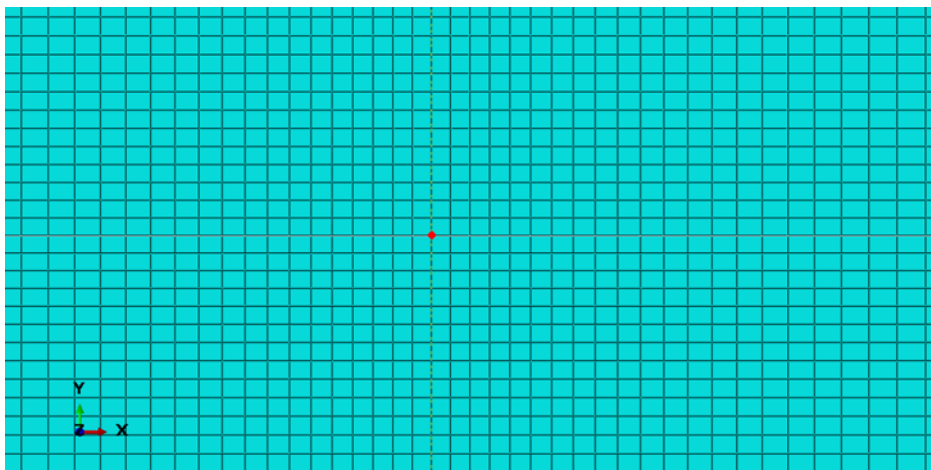


Figura 1-7. Zoom de la malla en el fondo de la delaminación (punto rojo).

Sobre estos modelos se realizó el análisis del mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación. Se buscaba encontrar que la zona de máximas tensiones circunferenciales presentara una orientación similar a la de la grieta que atravesó la capa de  $90^\circ$  en el ensayo realizado. Sin embargo, lo que se observó fue que la zona de máximas tensiones circunferenciales se hacía más pequeña al aumentar el tamaño de la delaminación, pero en ningún caso se encontraron indicios de que una grieta pudiera crecer internándose en la capa de  $90^\circ$  con la orientación observada en los ensayos.

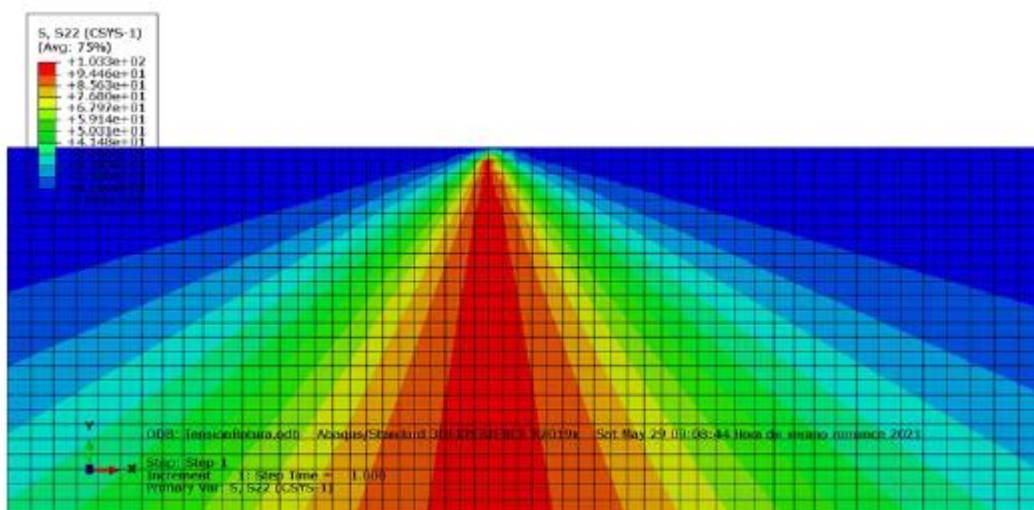


Figura 1-8. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 1.25 mm.



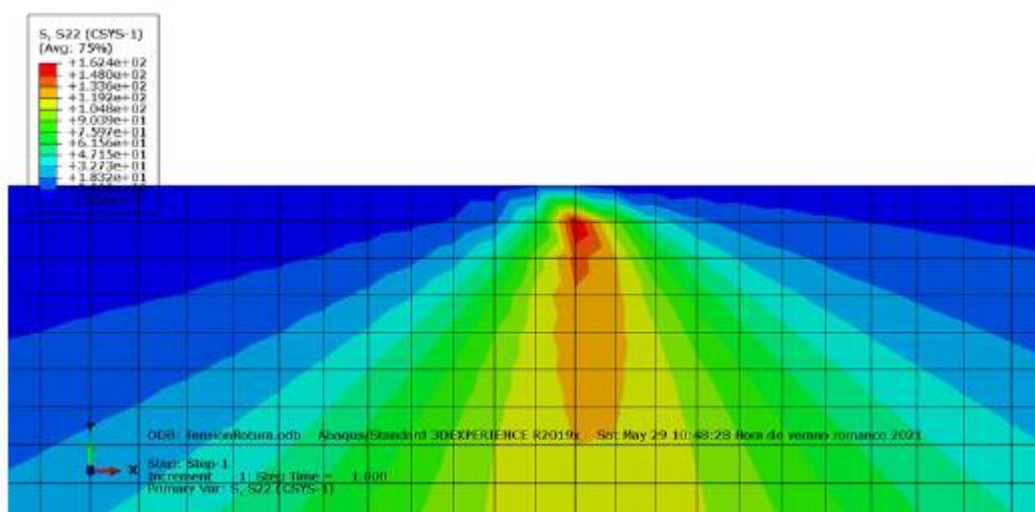


Figura 1-9. Mapa de tensiones circunferenciales para la delaminación de 2.1 mm.

Como puede verse en las Figuras 1-8 y 1-9, la zona de máximas tensiones circunferenciales nos indica que en el caso de que una grieta creciera desde el fondo de la delaminación lo haría en perpendicular a la dirección de la carga exterior aplicada, descartándose por tanto la hipótesis de partida.

### 1.1.2 Modelo con grieta que se interna en la capa de 90° con diferentes orientaciones desde el fondo de la delaminación de 2.1 mm aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa

Tras obtener los resultados pertinentes de los modelos con delaminación de diferentes tamaños, se decide introducir en los modelos, además de la delaminación, una pequeña grieta que se interne en la capa de 90° desde el fondo de la misma con diferentes orientaciones.

El tamaño de delaminación escogido para estos modelos es 2.1 mm, ya que la delaminación observada experimentalmente era de gran tamaño (esta longitud representa más de un 40% del ancho del modelo), mientras que la grieta que se interna en la capa de 90° tiene un tamaño de 0.02 mm, determinado por el tamaño de los elementos con los que se malló esta parte del modelo (se buscaba que fuera lo más pequeña posible). Las Figuras 1-10, 1-11, 1-12, 1-13 y 1-14 sirven para hacerse una idea de los modelos realizados.

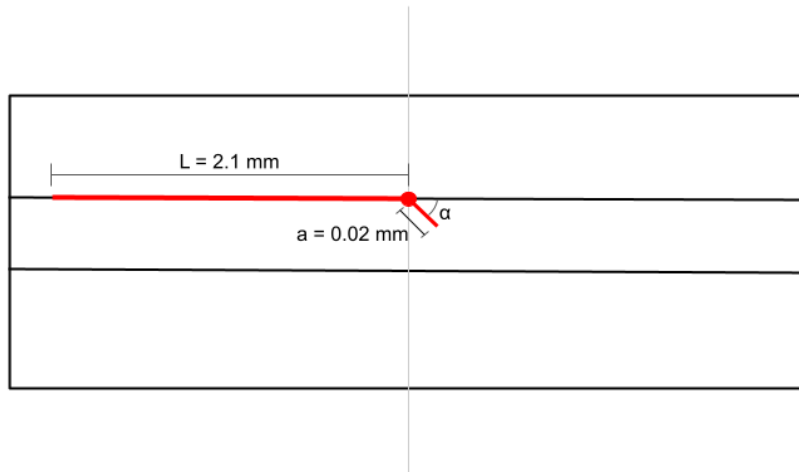


Figura 1-10. Esquema que representa los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$ .

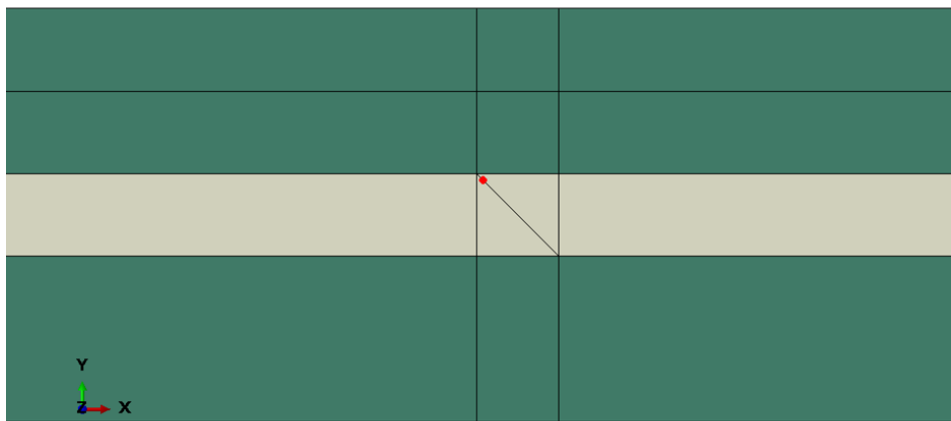


Figura 1-11. Fondo de la grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  (punto rojo).

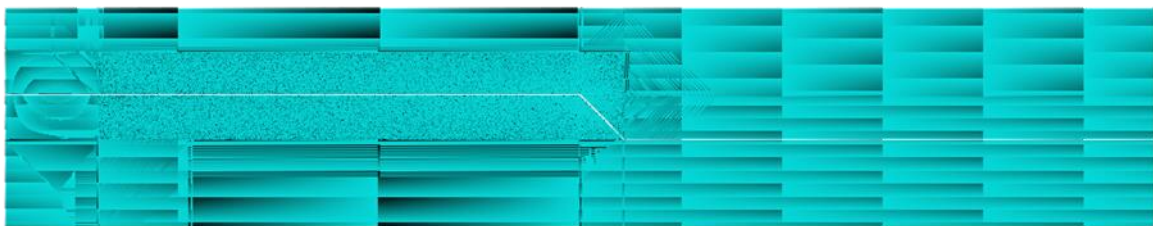


Figura 1-12. Imagen de la malla para el modelo con  $\alpha = 45^\circ$ .

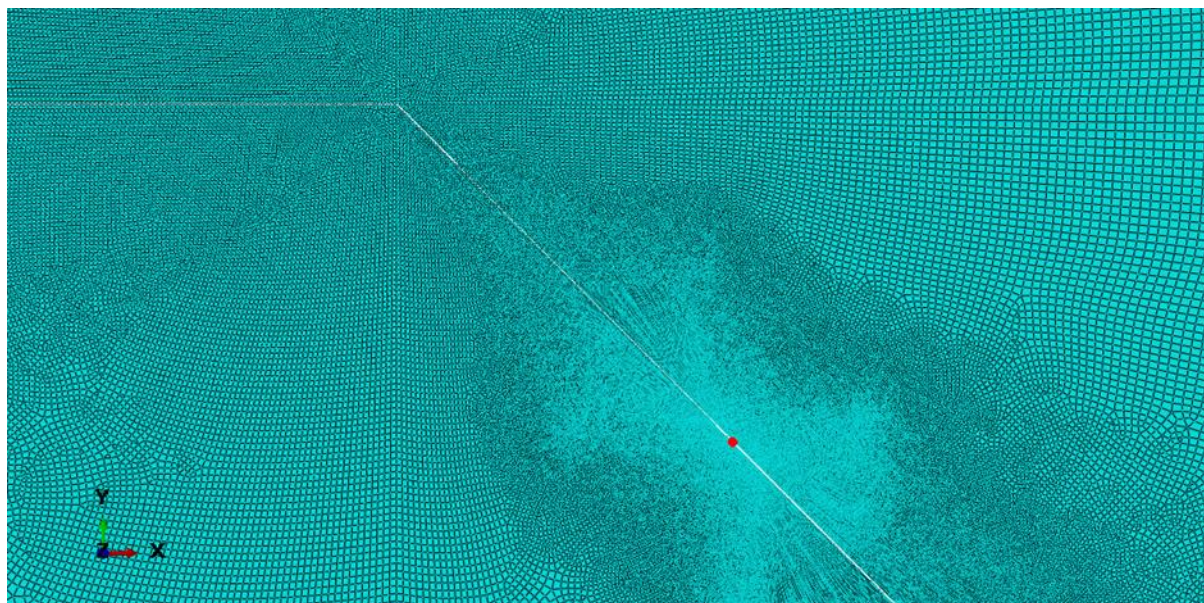


Figura 1-13. Zoom de la malla en la zona de interés para el modelo con  $\alpha = 45^\circ$  (fondo de la grieta señalado en rojo).

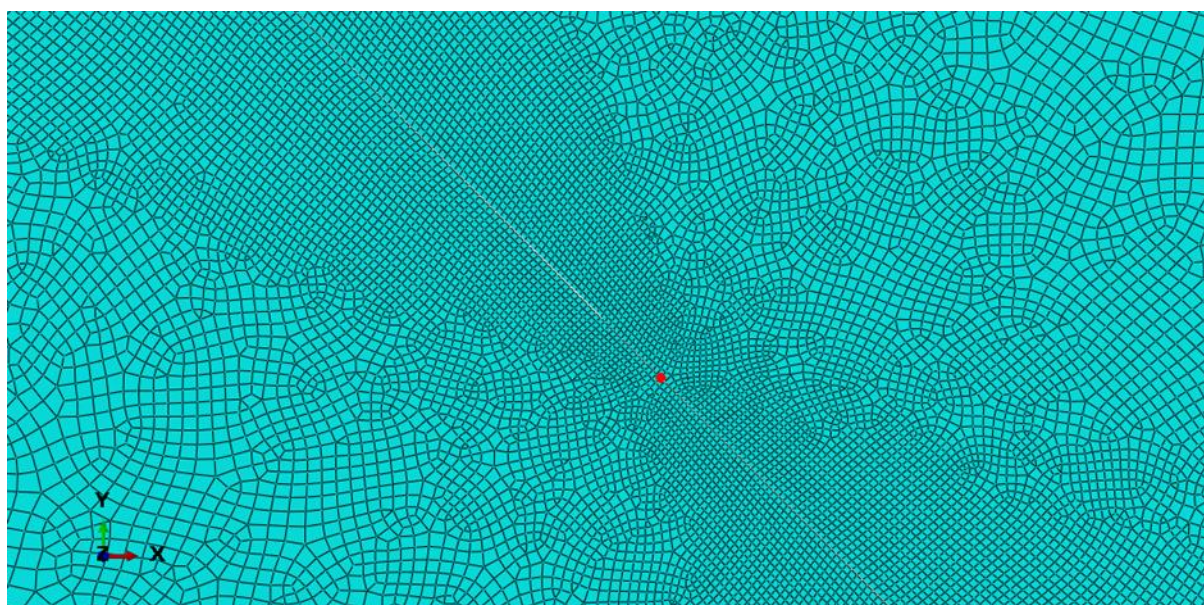


Figura 1-14. Zoom 2 de la malla en la zona de interés para el modelo con  $\alpha = 45^\circ$  (fondo de la grieta señalado en rojo).

Con estos modelos lo que se buscaba es prácticamente lo mismo que con los realizados anteriormente (solo delaminación), es decir, ver cuál sería la orientación más probable de crecimiento de una grieta que nace desde el fondo de una delaminación. En este caso, el estudio se basa en la obtención y el análisis de la evolución de la tasa de liberación de energía ( $G_I$ ,  $G_{II}$  y  $G=G_I+G_{II}$ ) con  $\alpha$ , la orientación de la grieta con respecto a la interfase.

En el Gráfico 1-1 pueden verse los resultados obtenidos.

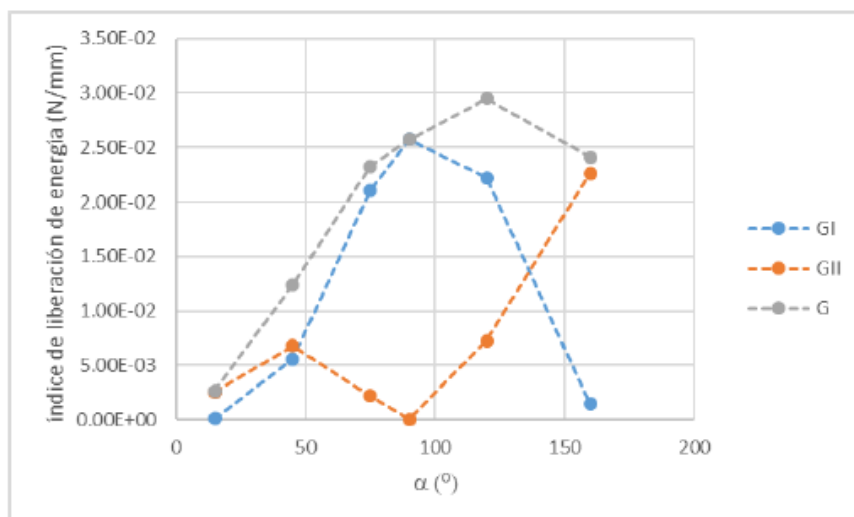


Gráfico 1-1. Evolución de las diferentes energías con  $\alpha$  para los modelos con delaminación y grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$ .

Como puede apreciarse en el Gráfico 1-1 representado, con estos modelos tampoco obtenemos ningún indicio de que la grieta vaya a crecer orientada a  $45^\circ$ , ya que la tasa de liberación de energía es menor para esta orientación que para otras, siendo estas por tanto más probables.

### 1.1.3 Modelo con grieta que se interna en la capa de $90^\circ$ con diferentes orientaciones, sin partir de una delaminación, aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa

Estos modelos se realizaron con la finalidad de ver cómo cambiaba la energía liberada al cerrar la delaminación de los modelos del apartado anterior, para tantear la posibilidad de que primero apareciera la grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  (creciendo a partir de un pequeño despegue de las fibras) y de manera posterior la delaminación. Estos no tuvieron que ser realizados desde cero, sino que se usaron los modelos del apartado anterior modificando la interacción de ciertas superficies de manera que las que antes formaban la delaminación, ahora están “pegadas”. La malla de estos modelos, por tanto, es exactamente igual que la representada en las figuras del apartado anterior. En la Figura 1-15 queda representado un esquema de estos modelos.

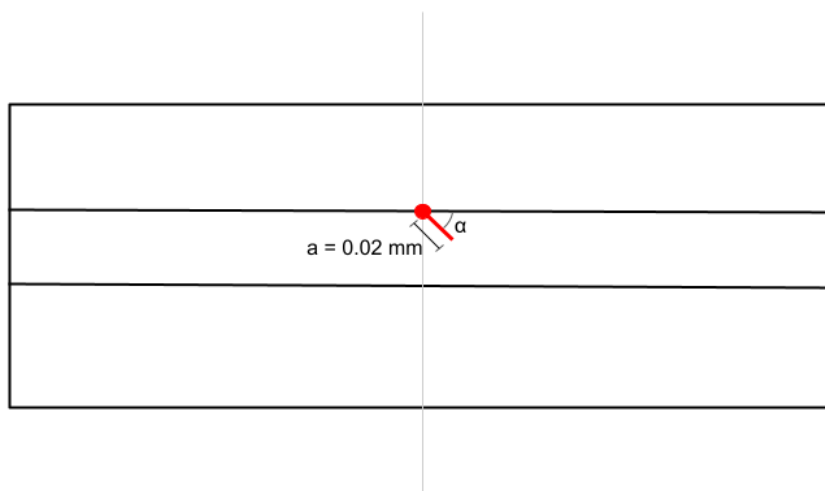


Figura 1-15. Esquema que representa los modelos con grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  sin delaminación.

El estudio realizado es análogo al de los modelos anteriores. En el Gráfico 1-2 aparecen representadas las evoluciones de la tasa de liberación de energía  $G$  con  $\alpha$  obtenida de estos modelos (sin delaminación) y de los modelos del apartado anterior (con delaminación) con el fin de compararlas.

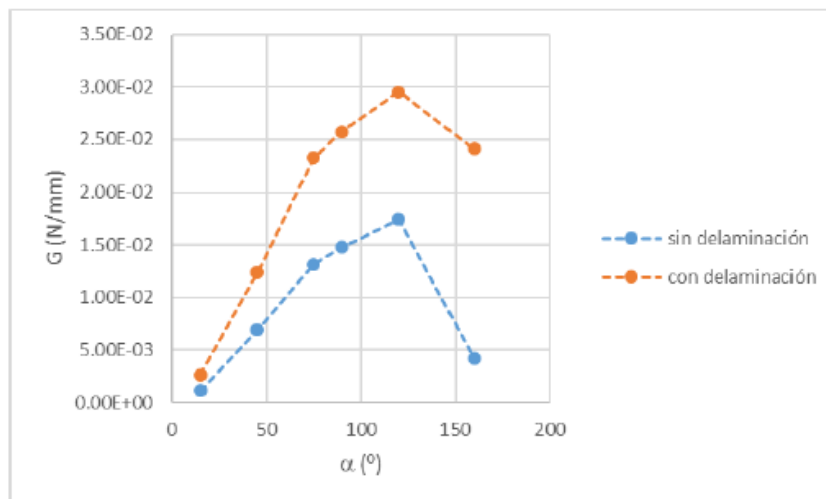


Gráfico 1-2. Comparación de  $G$  para los modelos con grieta en la capa de  $90^\circ$  con y sin delaminación.

La energía es mayor en todos los casos en los que la grieta parte de una delaminación preexistente. Esto quiere decir que, para cualquier orientación, es más probable que la grieta crezca y atravesase la capa de  $90^\circ$  partiendo de una delaminación. En realidad, este resultado no es sorprendente ya que siempre es más fácil que se genere un daño a partir de otro ya generado.

Los resultados reflejan, por tanto, lo mismo que en el apartado anterior, ningún indicio de que la orientación de crecimiento más probable sea a  $45^\circ$ .

#### 1.1.4 Modelo con dos delaminaciones aplicando una tensión longitudinal en los extremos del modelo de 1195 MPa

Los últimos modelos que se realizaron se basaron en la posible existencia de dos delaminaciones de gran tamaño (2.1 mm), una en cada interfase, generándose una grieta que atravesara la capa de  $90^\circ$  yendo de fondo a fondo de las mismas.

Se trata de una ampliación de los primeros modelos realizados, ya que se pensó que la presencia de otra delaminación podría variar el comportamiento del material en el fondo de la primera.

Las Figuras 1-16, 1-17, 1-18, 1-19 y 1-20 ilustran estos modelos.

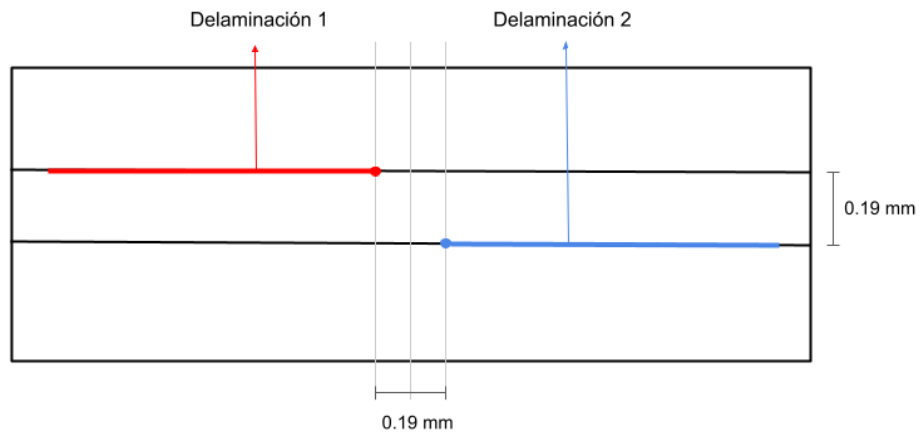


Figura 1-16. Esquema del modelo con dos delaminaciones.

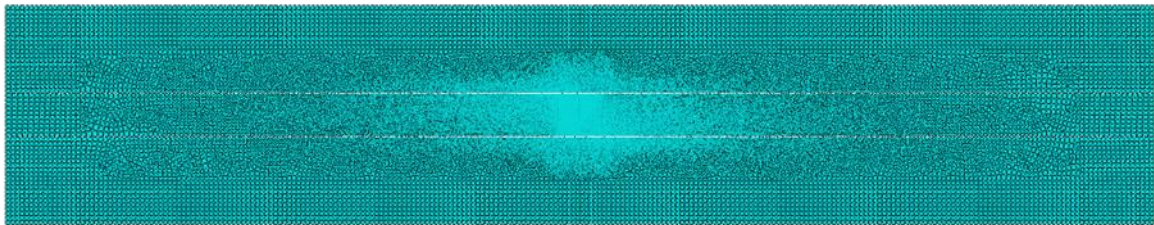


Figura 1-17. Visión completa de la malla del modelo con dos delaminaciones.

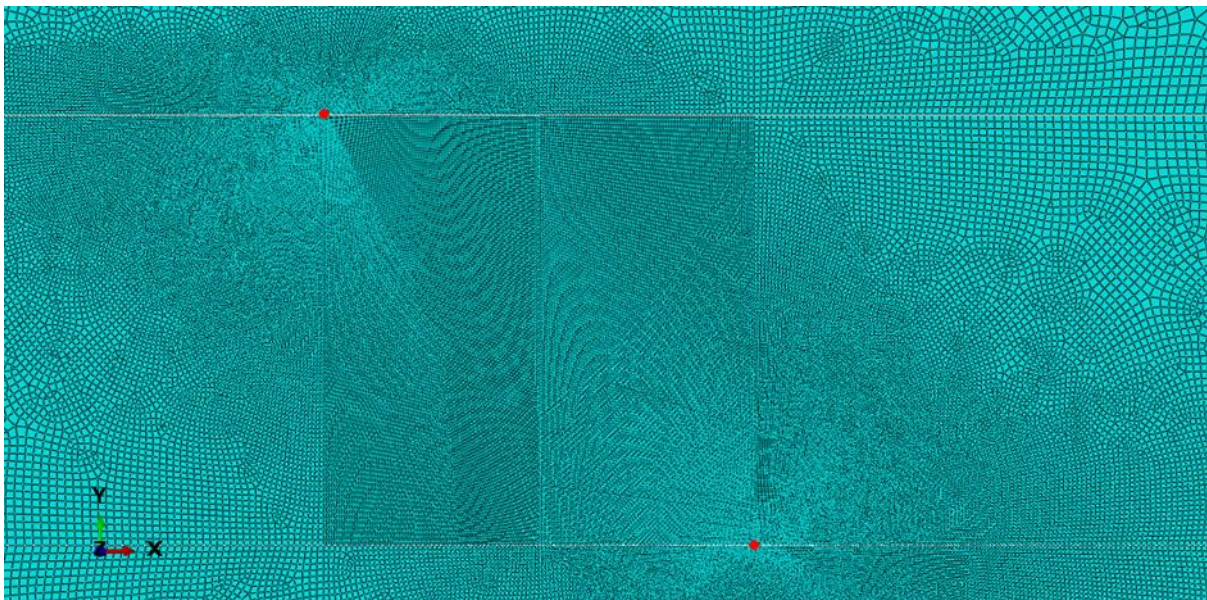


Figura 1-18. Zoom de la malla acercándose a la zona de interés (los dos fondos marcados con puntos rojos).

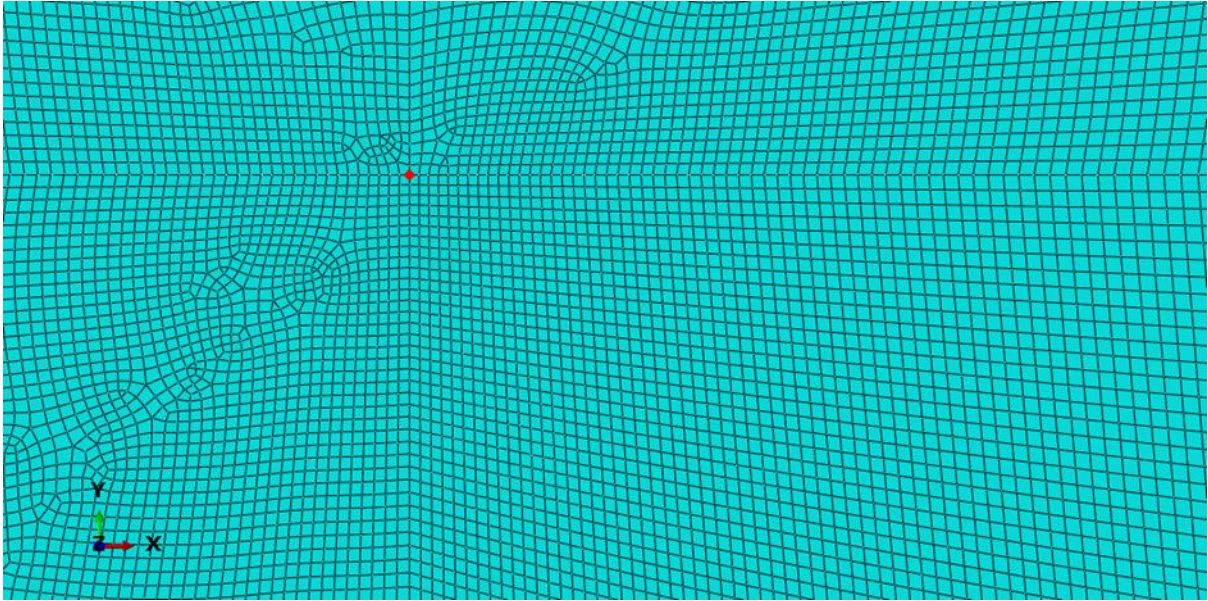


Figura 1-19. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación superior (marcado con un punto rojo).

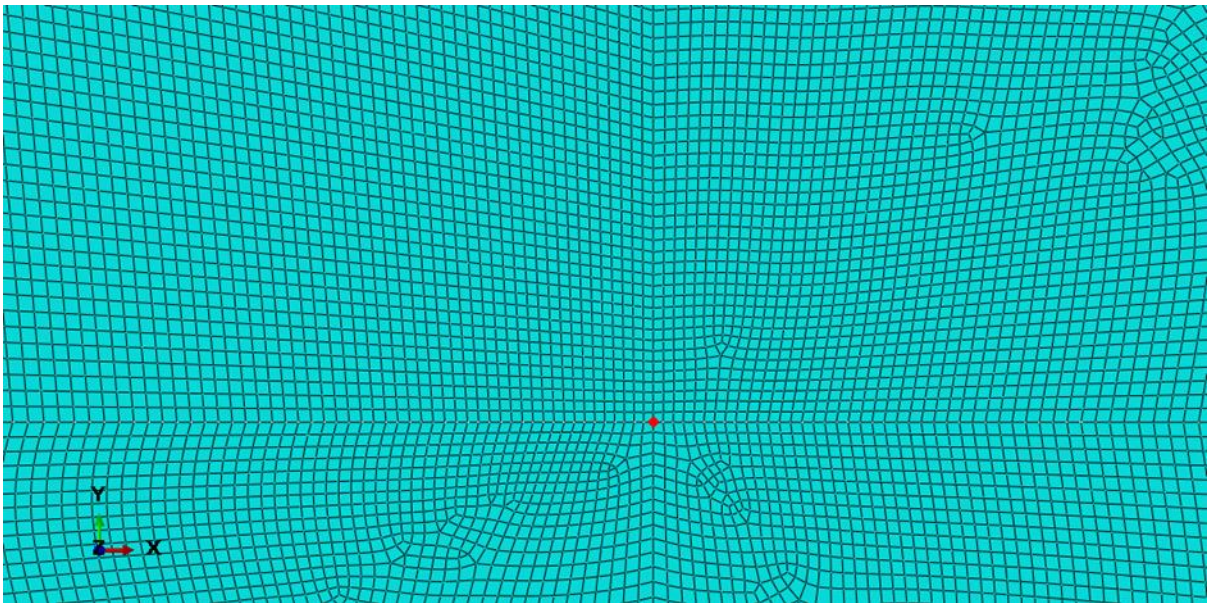


Figura 1-20. Zoom de la malla en la zona próxima al fondo de la delaminación inferior (marcado con un punto rojo).

El análisis de estos modelos consistió en analizar de nuevo las tensiones circunferenciales en los fondos de ambas delaminaciones buscando algún indicio de la posible aparición de una grieta a  $45^\circ$ .

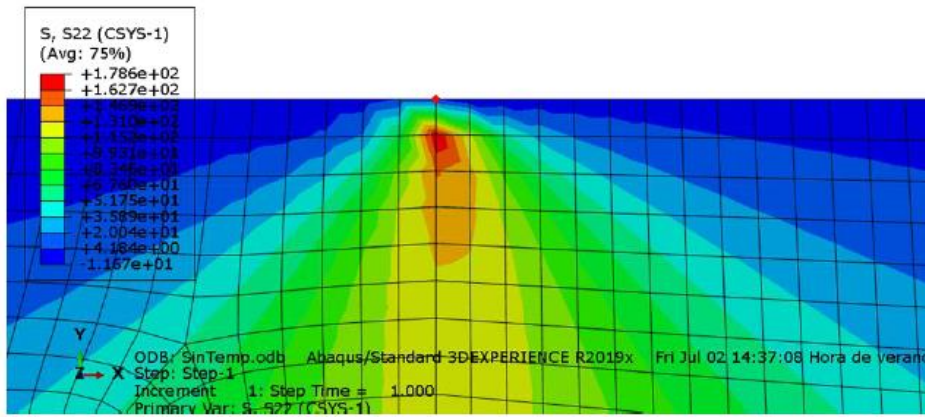


Figura 1-21. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación superior.

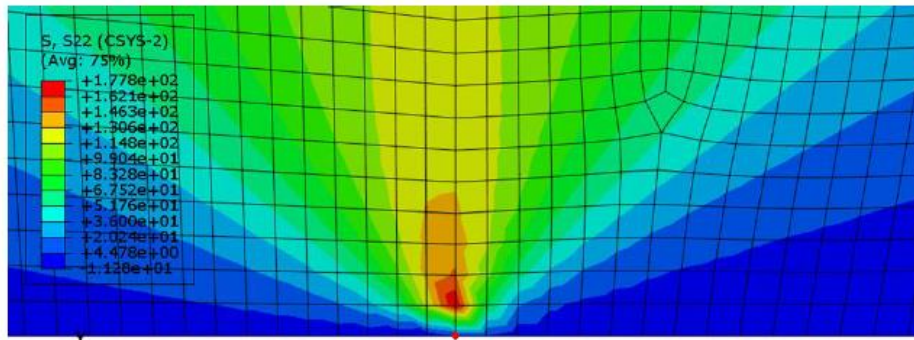


Figura 1-22. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación inferior.

El mapa de tensiones circunferenciales (Figuras 1-21 y 1-22) es prácticamente idéntico en el fondo de ambas delaminaciones y similar al caso de una sola delaminación. Por tanto, las conclusiones son las mismas: todo indica que, en caso de crecer una grieta desde el fondo de cualquiera de las dos delaminaciones, lo haría de manera perpendicular a la interfase.

### 1.1.5 Efecto de la temperatura

Tras haber obtenido todos los resultados expuestos anteriormente, se contempló la posibilidad de que el efecto del decremento térmico asociado al enfriamiento tras el proceso de curado del material alterara los resultados al modificar el comportamiento del mismo.

Se introdujo en los modelos una variación de temperatura como condición inicial: se aplicó a las tres capas del modelo un decremento térmico desde los 155°C, temperatura de transición vítrea del material, hasta los 22°C, temperatura que representa la temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos con la aplicación de esta condición adicional solo variaban cuantitativamente con respecto a los obtenidos hasta el momento (tanto las tensiones circunferenciales como las tasas de liberación de energía adquirirían valores mayores con esta nueva configuración). Esto quiere decir que la consideración del efecto de la temperatura no introduce ninguna alteración en el material que explique que la grieta que atraviesa la capa de 90° lo haga ahora con la orientación observada experimentalmente.



## 1.2. 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 orientación de aproximadamente 45°.

Como ya se ha explicado, este mismo objetivo lo perseguíamos con la realización de mi Trabajo Fin de Grado y todos los demás trabajos que se abordaron en paralelo al mismo. Por desgracia, en ninguno se consiguió obtener la explicación al suceso observado experimentalmente, aunque sí se obtuvieron resultados interesantes que sirven de base a lo expuesto en el presente documento.

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.



## 2 HERRAMIENTAS Y MÉTODOS EMPLEADOS

---

Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones el trabajo plasmado en el presente documento se enmarca en dos grandes disciplinas: los materiales compuestos y la Mecánica de la Fractura.

La alusión a los materiales compuestos es directa debido a que el material con el que se trabaja durante todo el estudio forma parte de la gran familia de los mismos. El estudio del comportamiento de objetos y estructuras en presencia de grietas se encuentra en el ámbito de la Mecánica de la Fractura y para poder discernir si una grieta va a crecer o no es necesario recurrir a varios conceptos definidos por ella.

Este capítulo se dedica a hacer una breve introducción al Método de los Elementos Finitos, a la Mecánica de la Fractura y a los conceptos que es necesario comprender para poder seguir la lectura de este documento, como es el efecto borde.

### 2.1 Método de Elementos Finitos y Abaqus

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico que permite resolver problemas complejos definidos sobre un medio continuo basado en la división del mismo en cuantos más subdominios mejor y la resolución del problema en cada uno de ellos. Se trata de una herramienta muy potente ya que gracias a él puede modelarse el comportamiento de prácticamente cualquier cuerpo frente a prácticamente cualquier situación.

La parte más compleja de la utilización de este método es lo que se denomina modelado. El modelado es el primer paso que debe abordarse y consiste en analizar con detalle lo que quiere modelarse para conseguir hacerlo de la manera más fiel a la realidad posible. Es un paso crucial a la hora de abordar un problema ya que los resultados obtenidos no serán válidos si no se ha conseguido modelar lo que realmente quiere analizarse.

Este método se basa en la discretización, como se ha mencionado al principio del apartado, resolución de ecuaciones en un determinado número de puntos, obtención de resultados en ellos y extrapolación de estos resultados al resto del modelo.

Existen gran cantidad de softwares que permiten la resolución de problemas usando el Método de Elementos Finitos. Para la realización de todos los modelos presentados en este trabajo se ha usado ABAQUS/CAE 2019 [3]. Se trata de un programa comercial cuyo uso está muy extendido en investigación, así como en un ámbito más industrial. La interfaz de este programa es bastante intuitiva y la programación cómoda, aunque a diferencia de ANSYS, no permite la programación por comando, todo se realiza desde la interfaz gráfica.

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 de Abaqus 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).

La zona donde se van a consultar los resultados de cada modelo es lo que denominamos “zona de interés”. El mallado en esta zona debe ser suficientemente fino como para poder fiarnos de los resultados pero sin incurrir en un coste computacional demasiado alto si no es necesario. Se realiza un análisis de convergencia de la malla,

para poder quedarnos con el tamaño de elemento más grande que nos proporcione los mismos resultados que uno más pequeño. El tamaño del elemento situado en la zona de interés es de 0.0001 mm (se trata de una malla muy fina teniendo en cuenta que el ancho del modelo es 5 mm) en todos los modelos y va aumentando de tamaño, de manera que podemos encontrar en las zonas más alejadas elementos de tamaño 0.025 mm.

Abaqus no pide la introducción de datos en unas unidades determinadas, permite a cada uno trabajar con las unidades que sean más cómodas para su estudio. Es por ello que hay que tener especial cuidado a la hora de definir parámetros del modelo. En todos los estudios realizados y los resultados presentados en el presente documento las unidades son de megapascales (MPa) para las tensiones, milímetros (mm) para las longitudes y Newton partido milímetro (N/mm) para las tasas de liberación de energía.

## 2.2 Mecánica de la Fractura

Siempre que hablemos de grietas hay que tener claro que estamos bajo el paraguas de la Mecánica de la Fractura, ya que esta se encarga del estudio de la estabilidad estructural de los materiales teniendo en cuenta la presencia, formación y crecimiento de grietas. El objetivo principal de esta rama de la Mecánica de Sólidos es analizar bajo qué condiciones una grieta va a aparecer o a crecer en caso de ya existir y cómo lo haría.

Para entender lo expuesto en el presente documento es necesario tener conocimientos (básicos) de Mecánica de la Fractura, como el índice o tasa de liberación de energía ( $G$ ). Dicha variable hace referencia a la cantidad de energía disponible para hacer crecer una grieta. Cuanto mayor sea esta energía, más fácil será que la grieta crezca, aunque para que lo haga es necesario que su valor sea superior a un valor crítico de esta variable ( $G_c$ ) característico de cada material.

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.

El método VCCT 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 centra 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 (usando unos valores de  $G_c$  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).

En cuanto al criterio de mixicidad (criterio de daño que tiene en cuenta que una grieta puede crecer en modo mixto), se ha usado la ley BK que define  $G_{eq}$  como la suma de las energías liberadas para cada uno de los modos de crecimiento de la misma ( $G_I$ ,  $G_{II}$  Y  $G_{III}$ ) y  $G_{eq}^C$  (tasa de liberación de energía crítica) con una ecuación relativamente sencilla en la que aparecen  $G_I^C$ ,  $G_{II}^C$ ,  $G_I$ ,  $G_{II}$  Y  $G_{III}$ .

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.

## 2.3 El efecto borde

El llamado "efecto borde" puede ser entendido en el marco de los laminados compuestos como la alteración que se produce en el estado tensional al aproximarse a un borde libre. Este efecto, analizado en diversas referencias clásicas, produce alteraciones en la solución predicha por la Teoría Clásica del Laminado, necesarias para cumplir las condiciones de contorno, y que pueden afectar en la dirección de las fibras a una zona de longitud característica igual al espesor del laminado.

Durante la realización de este trabajo se ha publicado un artículo cuyos autores son miembros del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, [5] en el que se analiza el efecto borde en el caso de los laminados cross-

ply y, en particular, se explica su responsabilidad en la aparición de despegues longitudinales en laminados compuestos por láminas ultradelgadas. En dicho estudio se detalla que en el caso de los laminados cross-ply sometidos a la acción de una tracción alineada con las capas de  $0^\circ$  del laminado, como la considerada en este trabajo, y teniendo en cuenta el efecto de las cargas térmicas, la presencia de efecto borde puede generar tracciones transversales (en la dirección del eje y de los modelos presentados en este trabajo, Figura 2-1) de importancia, siendo estas tracciones mayores en la cercanía de la interfase entre capa de  $0^\circ$  y capa de  $90^\circ$ , viéndose también incrementadas a medida que el espesor de la capa de  $90^\circ$  disminuye.

Aunque el daño analizado en [5] es diferente al fallo no convencional estudiado aquí, se considera necesario incluir en los modelos ya realizados la presencia de las alteraciones tensionales producidas por dicho efecto que dan lugar a un estado biaxial de tensiones. Es necesario aclarar que la inclusión del efecto borde se hará de manera estimativa, lo que se considera suficiente para el propósito de este trabajo, y en ningún caso empleando un cálculo preciso del estado tensional por él generado.

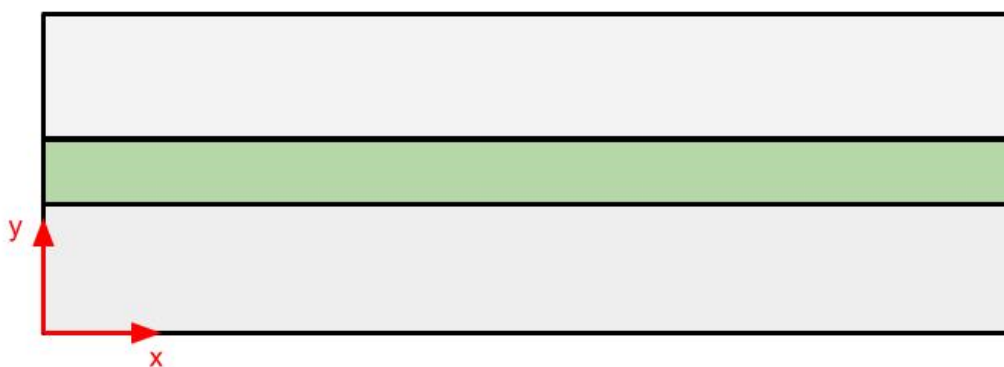


Figura 2-1. Esquema del modelo donde se representan las direcciones x e y.

## 2.4 Materiales

El material con el que se trabaja es el de las probetas que se ensayaron a tracción y a cuyo fallo se le busca explicación. Dicho material es el AS4/8552, un material compuesto por fibras de carbono inmersas en matriz epoxi. El laminado en concreto en el que se observó el fallo no convencional presenta la secuencia de apilado  $[0_2 90 0_2]$ , donde los espesores de las capas con fibras orientadas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  son 0.38 y 0.19 mm, respectivamente (Figura 1-2).

En este trabajo, sin embargo, se ha empleado un mayor número de configuraciones de apilado en los modelos, ya que tan importante era conseguir una explicación de lo ocurrido a este laminado, como comprobar que a laminados diferentes a este no les ocurre lo mismo bajo las mismas condiciones (porque no es eso lo que se observa experimentalmente).

El material, sin embargo, sí que es el mismo en todos los laminados porque entre las probetas ensayadas solo variaba la secuencia de apilado.

Las propiedades del material aparecen representadas en la Tabla 2-1, considerando como dirección 1 la de las fibras (Figura 2-2).

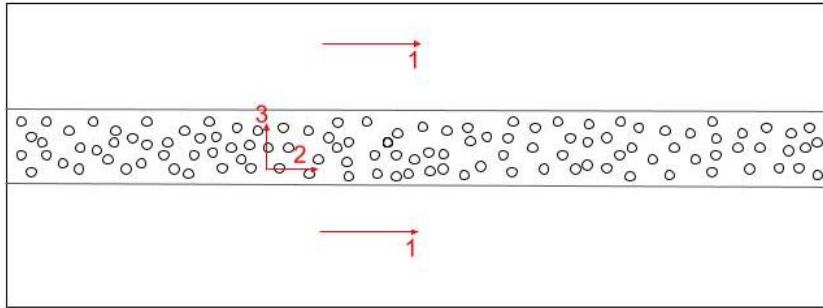


Figura 2-2. Representación de la dirección 1 en cada una de las capas del laminado.

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas del material.

Propiedad	Valor
$E_1$	135000 MPa
$E_2$	8750 MPa
$E_3$	8750 MPa
$\nu_{12}$	0.3
$\nu_{23}$	0.4
$G_{12}$	4750 MPa
$G_{13}$	4750 MPa
$G_{23}$	4750 MPa

La definición del material y de los diferentes laminados sería más directa si se hubiera usado el módulo de composites de Abaqus. Sin embargo, se decidió no realizar los modelos en este módulo debido a la imposibilidad de modelar delaminaciones, además de complicar el análisis de los resultados.

# 3 MODELOS REALIZADOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS ASOCIADOS A ELLOS

---

Este capítulo es en el que se desarrolla el núcleo central del trabajo realizado que pretende exponerse con el presente documento.

Como ya se ha mencionado, en las micrografías que suponen el punto de partida de toda la investigación realizada 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.

Con la realización de mi Trabajo Fin de Grado se llegó a la conclusión de que el daño observado experimentalmente no podía generarse suponiendo una o dos delaminaciones preexistentes, si las únicas condiciones de contorno que afectaban a la probeta eran la carga longitudinal aplicada en los extremos de la misma de valor 1195 MPa (tensión de rotura del laminado) y el decremento térmico asociado al curado del material (modelado como una condición inicial, es decir, previo a la aplicación de la carga, sobre la totalidad del modelo).

Tal y como se comentaba en el capítulo anterior, en uno de los trabajos que se realizó en paralelo [6] y en el que los estudios realizados eran de carácter tridimensional, se observó que el conocido efecto borde podía hacer que aparecieran tensiones de valor significativo en dirección perpendicular a la carga aplicada durante el ensayo de tracción. Estas tensiones afectaban internamente al material y aparecían principalmente en las zonas más cercanas a las interfases. ¿Podrían estas tensiones que no estábamos teniendo en cuenta ser las causantes de la fractura no convencional del material?

A priori, podemos afirmar que la aparición de unas tensiones en dirección perpendicular a la carga que estábamos aplicando sobre los modelos, debe hacer que varíen significativamente los resultados obtenidos hasta ahora. Es por ello, que se decide realizar unos estudios muy parecidos a los abordados con anterioridad (basados en el análisis de tensiones circunferenciales y evoluciones de la tasa de liberación de energía en el fondo de grietas), pero introduciendo en los modelos estas tensiones consecuencia del efecto borde.

A continuación, van a presentarse, en orden cronológico y divididos en apartados, los diferentes estudios realizados exponiendo los modelos elaborados en el programa de Elementos Finitos Abaqus y explicando los resultados obtenidos de cada uno de ellos.

## 3.1 Efecto borde modelado como carga transversal aplicada de manera exterior al modelo

La primera idea que se planteó para tener en cuenta las tensiones generadas como consecuencia del efecto borde fue aplicar a los modelos una condición de contorno en tensiones en los extremos superior e inferior del modelo en dirección perpendicular a los mismos. El valor que debíamos darle a esta condición de contorno fue difícil de determinar ya que los análisis realizados indicaban que las tensiones que aparecían dentro del material [5], podían alcanzar valores significativos variando a lo largo de la capa de 90°. En este trabajo, se ha seleccionado un rango de variación entre el 40 y el 80% para analizar la influencia de esta componente tensional; se trata en cualquier caso de un rango estimativo lo suficientemente amplio como para tener en cuenta la influencia del apilado, el tipo de material, y la contribución de la tracción exterior. Para esta primera prueba decidió tomarse el límite inferior de este intervalo, con la idea de que este valor sería el que menos modificaciones implicaría en los resultados y sería sencillo ver su efecto.

En la Figura 3-1 se representan esquemáticamente las cargas aplicadas sobre estos modelos.

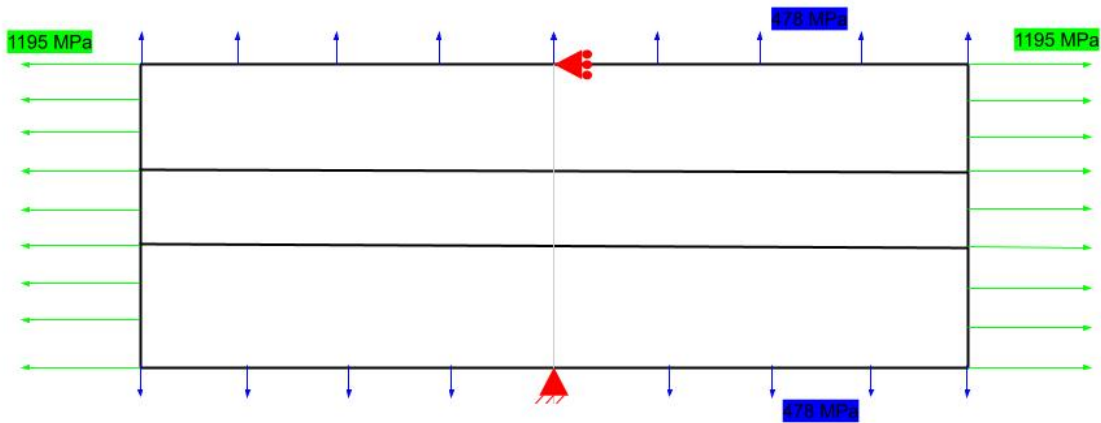


Figura 3-1. Representación de las condiciones de contorno aplicadas sobre el modelo.

### 3.1.1 Modelos solo con delaminación

El primer estudio que se realiza tras decidir aplicar la carga transversal de manera externa al modelo se basa, de nuevo, en suponer que existe una delaminación de gran tamaño preexistente en una de las interfaces y analizar el estado de tensiones circunferenciales en el fondo de la misma. Aplicando solo la carga longitudinal que simula el desplazamiento de las mordazas del ensayo de tracción, no se había observado una orientación clara de la zona de máximas tensiones circunferenciales a 45°. Es por ello que se decide repetir el estudio teniendo en cuenta ahora de esta manera el efecto borde.

En las Figuras 3-2 y 3-3 quedan representadas imágenes del modelo desde Abaqus.

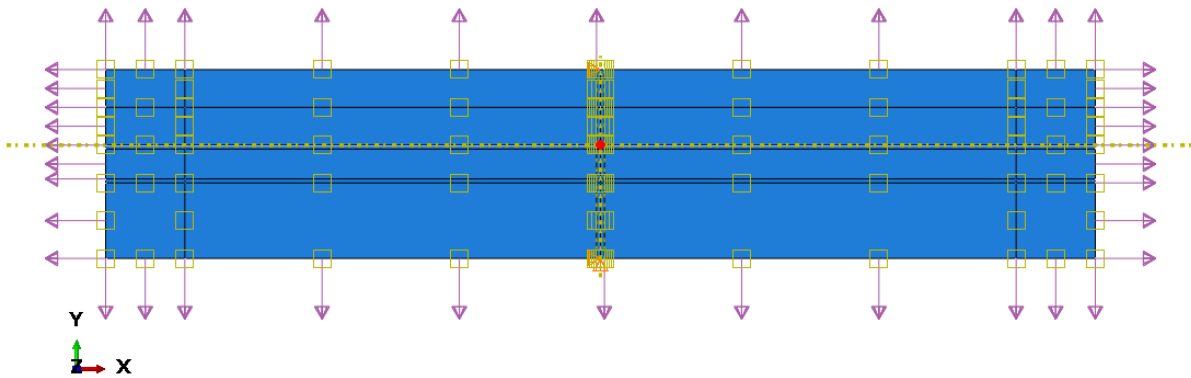


Figura 3-2. Configuración de carga desde el módulo Load de Abaqus.



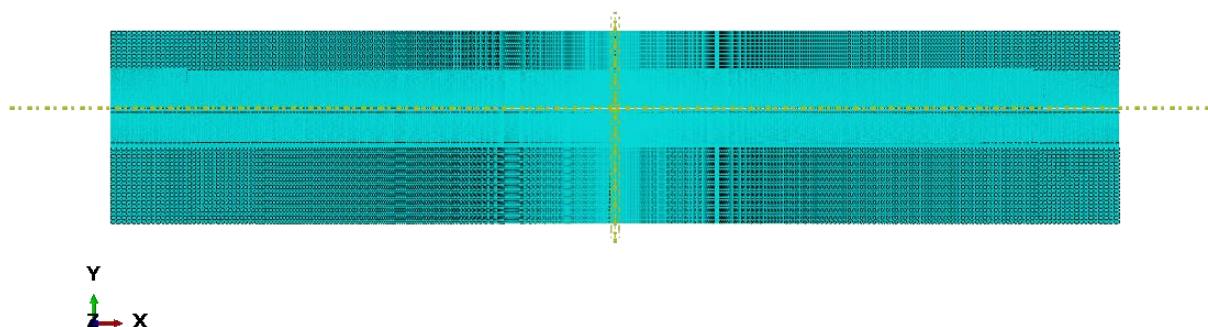


Figura 3-3. Visión general del mallado del modelo con delaminación de 2.1 mm.

Comparando los resultados obtenidos con estas nuevas condiciones y los obtenidos anteriormente, se observó que los valores de las tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación eran mayores al aplicar la carga transversal adicional. Además, el aspecto del mapa de tensiones circunferenciales presenta la zona de concentración de las mismas con una aparente orientación a 45°. Esto queda representado en la Figura 3-4, en la que solo se ve la capa de 90° y el nodo marcado representa el fondo de la delaminación.

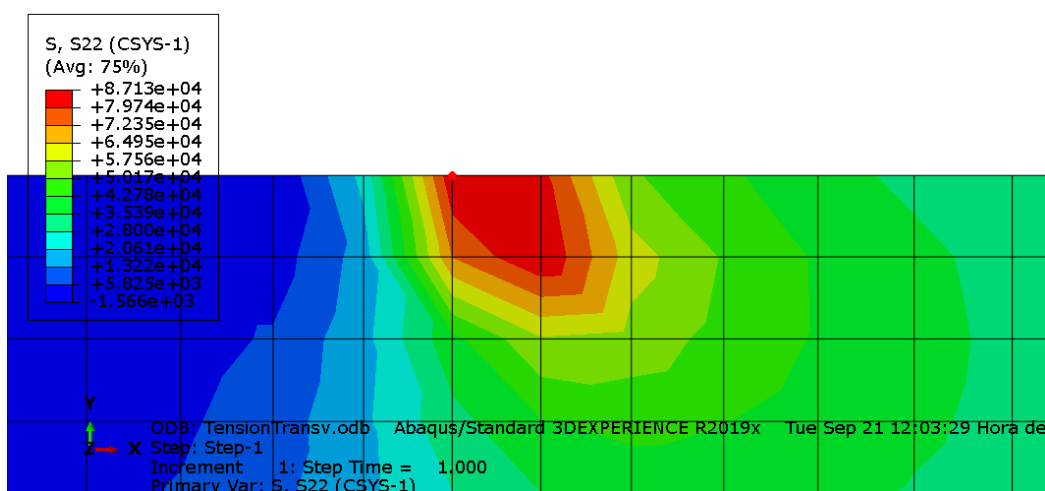


Figura 3-4. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 2.1 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.

Este resultado parecía bastante esperanzador, aunque se hubiera obtenido partiendo de la hipótesis en la que suponemos la existencia de una gran delaminación entre la capa de 0° y la capa de 90°.

Tras este resultado se decidió realizar esta misma comparación, pero para los modelos con delaminaciones más pequeñas. Los resultados fueron los mismos que en el caso de delaminación de 2.1 mm, es decir, aparente orientación de la zona de concentración de tensiones circunferenciales a 45° con respecto a la interfase, excepto con la delaminación de 0.02 mm.

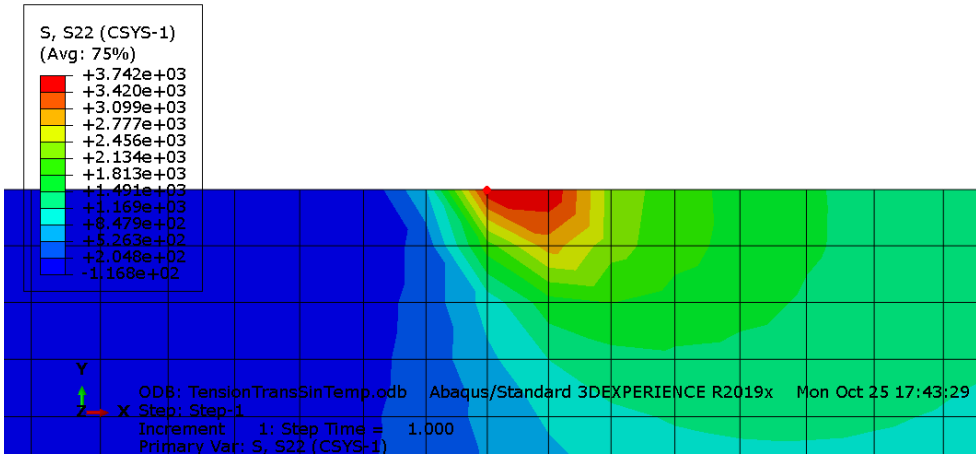


Figura 3-5. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 0.02 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.

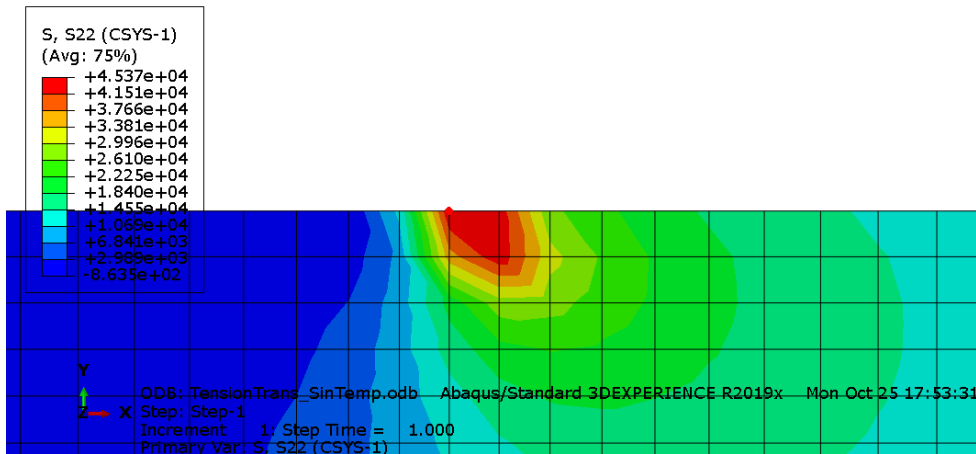


Figura 3-6. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 1.25 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.

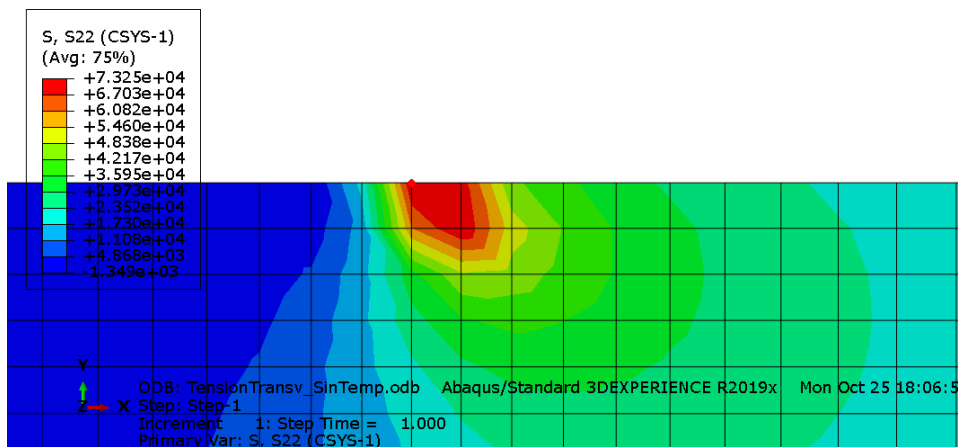


Figura 3-7. Mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación de 1.875 mm aplicando una carga transversal externa del 40% de la carga longitudinal.

Los valores máximos de la tensión circunferencial aumentan conforme aumenta el tamaño de la delaminación. Esto quiere decir que cuanto más grande sea este daño que estamos considerando como preexistente, más fácil será que se genere una grieta desde su fondo, en la dirección indicada por la orientación de la zona de máximas tensiones, algo que cabía esperar.

También se obtuvieron los valores de la tasa de liberación de energía en el fondo de la delaminación y con ellos ocurría lo mismo que con las tensiones en el entorno de la misma: aumenta con el tamaño de la delaminación. Los resultados numéricos no se presentan al no ser demasiado relevantes, ya que los modelos están elaborados de manera que esta variable indica la energía disponible para hacer crecer la delaminación a lo largo de la interfase.

Profundizando algo más en los resultados obtenidos, se decidió representar la evolución de las tensiones circunferenciales al alejarnos progresivamente del fondo de la delaminación de 2.1 mm para diferentes orientaciones. Las orientaciones se tomaron en base a lo que permitía el mallado del modelo. Queda representado un esquema de lo realizado en la Figura 3-8.

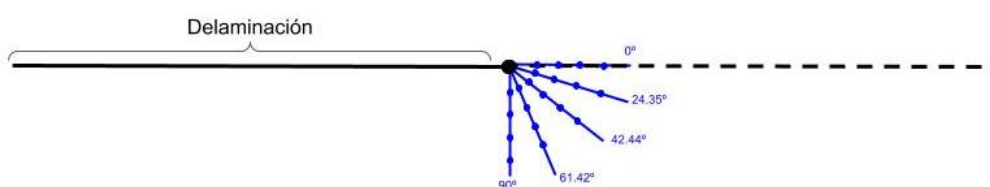


Figura 3-8. Esquema que representa los puntos donde se consultaron las tensiones circunferenciales.

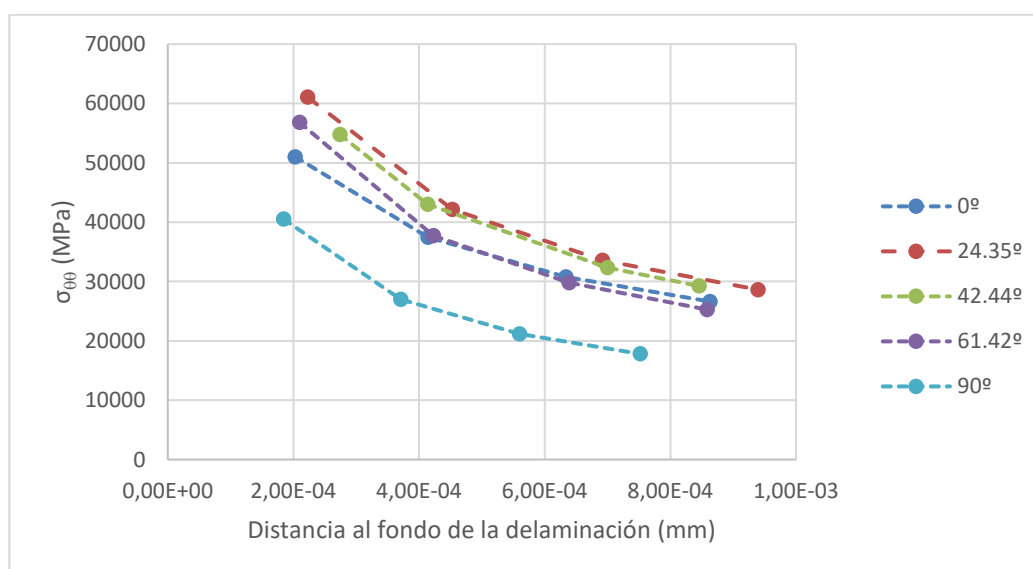


Gráfico 3-1. Evolución de las tensiones circunferenciales, para diferentes ángulos, con la distancia al fondo de la delaminación de 2.1 mm.

En el Gráfico 3-1 puede verse que los valores de la tensión circunferencial, a cualquier distancia del fondo son mayores para el ángulo de 24.35°, aunque muy poco superiores a los de los 42.44°. Estos resultados siguen siendo interesantes porque se ve una orientación preferente de crecimiento de grieta distinta a los 90° con respecto a la interfase y próximos a lo observado experimentalmente.

### 3.1.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Los resultados obtenidos de los modelos solo con delaminación apuntan a que es posible la aparición de una grieta desde el fondo de la delaminación en una dirección diferente a la perpendicular a la interfase, cuando se le aplica carga transversal (que simula la consecuencia del efecto borde) al modelo.

Tras la obtención de estos resultados se decide añadir a los modelos una pequeña grieta (0.02 mm ya que es el tamaño más pequeño que permitía el mallado de la zona) en diferentes orientaciones con la intención de comparar la tasa de liberación de energía entre ellas. De esta manera puede saberse cuál sería la orientación preferente de crecimiento de grieta desde el fondo de la delaminación, que seguimos considerando como preexistente, siendo esta para la que el valor de  $G$  sea mayor. En las Figuras 3-9, 3-10, 3-11 y 3-12 pueden verse detalles del modelo obtenidos desde Abaqus.

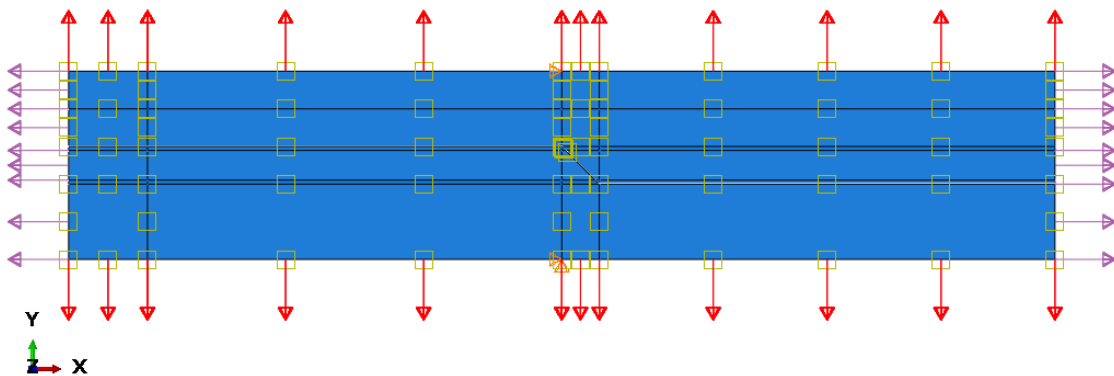


Figura 3-9. Configuración de cargas desde el módulo Load de Abaqus para el modelo con  $\alpha = 45^\circ$ .

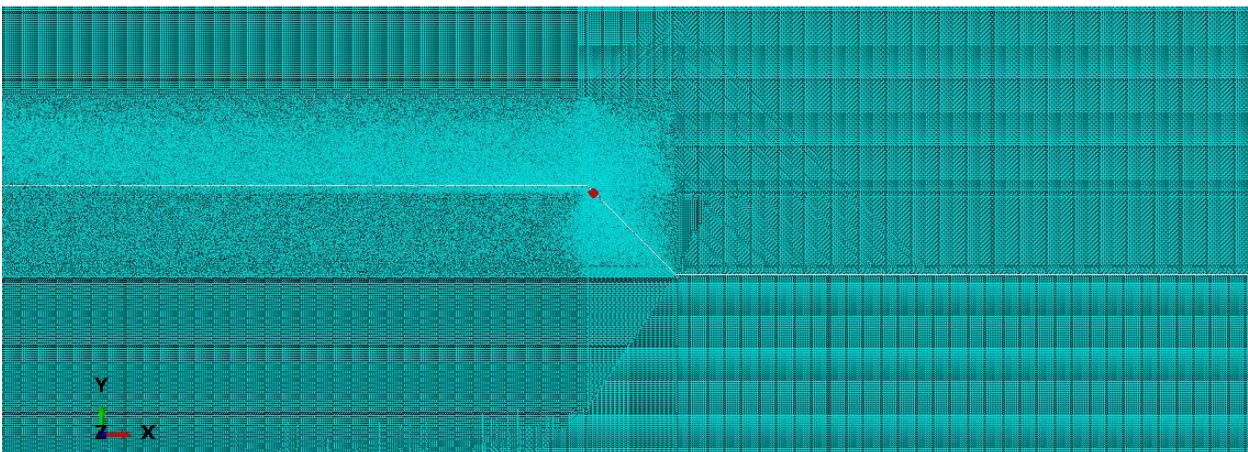


Figura 3-10. Imagen del mallado del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  marcando el fondo de la grieta.

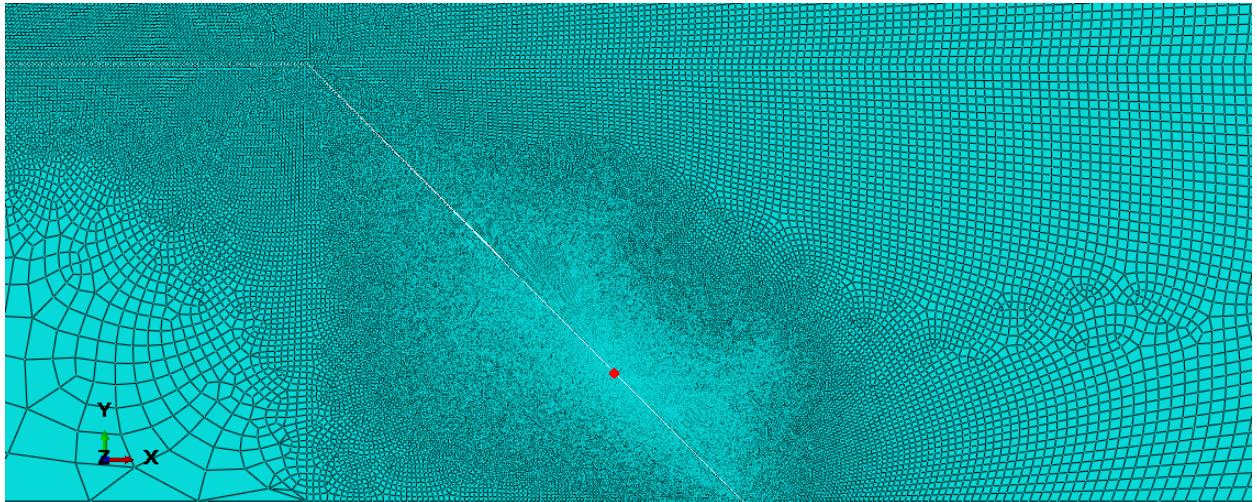


Figura 3-11. Zoom de la malla del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  en la zona de interés marcando el fondo de la grieta.

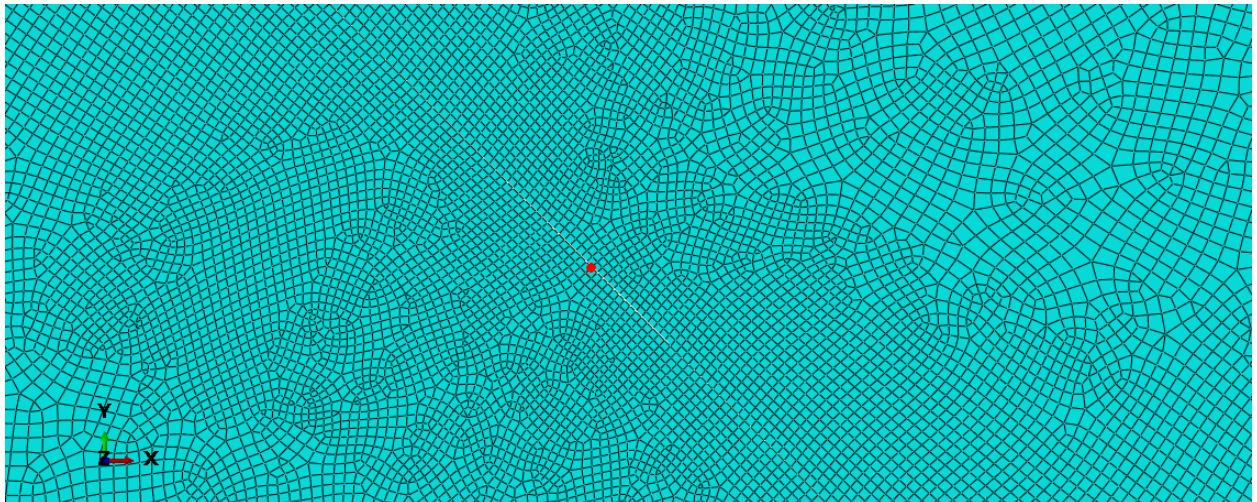


Figura 3-12. Zoom 2 de la malla del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  en la zona de interés marcando el fondo de la grieta.

A continuación, se presenta una gráfica (Gráfico 3-2) en la que puede verse la evolución de la tasa de liberación de energía en el fondo de la grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  frente a su orientación con respecto a la interfase.

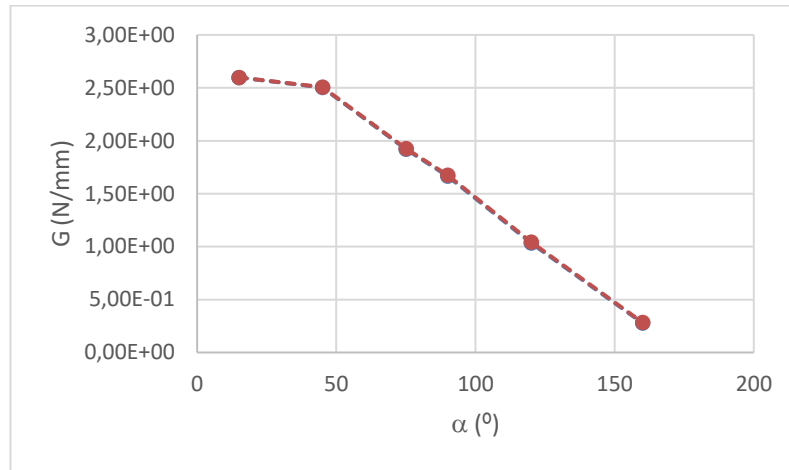


Gráfico 3-2. Evolución de G frente a la orientación de una grieta que parte del fondo de una delaminación de 2.1 mm aplicando al modelo carga longitudinal y carga transversal del 40%.

El máximo valor de tasa de liberación de energía se da para la grieta orientada a 15° con respecto a la interfase. De nuevo, este resultado no es el que nos gustaría haber obtenido pero el hecho de que la orientación preferente de crecimiento sea distinta de los 90° puede interpretarse como que nos estamos acercando a lo observado experimentalmente.

Esto nos hizo pensar que la aplicación de la tensión transversal adicional a la carga longitudinal hace que el máximo de la tasa de liberación de energía tienda a los 0°. Si al aplicar una carga transversal de valor 40% de la carga longitudinal el máximo aparece a 15° y al no aplicarla (carga transversal de valor nulo), a 90°, puede que en una situación intermedia el máximo de G quede a 45°. Por ello, se intentó buscar el valor que habría que darle a la carga transversal para encontrarnos en esta situación probando con valores entre el 0 y el 40% de la carga longitudinal.

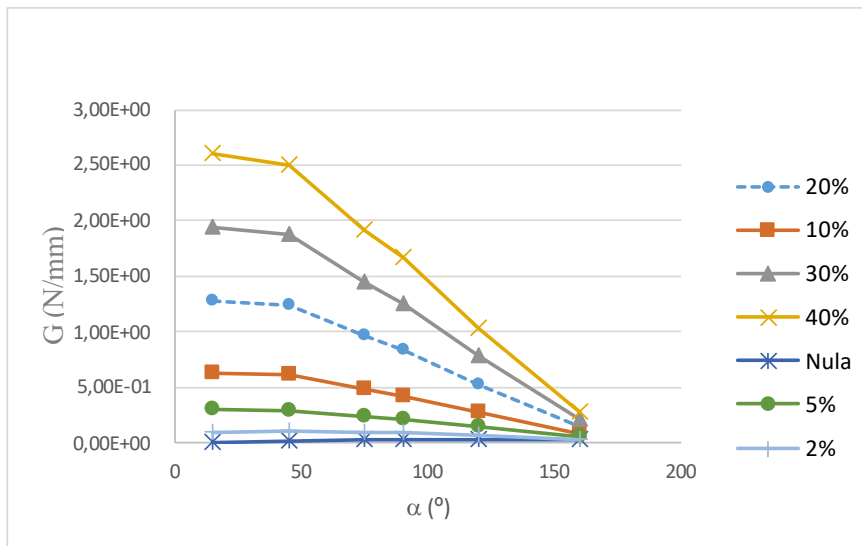


Gráfico 3-3. Evolución G-α para diferentes valores de la carga transversal.

Como puede verse en el gráfico 3-3, para que esto ocurriera la tensión transversal aplicada tendría que ser de un 2% de la carga longitudinal. Este valor de tensión transversal no tiene sentido aplicarlo ya que no reflejaría las consecuencias del efecto borde (tensiones transversales significativamente mayores) que es realmente lo que queremos modelar con esta carga.

En resumen, bajo estas condiciones de carga si se generara una grieta desde el fondo de una delaminación preexistente de gran tamaño, esta lo haría creciendo con una orientación de  $15^\circ$  con respecto a la interfase.

### 3.1.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de $90^\circ$ desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Tras haber obtenido los resultados presentados en el apartado anterior, se realizó el mismo estudio de la variación de la tasa de liberación de energía con la orientación de grieta con respecto a la interfase, pero en este caso para una grieta del triple de tamaño (0.06 mm) creciendo desde el fondo de una delaminación de gran tamaño. En las Figuras 3-13, 3-14 y 3-15, puede verse el mallado de estos modelos.

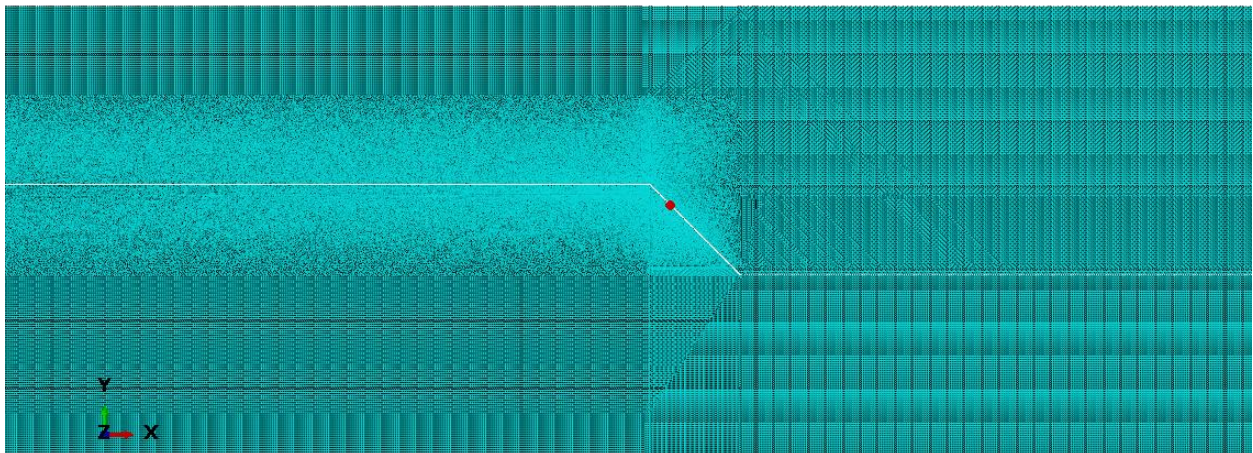


Figura 3-13. Imagen del mallado del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.

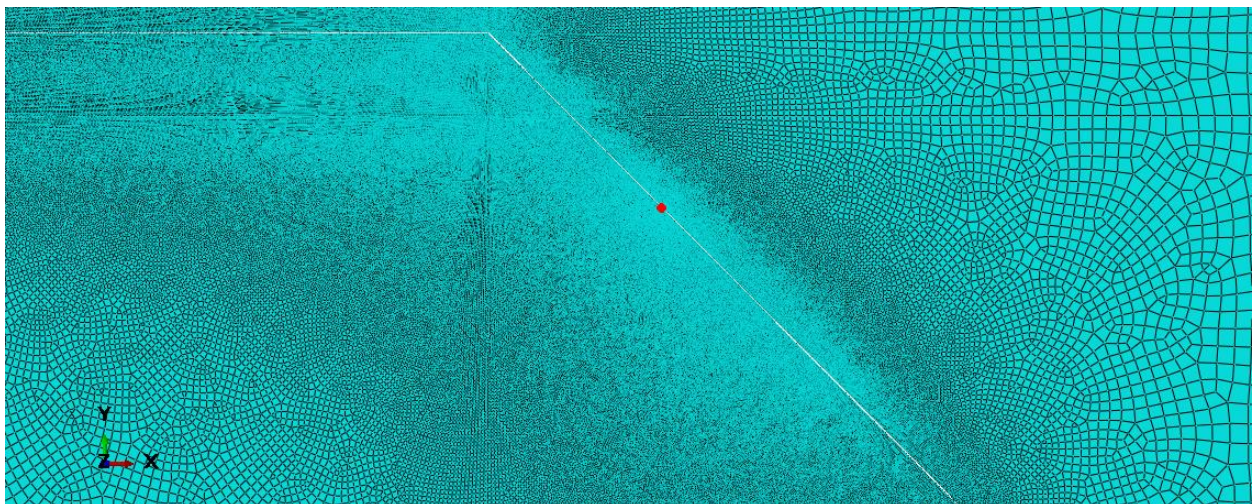


Figura 3-14. Zoom en la zona de interés del mallado del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.

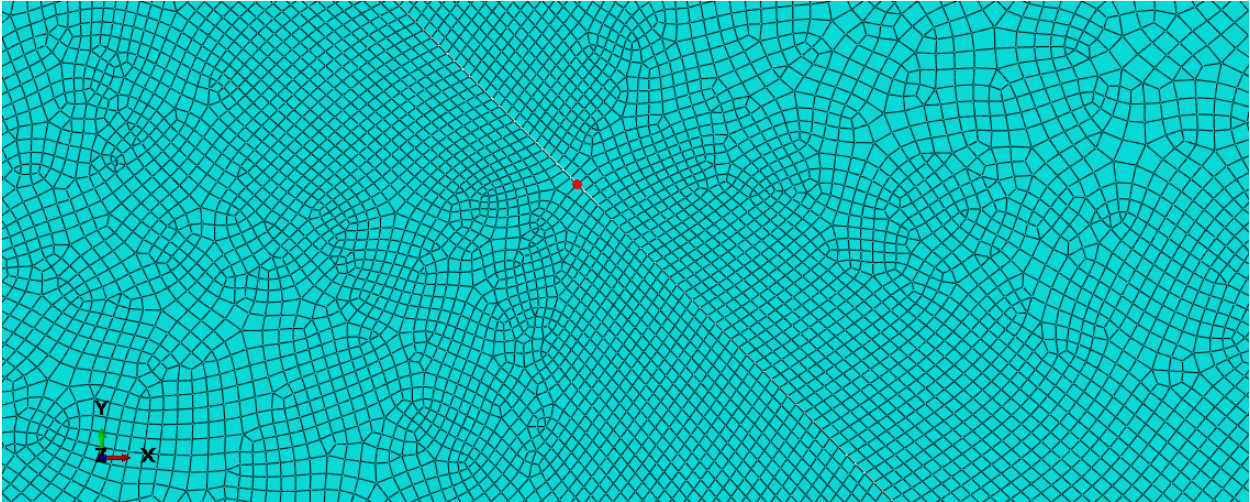


Figura 3-15. Zoom 2 en la zona de interés del mallado del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  y grieta de 0.06 mm marcando el fondo de la misma.

Se probaron de nuevo diferentes valores para la carga transversal y los resultados aparecen representados en el gráfico 3-4.

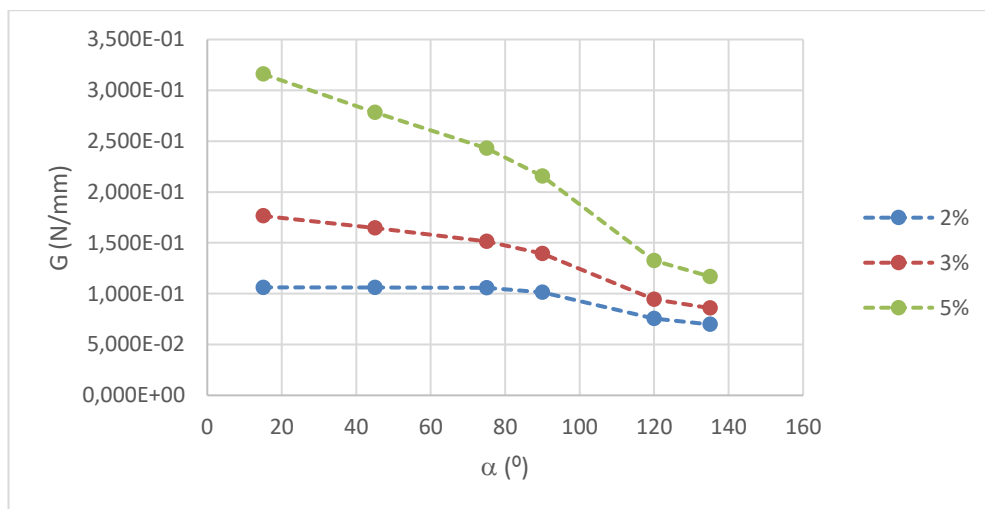


Gráfico 3-4. Evolución de G con  $\alpha$  para grieta de triple tamaño aplicando carga transversal de diferentes valores y carga longitudinal.

Estos resultados se obtuvieron con la finalidad de ver cómo variaba el comportamiento de la grieta en función de su tamaño en condiciones de carga longitudinal y carga transversal.

Como puede verse en la gráfica, para todos los casos el máximo de G aparece a  $15^\circ$ . Tras la obtención de estos resultados se decide no ahondar en los modelos con grieta de mayor tamaño.

### 3.2 Efecto borde modelado como condición inicial aplicada en diferentes zonas de la capa de $90^\circ$ del laminado

Hasta este momento las tensiones internas del material consecuencia del efecto borde se han tenido en cuenta en los modelos introduciendo una carga transversal en los extremos del mismo con diferentes valores. La tensión transversal aplicada de esta manera no refleja fielmente la realidad, ya que tendría más sentido aplicarla



directamente en los nodos situados justo debajo de la interfase y de manera previa a la aplicación de la carga longitudinal. Nos acercáramos más a la realidad modelando la carga transversal de esta manera al no afectar esta a la totalidad del material y poder liberarse ligeramente al aplicar la carga longitudinal.

Por estos motivos se decidió considerar esta tensión transversal como una condición inicial aplicada en la capa de  $90^\circ$ , estudiando dos posibilidades: aplicarla en las zonas más cercanas a las interfases o en la totalidad de la misma. En la Figura 3-16 pueden verse dos esquemas del modelo en los que se representan estas dos posibles zonas afectadas por la condición inicial.

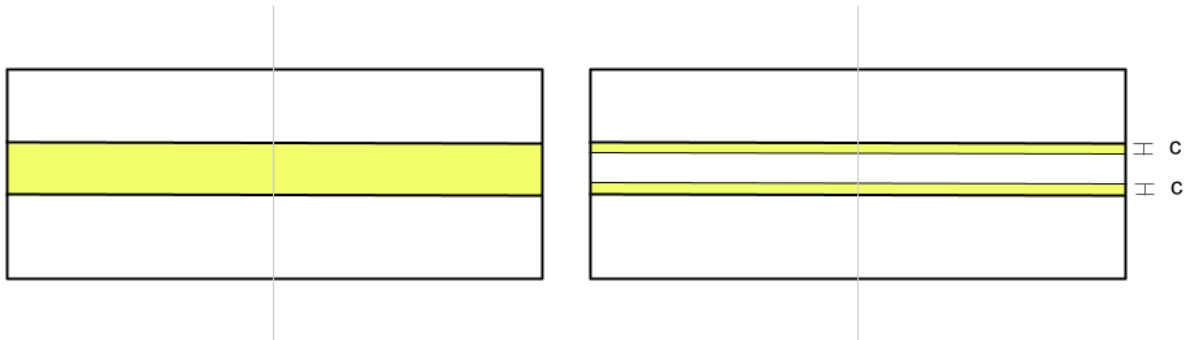


Figura 3-16. Esquema en el que se representan las dos opciones en cuanto a zonas de aplicación de la tensión transversal como condición inicial.

Se realizaron todos los análisis completados con la carga transversal aplicada de manera externa al modelo haciéndolo ahora como condición inicial, con la intención de analizar cómo varían los resultados ya que ahora deberían acercarse más a lo observado experimentalmente.

La condición aplicada a todos los modelos y en cualquiera de las dos configuraciones es de valor 40% de la carga longitudinal aplicada, 478 MPa.

### 3.2.1 Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Utilizando el modelo anteriormente realizado con único defecto una delaminación de 2.1 mm en una de las interfases, se elimina la carga transversal aplicada de manera exterior al modelo y se aplica esta, como se ha mencionado anteriormente, como una condición inicial. Por un lado, se prueba a afectar la totalidad de la capa de  $90^\circ$  por esta condición inicial y por otro, se aplica sobre dos zonas cercanas a las interfases de pequeño tamaño,  $c = 0.02$  mm (referencia a la Figura 3-16). Para definir las dos franjas de la capa de  $90^\circ$  hay que realizar particiones en el modelo y volver a mallar la zona.

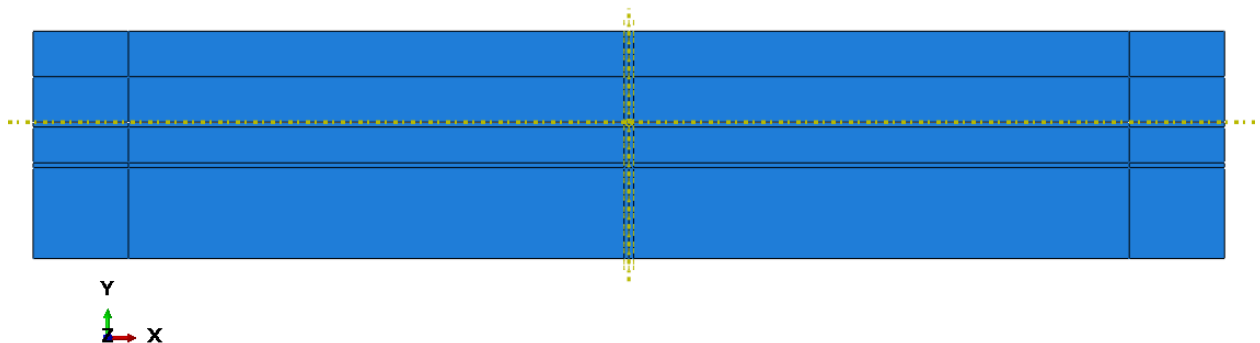


Figura 3-17. Imagen del modelo en que se ven las particiones de la capa de  $90^\circ$  ( $c = 0.02$  mm).

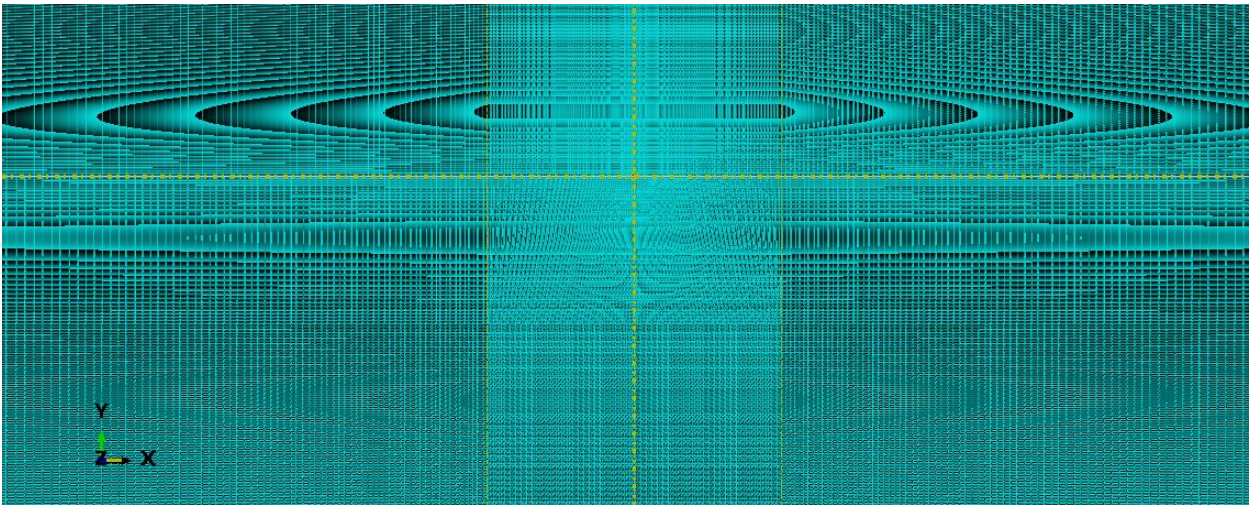


Figura 3-18. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la delaminación tras realizar las particiones.

Los resultados que se obtienen de estos modelos vuelven a ser los mapas de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación, situando el origen del sistema de referencia en él. En las Figuras 3-19 y 3-20 quedan representados estos mapas solo para la capa de 90° y marcando el fondo de la delaminación.

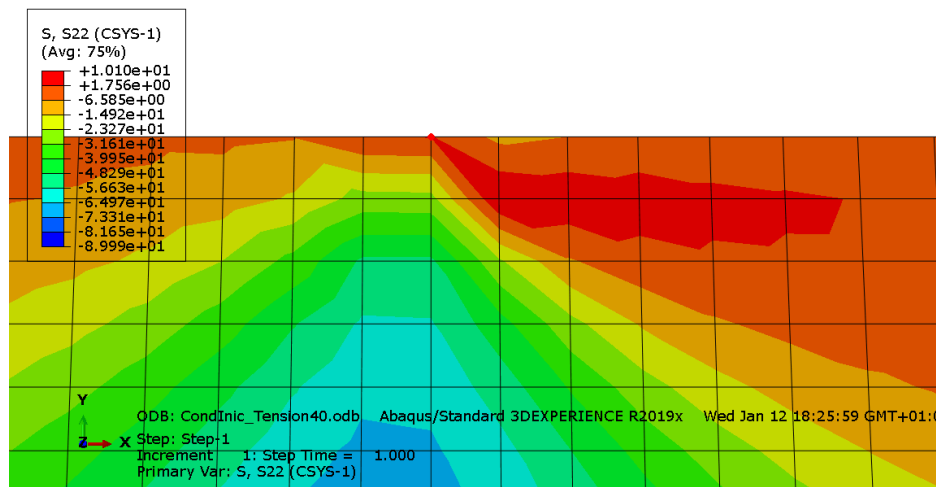


Figura 3-19. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (carga longitudinal y carga transversal como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).

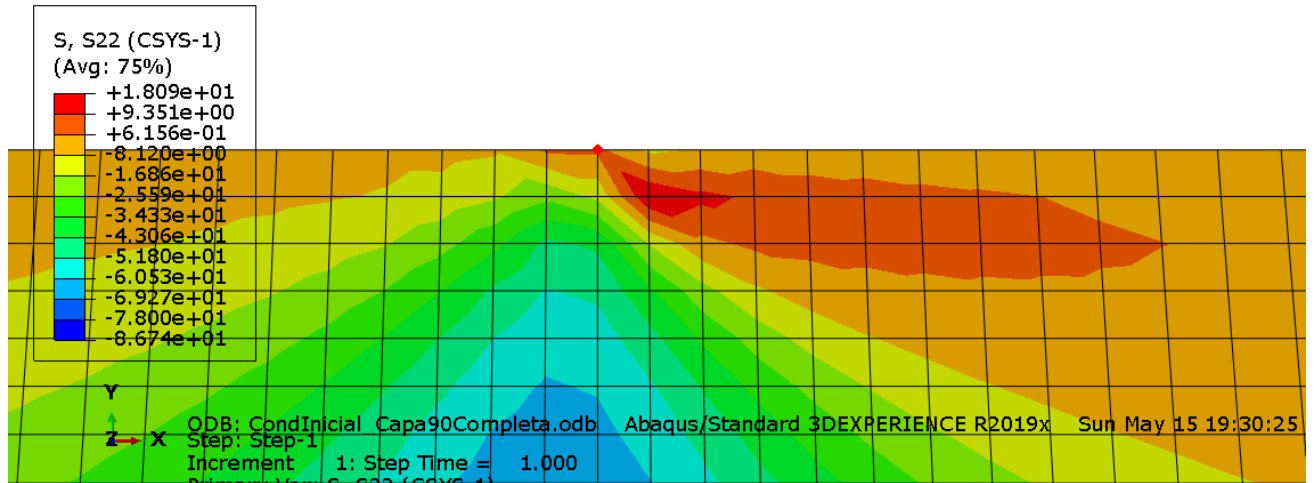


Figura 3-20. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 m (carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en toda la capa de 90°).

En estos mapas puede verse la clara orientación de la zona de concentración de tensiones circunferenciales a 45°, tanto al aplicar la condición inicial en toda la capa de 90° como en dos franjas de la misma. Este resultado es muy interesante ya que las máximas tensiones circunferenciales indican la zona donde sería más probable la apertura de una grieta y estas están orientadas en la dirección de crecimiento de grieta observada experimentalmente.

### 3.2.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Tras los resultados del apartado anterior, como se hizo aplicando la carga transversal de manera exterior al modelo, se obtiene la evolución de la tasa de liberación de energía en el fondo de una grieta que se interna en la capa de 90° desde el fondo de la delaminación con la orientación de la misma.

Estos modelos ya se han usado con anterioridad por lo que solo se modifican para obtener los resultados de este apartado: se elimina la carga transversal aplicada de manera exterior al modelo y se aplica la condición inicial de las dos maneras anteriormente mencionadas, totalidad de la capa de 90° y dos franjas de tamaño  $c = 0.02$  mm pegadas a las interfaces. Como para el apartado anterior, es necesario realizar particiones sobre los modelos y volver a mallarlos, intentando siempre obtener mallas lo más parecidas posible en la zona de interés para obtener resultados comparables.

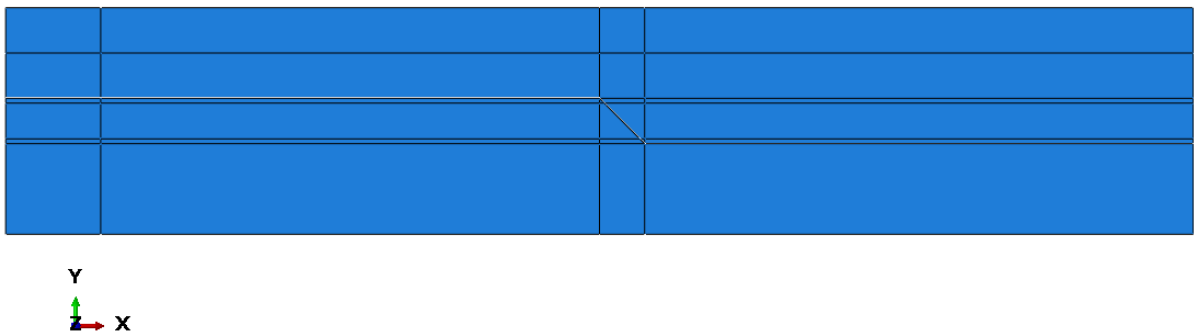


Figura 3-21. Imagen del modelo para  $\alpha = 45^\circ$  en que se ven las particiones de la capa de 90° ( $c = 0.02$  mm).

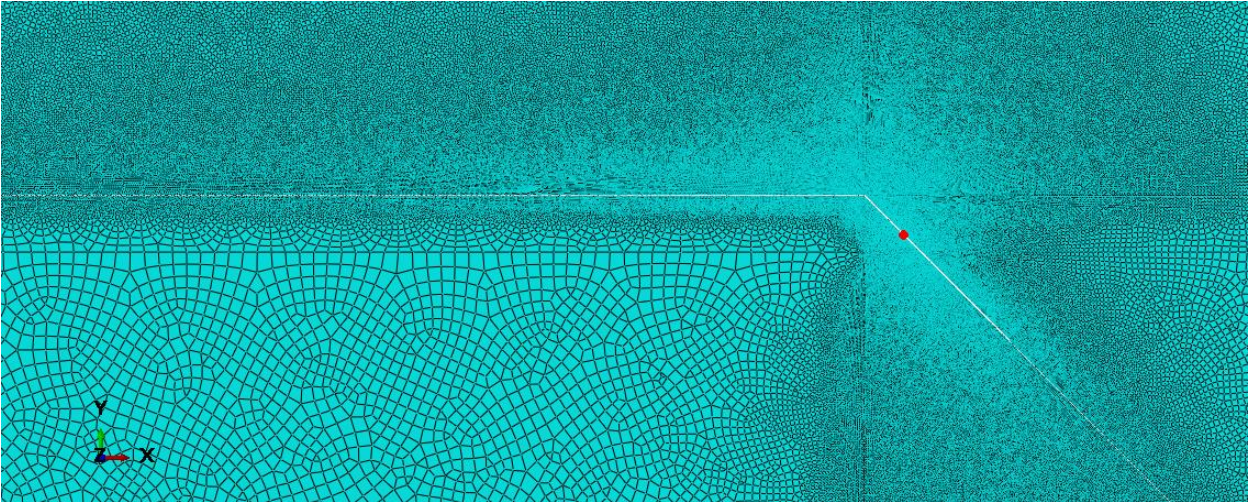


Figura 3-22. Imagen de la malla para el modelo con  $\alpha = 45^\circ$  en la que se aprecia la variación de la malla con la partición (en rojo el fondo de la grieta).

A continuación, se presentan los Gráficos 3-5 y 3-6 obtenidos para cada una de las configuraciones de carga:

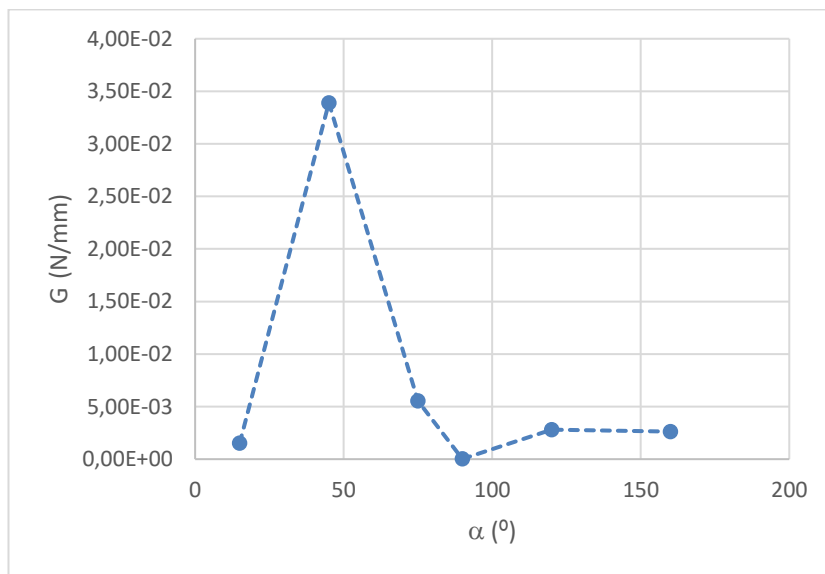


Gráfico 3-5. Evolución G- $\alpha$  para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.

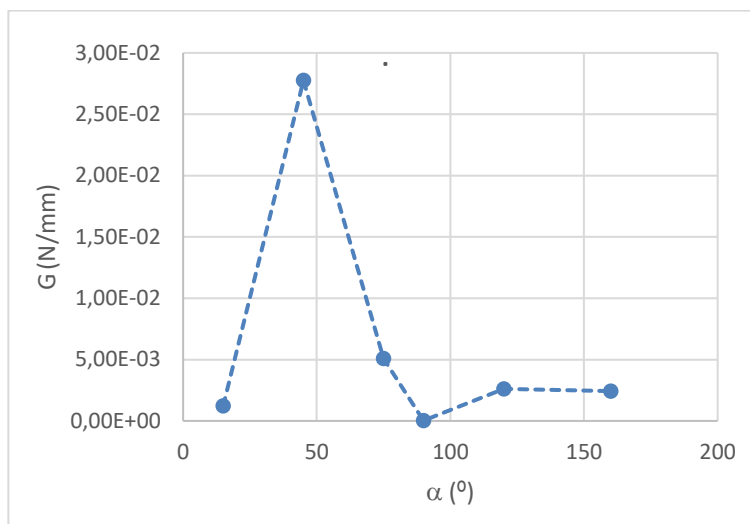


Gráfico 3-6. Evolución G- $\alpha$  para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de 90°.

Las evoluciones de la tasa de liberación de energía también indican que la orientación preferente de crecimiento de grieta desde el fondo de una delaminación es a 45° con respecto a la interfase.

De nuevo obtenemos un resultado interesante que refuerza lo obtenido en el apartado anterior. Que el máximo en estas gráficas esté en los 45° significa que, en caso de existir una delaminación de gran tamaño como la modelada, si desde su fondo creciera una grieta internándose en la capa de 90°, esta lo haría con una orientación de 45° con respecto a la interfase. Esto es exactamente lo observado en el ensayo de tracción que sirve como punto de partida a este trabajo.

### 3.2.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Los resultados anteriores, como ya se ha mencionado, nos indican que desde el fondo de una delaminación la dirección más probable de crecimiento de grieta es a 45° con respecto a la interfase. Sin embargo, puede que ser que esta grieta se genere a 45°, crezca algo en esta dirección y después se reorienta. Para descartar esto, se decidió analizar el comportamiento de una grieta de mayor tamaño (el triple que la anteriormente modelada) y ver en qué dirección crecería esta.

Estos modelos también estaban realizados por lo que solo hubo que modificar la manera de aplicar la carga transversal. En el caso de aplicarla como condición inicial en dos franjas cercanas a la interfase, el tamaño de las mismas es ahora de  $c = 0.06$  mm (referencia a Figura 3-16) para que, para cualquiera de las orientaciones de grieta con respecto a la interfase, esta se encuentre en su totalidad dentro de la zona afectada por estas tensiones.

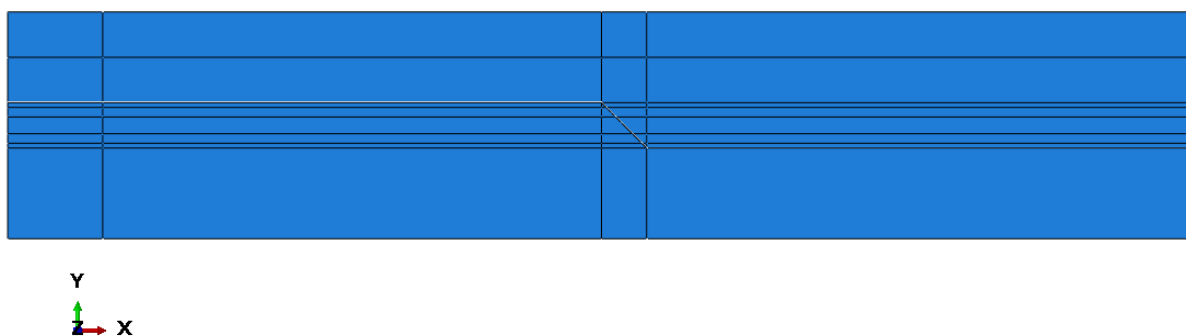


Figura 3-23. Imagen del modelo para  $\alpha = 45^\circ$  en que se ven las particiones de la capa de 90° ( $c = 0.06$  mm).

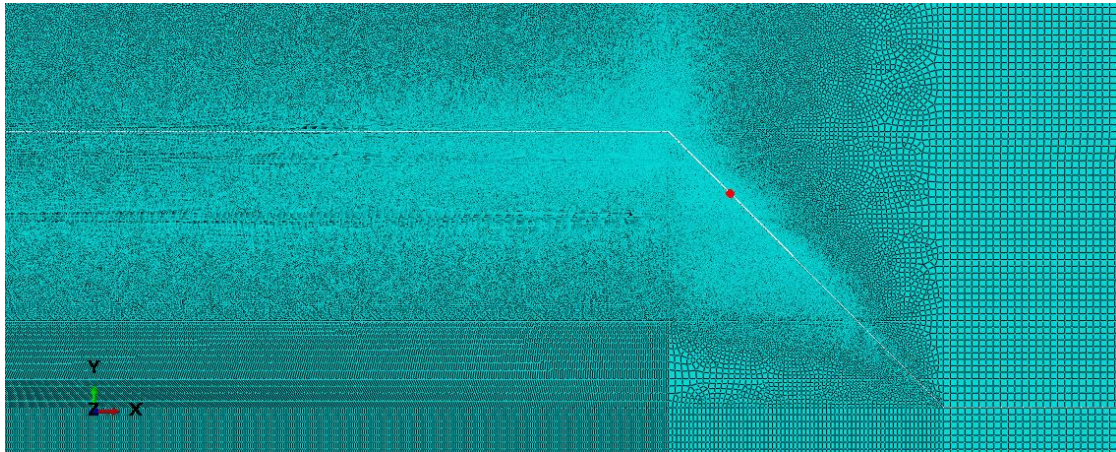


Figura 3-24. Imagen de la malla del modelo con  $\alpha = 45^\circ$  tras remallar por las particiones (en rojo el fondo de la grieta).

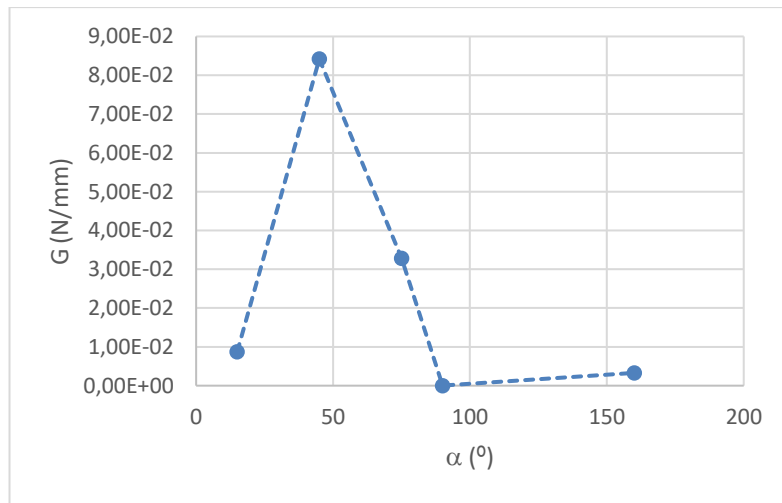


Gráfico 3-7. Evolución G- $\alpha$  (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.06 mm.

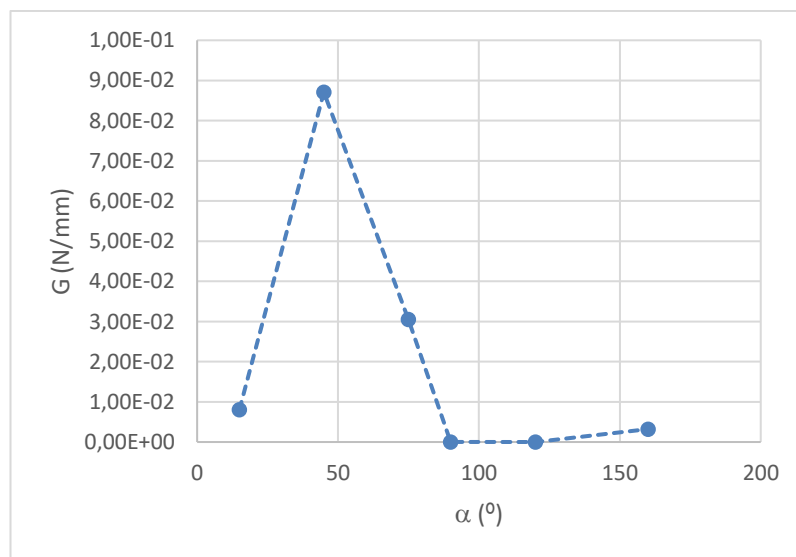


Gráfico 3-8. Evolución G- $\alpha$  (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de 90°.

En los Gráficos 3-7 y 3-8 de nuevo se ve que el máximo de la tasa de liberación de energía aparece para la grieta orientada a 45°. Esto quiere decir que una grieta de tamaño significativo también crecería atravesando la capa de 90° orientada a 45°, pudiendo generarse el daño observado experimentalmente.

### 3.3 Modelos con doble espesor de la capa de 90°

Todos los estudios reflejados en los apartados anteriores se realizaron sobre modelos con espesor de la capa de 90° de 0.19 mm. Este laminado es el que, al someterlo al ensayo de tracción, rompió de manera no convencional, suceso que buscamos explicar.

Con los resultados obtenidos al aplicar sobre los modelos una tracción transversal adicional a la carga longitudinal, de valor el 40% de esta, como una condición inicial, se ha conseguido modelar el ensayo realizado experimentalmente. Al considerar el efecto borde, los modelos reflejan lo que ocurre en la realidad, dando una posible explicación a lo observado en el ensayo que motivó este trabajo.

En realidad, es necesario realizar algunos estudios más para estar seguros de que hemos alcanzado la explicación que buscábamos. Este fallo no convencional se observa sobre este laminado en concreto, pero no en otros laminados sometidos al mismo ensayo. Deberíamos, por tanto, modelar otros tipos de laminados, someterlos a la misma carga longitudinal, afectarlos por las consecuencias del efecto borde y ver que para ellos los resultados no apuntan a que una grieta pudiera atravesar la capa de 90° orientada a 45°, sino que rompería como nos dice el sentido común: de manera perpendicular a la aplicación de la carga longitudinal.

Para modelar estos otros laminados se empezó doblando el espesor de la capa de 90° modelada hasta el momento (Figura 3-25).

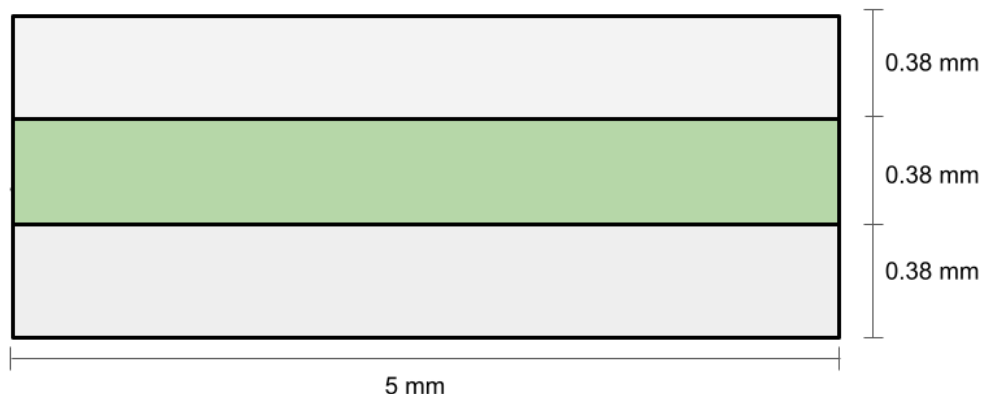


Figura 3-25. Esquema general de los modelos con doble espesor.

Se vuelven a realizar exactamente los mismos estudios anteriores, pero ahora sobre modelos con doble espesor de la capa de 90°. Fue necesario elaborar modelos desde cero al modificar una condición geométrica de los mismos, realizando de nuevo el mallado y análisis de convergencia de la malla. Se ha intentado en todos los casos que el entorno donde se fueran a consultar los resultados (zona cercana al fondo de delaminación, capa de 90°, fondo de una grieta que se interna en la capa de 90°, etc.) tuviera una malla lo más similar posible a la de los modelos con espesor de 0.19 mm (al que nos referiremos como “original”) para poder comparar resultados.

#### 3.3.1 Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Primeramente, se decidió introducir en el modelo una delaminación de gran tamaño que, como hasta ahora, consideramos preexistente. Las cargas aplicadas sobre el modelo vuelven a ser una carga longitudinal, que

modela el ensayo de tracción, y la tracción transversal como condición inicial del 40% de la carga longitudinal, representando el efecto borde.

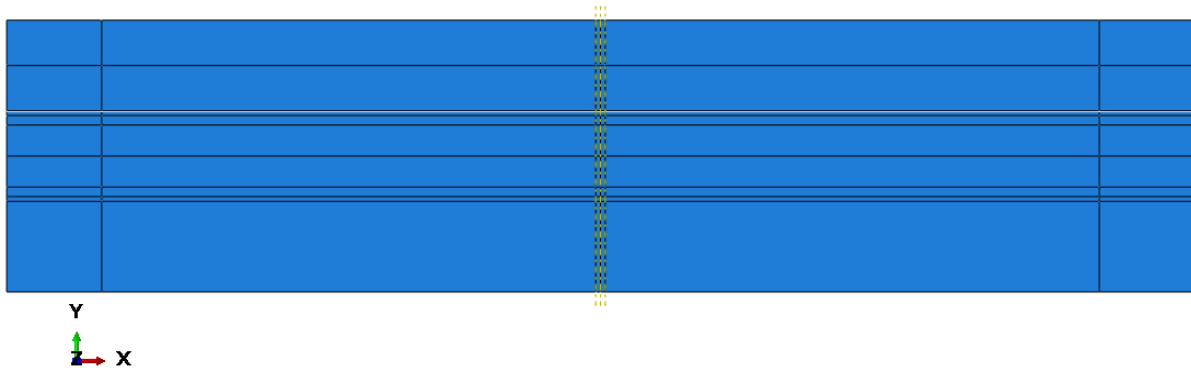


Figura 3-26. Imagen del modelo solo con delaminación de doble espesor.

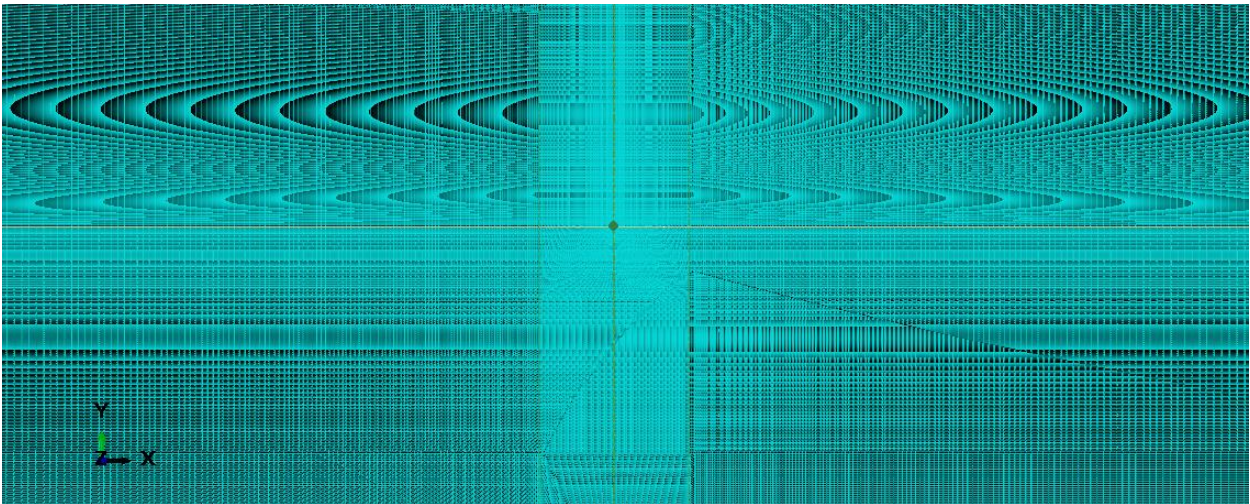


Figura 3-27. Zoom de la malla en la zona del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con doble espesor.

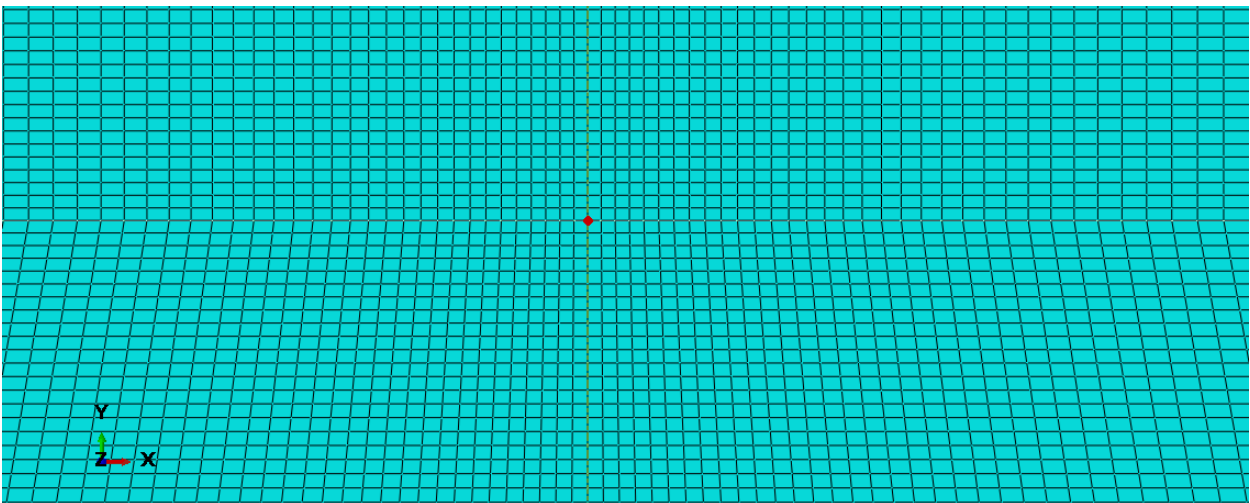


Figura 3-28. Zoom 2 de la malla en la zona del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con doble espesor.



Se obtienen los mapas de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación y quedan representados a continuación. Se han quitado de la representación las capas de  $0^\circ$  y se ha marcado el fondo de la delaminación para facilitar el entendimiento de los resultados.

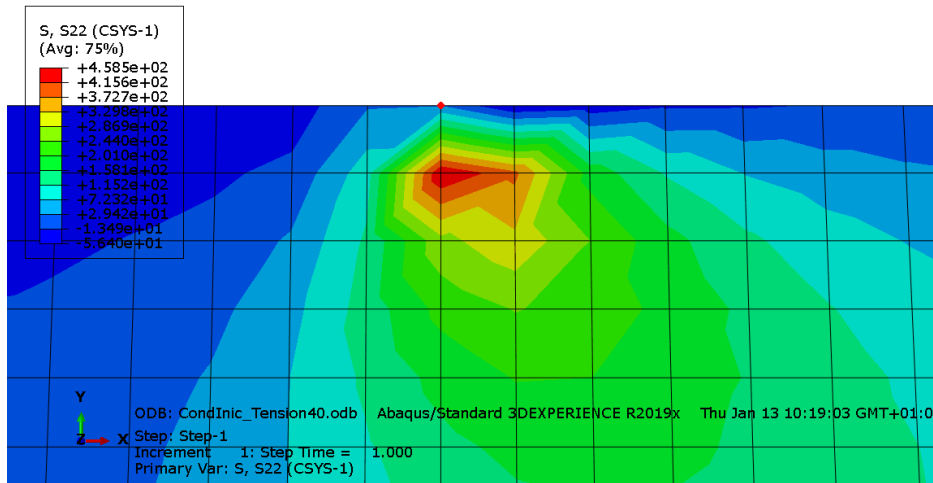


Figura 3-29. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (doble espesor, carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).

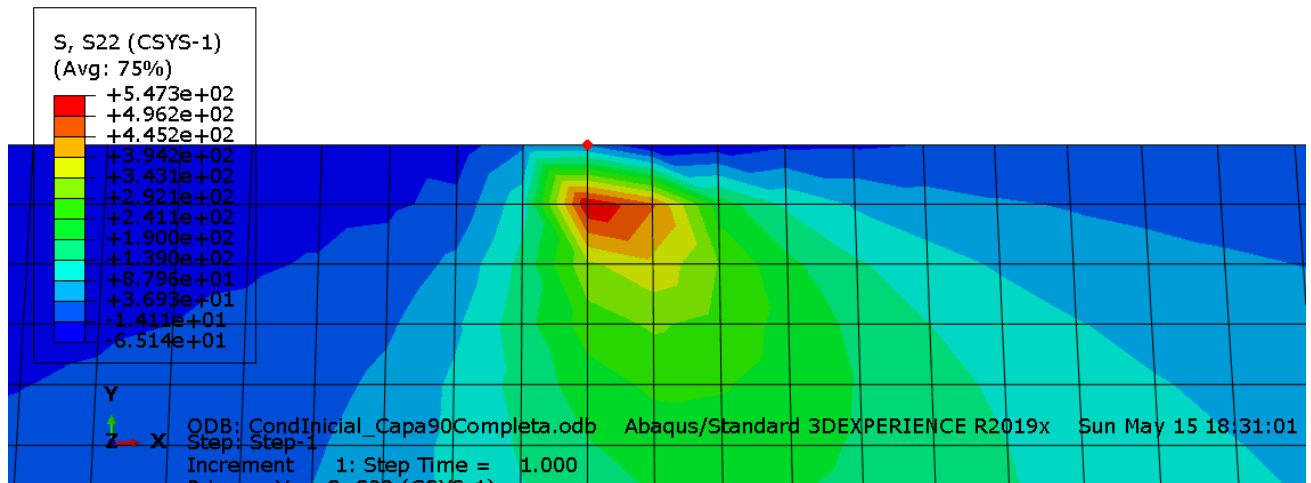


Figura 3-30. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (doble espesor, carga longitudinal y carga transversal del 40% en toda la capa de  $90^\circ$ ).

Analizando los mapas de las Figuras 3-29 y 3-30 puede verse que la zona de máximas tensiones circunferenciales para el caso del espesor doble no está orientada a  $45^\circ$ . En este caso, la orientación más probable de crecimiento de grieta es perpendicular a la interfase. Esto significa que si una grieta creciera desde el fondo de la delaminación lo más probable sería que lo hiciera en perpendicular a la interfase, es decir, exactamente lo que esperábamos que ocurriera.

### 3.3.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de $90^\circ$ desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Para corroborar los resultados obtenidos del modelo solo con delaminación se decide analizar, como con anterioridad, el posible comportamiento de una grieta de pequeño tamaño que crece desde el fondo de la delaminación internándose en la capa de  $90^\circ$ .

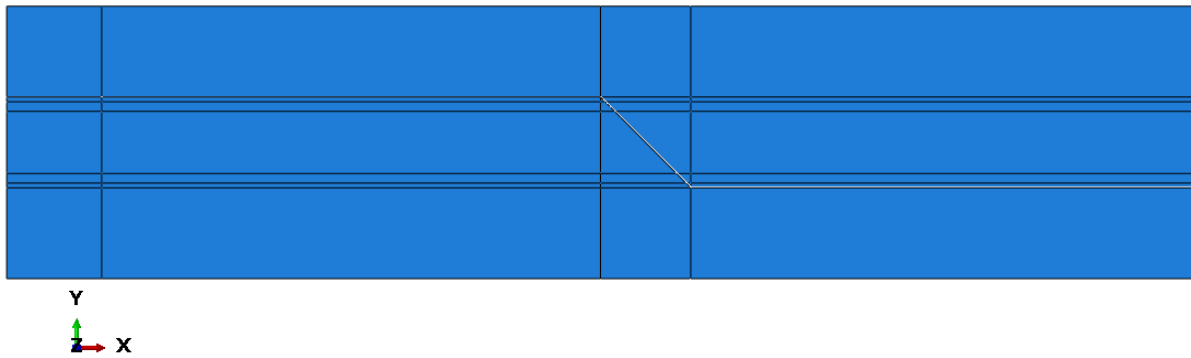


Figura 3-31. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.02 mm en doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

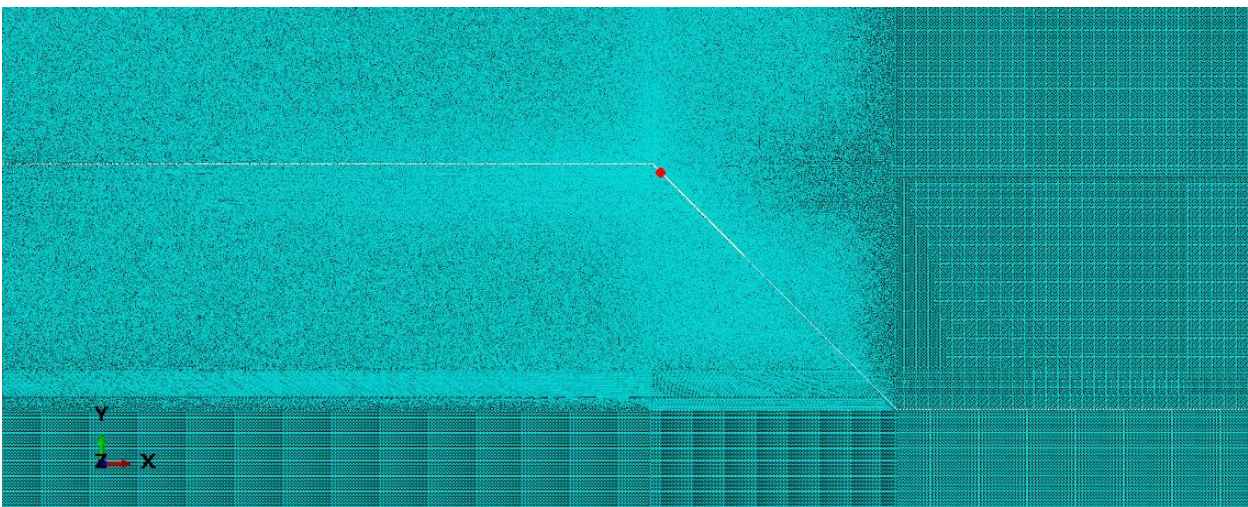


Figura 3-32. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

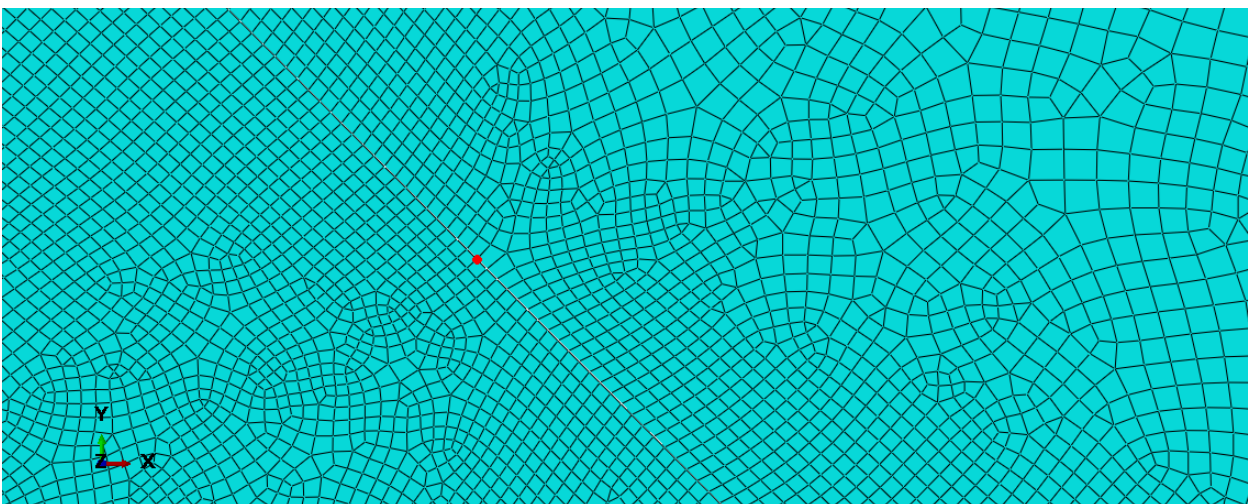


Figura 3-33. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

Se obtuvo la evolución de la tasa de liberación de energía en el fondo de esta pequeña grieta con la orientación de la misma para los dos casos de aplicación de la carga transversal: condición inicial que afecta a toda la capa de  $90^\circ$  y afectando solo a dos franjas de esta capa, pegadas a las interfases, de ancho 0.02 mm.

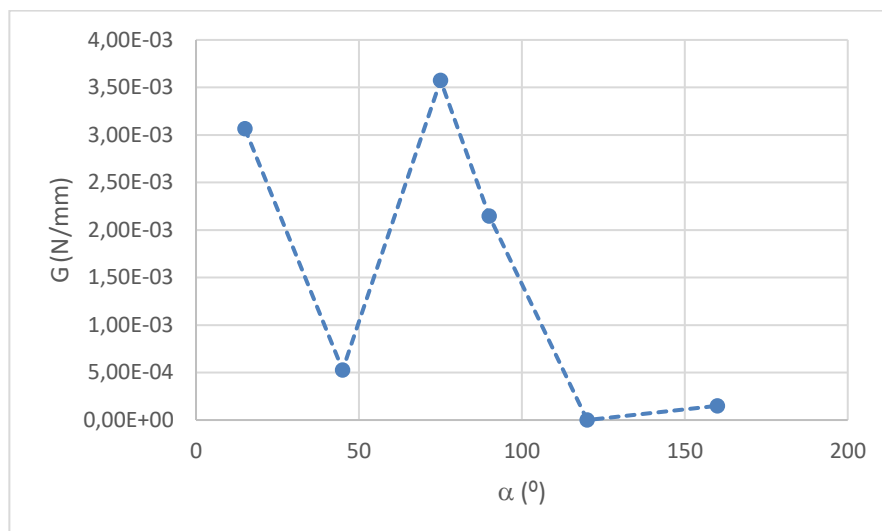


Gráfico 3-9. Evolución G- $\alpha$  en doble espesor para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.

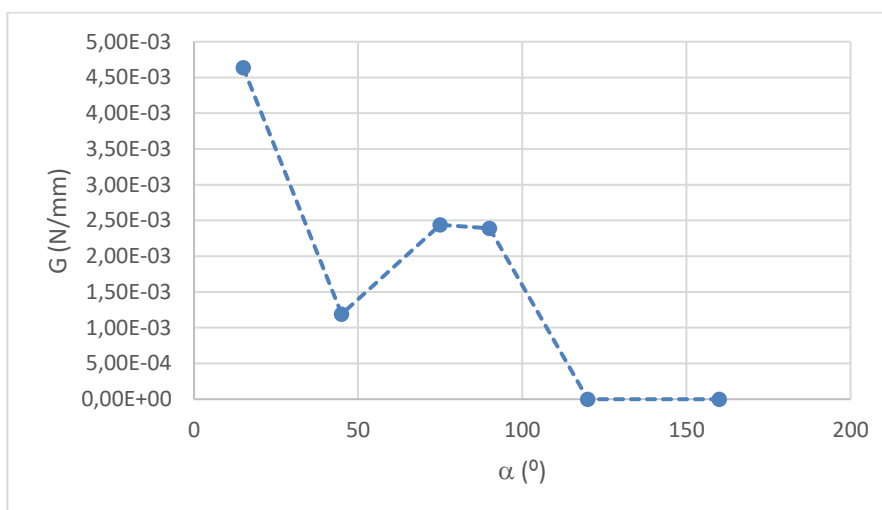


Gráfico 3-10. Evolución G- $\alpha$  en doble espesor para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de 90°.

Como puede observarse en los Gráficos 3-9 y 3-10, la máxima tasa de liberación de energía en ambos casos se da para una orientación de grieta diferente a 45°, resultado esperable tras el análisis del mapa de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación.

### 3.3.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Tras llegar a la conclusión de que desde el fondo de la delaminación la orientación más probable de crecimiento de una grieta que se interne en la capa de 90° es distinta a 45° con respecto a la interfase, sería interesante comprobar cómo crecería una grieta algo más grande. Igual que en los modelos con espesor “original” tuvimos que descartar la posibilidad de que la grieta naciera a 45° y después se reorientara, ahora habría que comprobar que una grieta de mayor tamaño no tendría una orientación preferente de crecimiento de 45°.

Para ello se introdujeron en el modelo con doble espesor grietas de 0.06 mm con diferentes orientaciones y se obtuvo la evolución de la tasa de liberación de energía en su fondo con la orientación de la misma.

En el caso de aplicar la condición inicial en dos franjas de la capa de 90° pegadas a las interfases, estas son de ancho 0.06 mm de nuevo, para que la totalidad de la grieta esté dentro de la zona afectada para todas las

orientaciones.

En las Figuras 3-34, 3-35 y 3-36 pueden verse imágenes del modelo desde la interfaz de Abaqus.

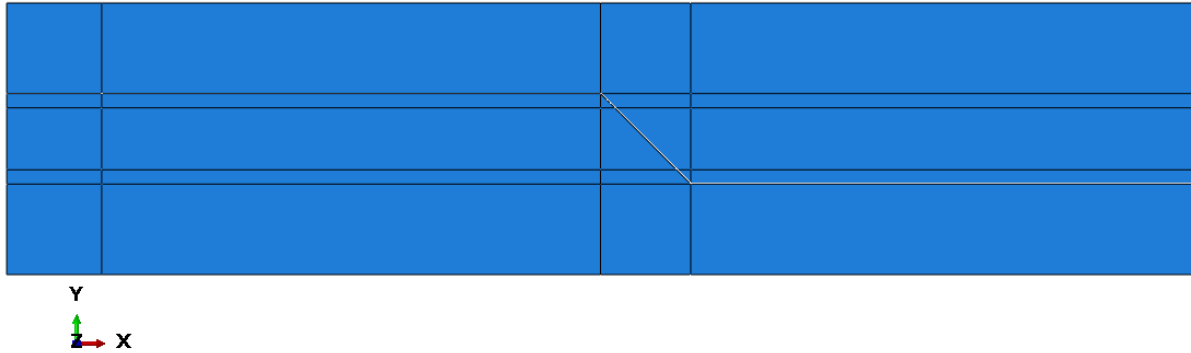


Figura 3-34. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.06 mm en doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

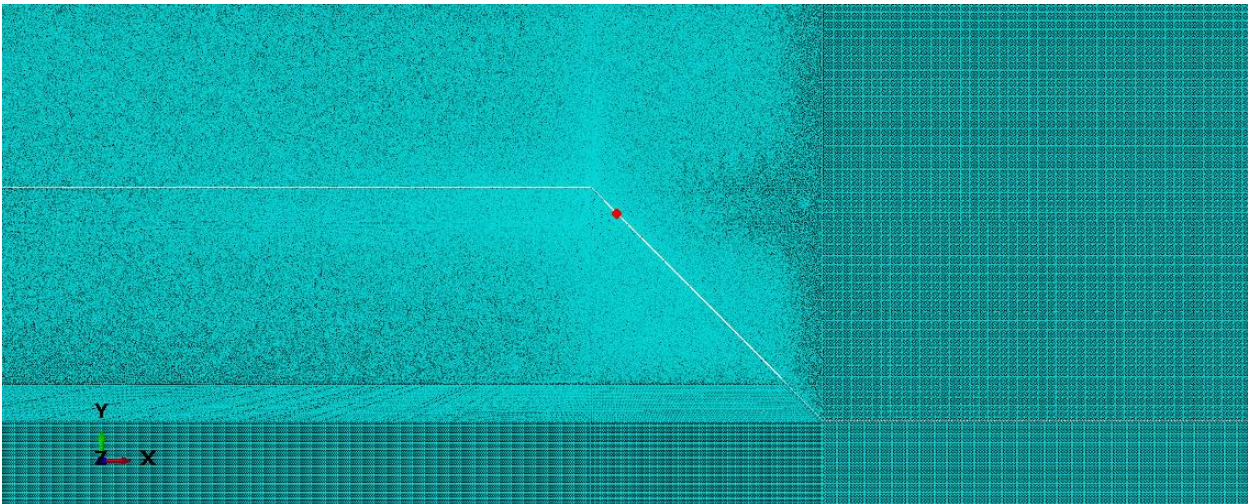


Figura 3-35. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

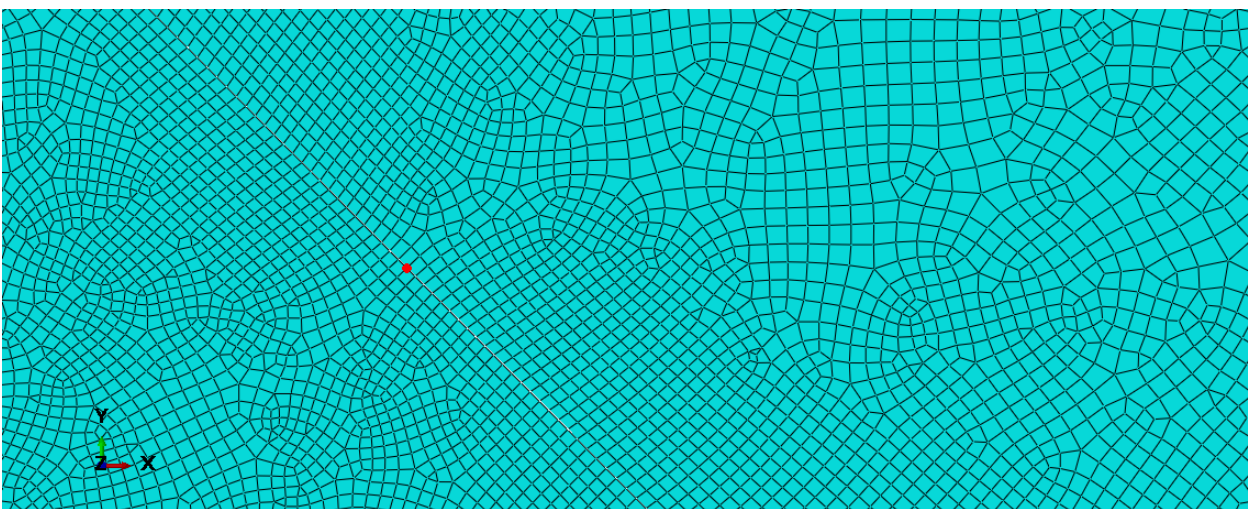


Figura 3-36. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con doble espesor para  $\alpha = 45^\circ$ .

Los resultados obtenidos de estos modelos fueron los valores de la tasa de liberación de energía en el fondo de la grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  y quedan representados para cada una de las orientaciones de la misma en los Gráficos 3-11 y 3-12.

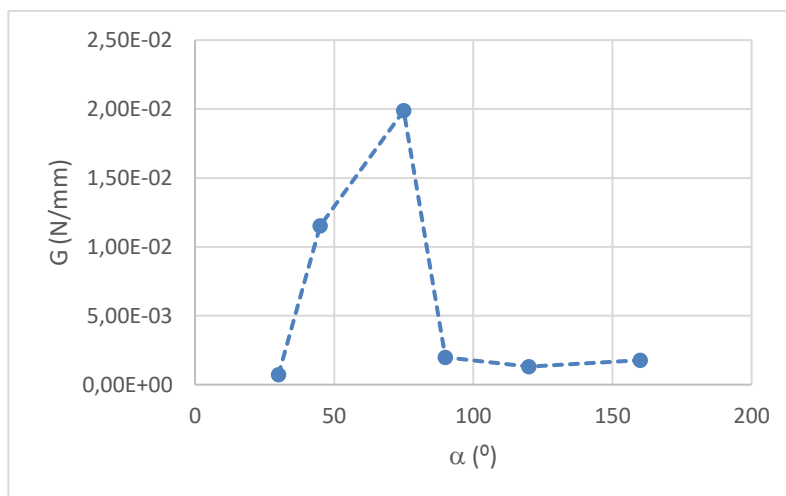


Gráfico 3-11. Evolución  $G$ - $\alpha$  en doble espesor (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de la capa de  $90^\circ$  de 0.06 mm de ancho.

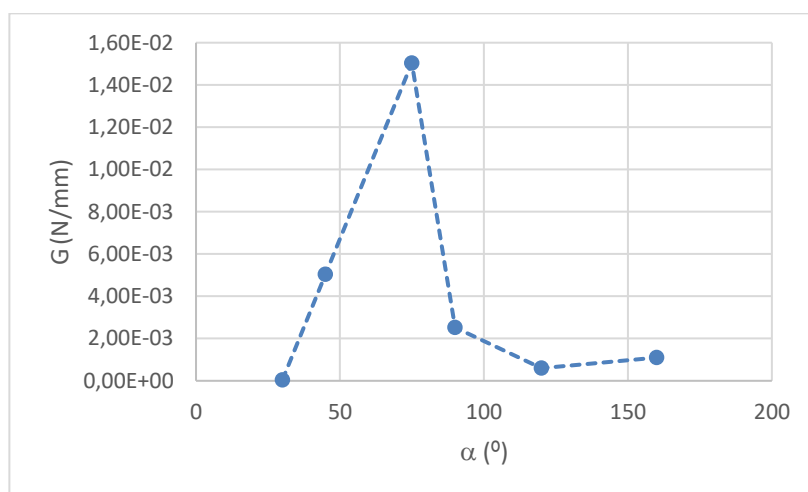


Gráfico 3-12. Evolución  $G$ - $\alpha$  en doble espesor (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de  $90^\circ$ .

Para una grieta de mayor tamaño la orientación más probable de crecimiento, desde el punto de vista energético, sigue siendo distinta a los  $45^\circ$ . Esto quiere decir que la grieta, una vez generada y con un tamaño considerable, tampoco crecerá atravesando la capa de  $90^\circ$  orientada a  $45^\circ$  con respecto a la interfase.

### 3.4 Modelos con espesor mitad de la capa de $90^\circ$

Llegados a este punto, las conclusiones que hemos obtenido son que en el laminado de espesor “normal” al añadir las tensiones transversales, consecuencia del efecto borde, parece quedar explicado el daño no convencional observado experimentalmente y que para modelos con doble espesor de la capa de  $90^\circ$ , incluso tras afectarlos por estas tensiones transversales, todo sigue apuntando a que rompería en dirección perpendicular a la aplicación de la carga longitudinal.

Para cerrar esta parte del trabajo, se elaboraron modelos con espesor mitad de la capa de  $90^\circ$  (0.095 mm) para

también descartar que el efecto borde provocara sobre ellos el fallo que se está estudiando, ya que experimentalmente este laminado rompió de manera convencional. En la Figura 3-37 puede verse un esquema de los modelos con espesor mitad.

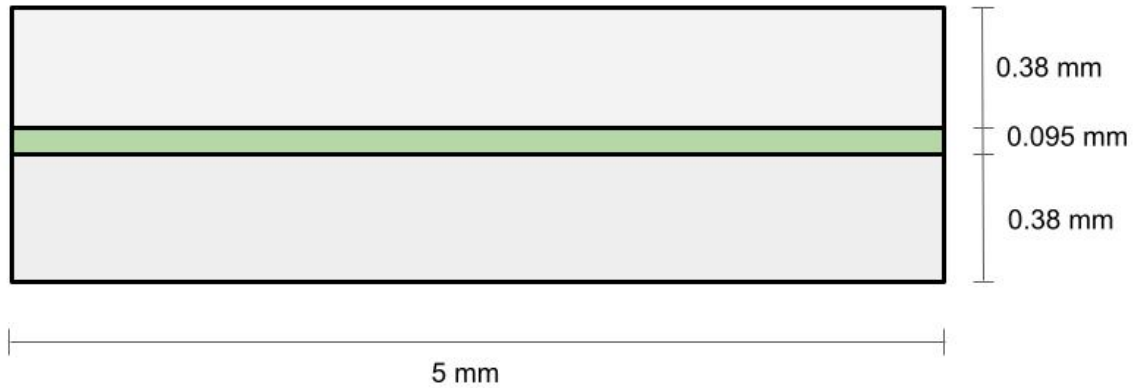


Figura 3-37. Esquema general de los modelos con espesor mitad.

Para este nuevo espesor, se realizan los mismos estudios que para los espesores “original” y doble, es decir, análisis de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de una delaminación de gran tamaño y representación de la evolución de la tasa de liberación de energía en el fondo de una grieta que se interna en la capa de  $90^\circ$  desde la delaminación, con la orientación de la misma.

De nuevo, hubo que realizar modelos desde cero intentando obtener un mallado de los mismos lo más parecido posible al de los modelos elaborados hasta el momento.

### 3.4.1 Modelo con delaminación de gran tamaño (2.1 mm)

Sobre estos modelos, vuelven a obtenerse los mapas de tensiones circunferenciales en el entorno del fondo de la delaminación aplicando la carga longitudinal y una tensión transversal del 40% de la misma como condición inicial tanto en la totalidad de la capa de  $90^\circ$  como en dos franjas cercanas a las interfases de ancho 0.02 mm.

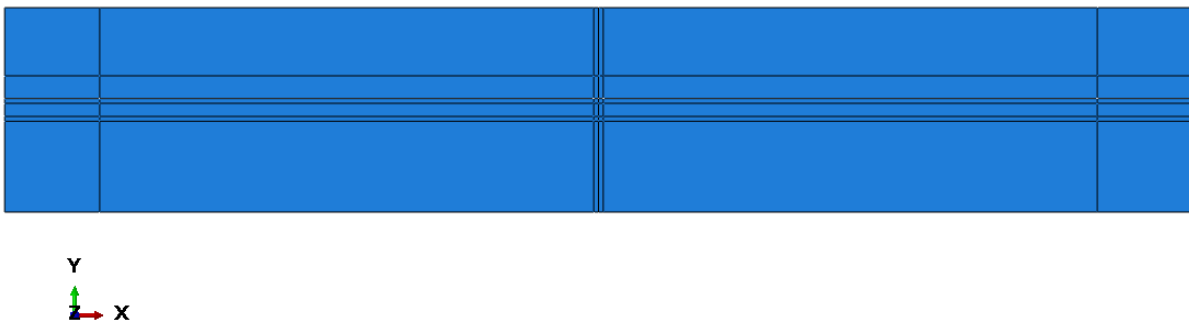


Figura 3-38. Imagen del modelo solo con delaminación en espesor mitad.

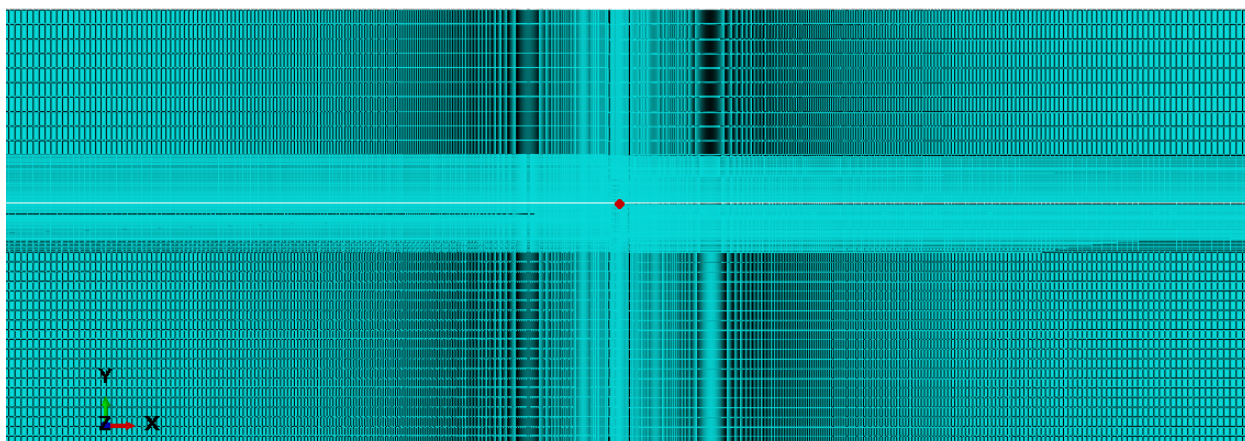


Figura 3-39. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con espesor mitad.

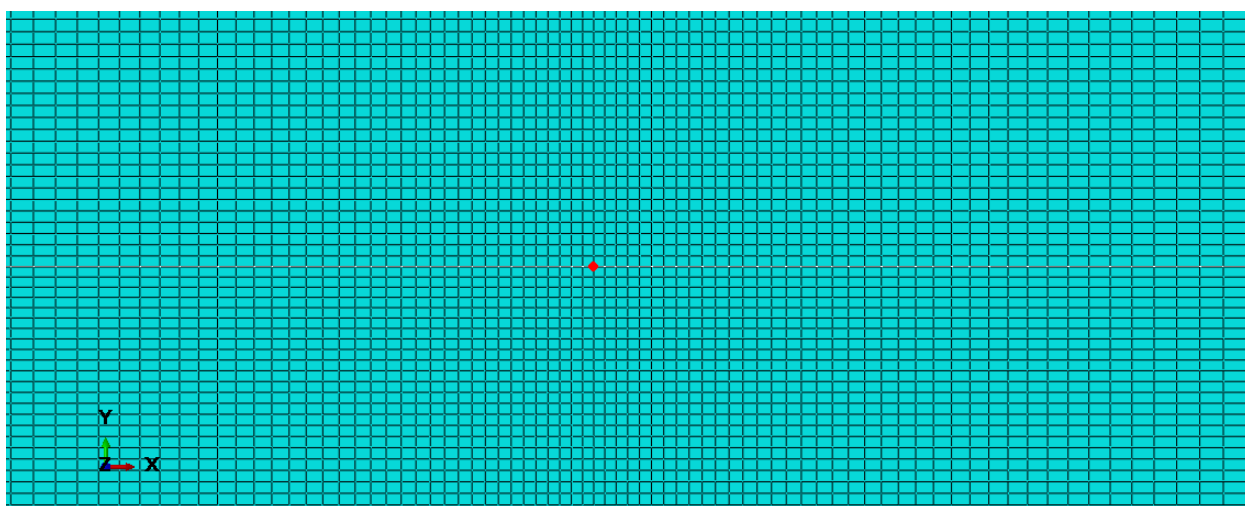


Figura 3-40. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la delaminación (marcado) en el modelo con espesor mitad.

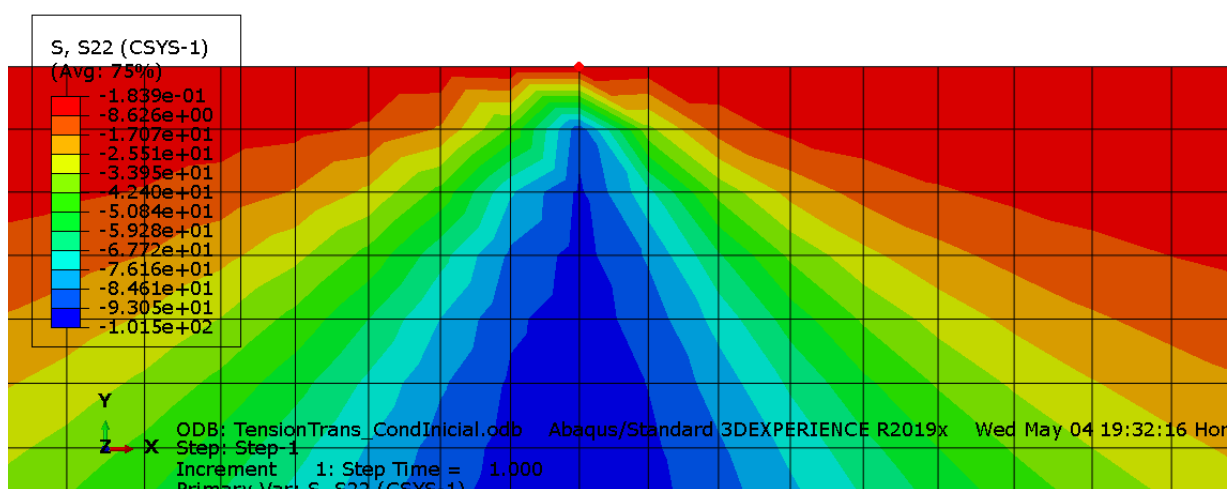


Figura 3-41. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (espesor mitad, carga longitudinal y carga transversal del 40% como condición inicial en dos franjas de 0.02 mm).

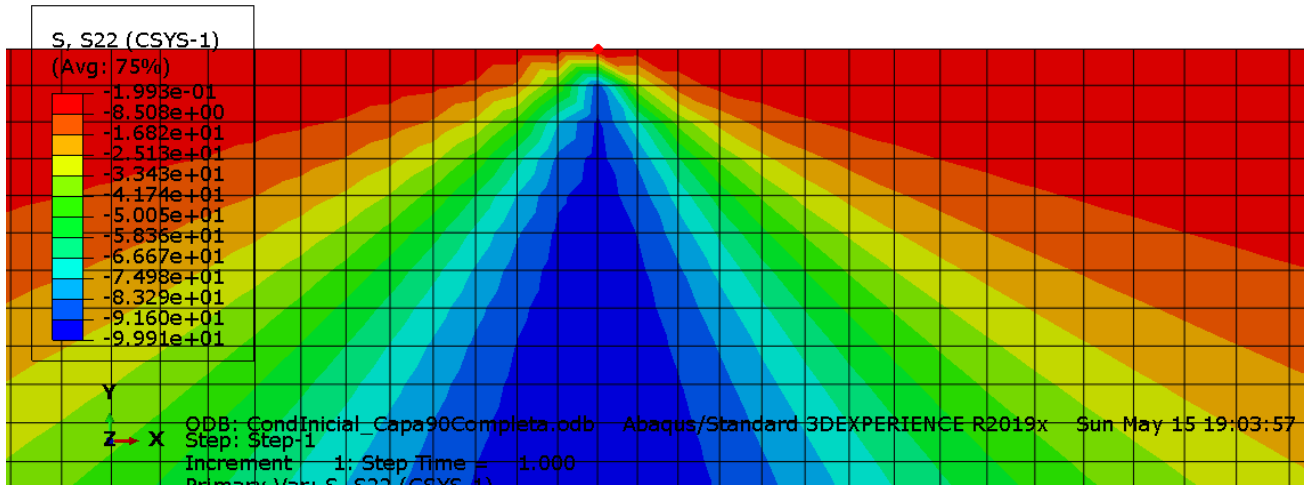


Figura 3-42. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de la delaminación de 2.1 mm (espesor mitad, carga longitudinal y carga transversal del 40% en toda la capa de 90°).

En las Figuras 3-41 y 3-42 quedan representadas las tensiones circunferenciales, igual que siempre que han aparecido estos mapas a lo largo del presente documento, solo en la capa de 90° y marcando el fondo de la delaminación. Puede verse que todas las tensiones que aparecen en esta zona del modelo tienen valor negativo, es decir, son compresiones. Esto quiere decir que la capa de 90° se encuentra comprimida en la zona cercana al fondo de la delaminación. Esta configuración de tensiones indica que no sería posible que una grieta se abriera en ninguna dirección desde el fondo de la delaminación por la capa de 90°.

Por tanto, se ha obtenido otro resultado positivo, ya que en el laminado con espesor mitad de la capa de 90°, atendiendo al criterio de máxima tensión circunferencial, no hay posibilidad de que se genere grieta en ninguna dirección.

### 3.4.2 Modelo con grieta de 0.02 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño

Por completar los estudios realizados sobre estos modelos y comprobar que realmente no sería posible, bajo las condiciones de carga con las que se está trabajando, que una grieta creciera provocando la rotura del laminado con una orientación de 45° con respecto a la interfase, se obtuvo la evolución G-α en el fondo de una pequeña grieta que se interna en la capa de 90° desde el fondo de la delaminación.

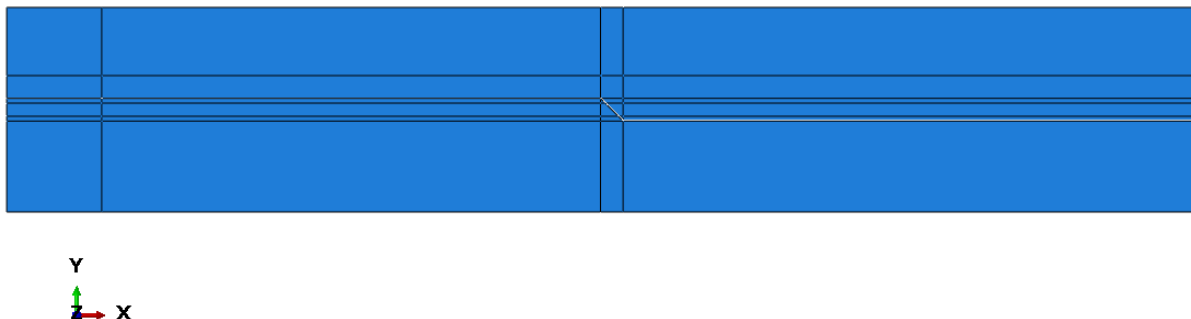


Figura 3-43. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.02 mm en espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .



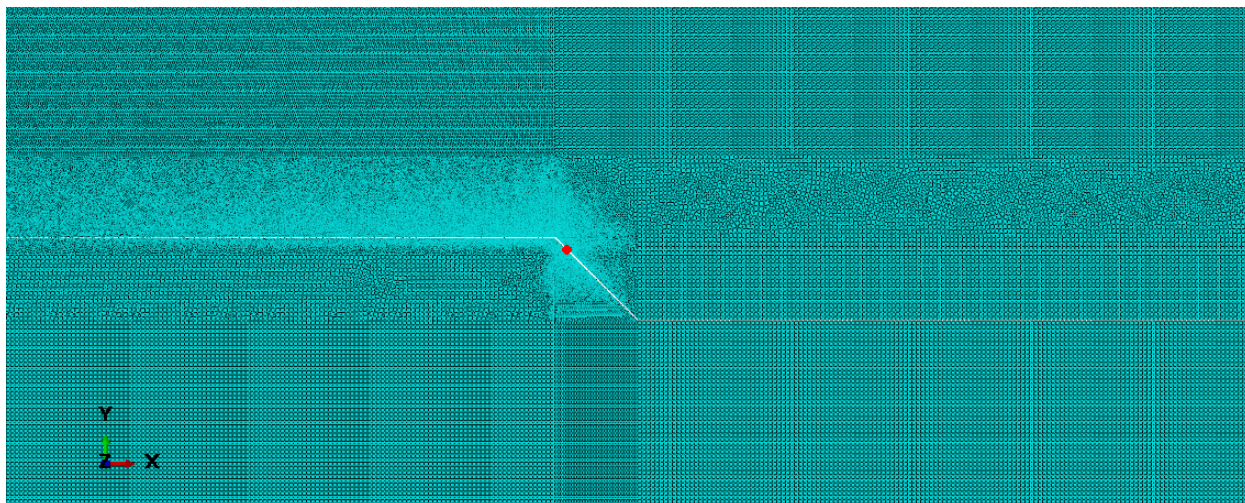


Figura 3-44. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .

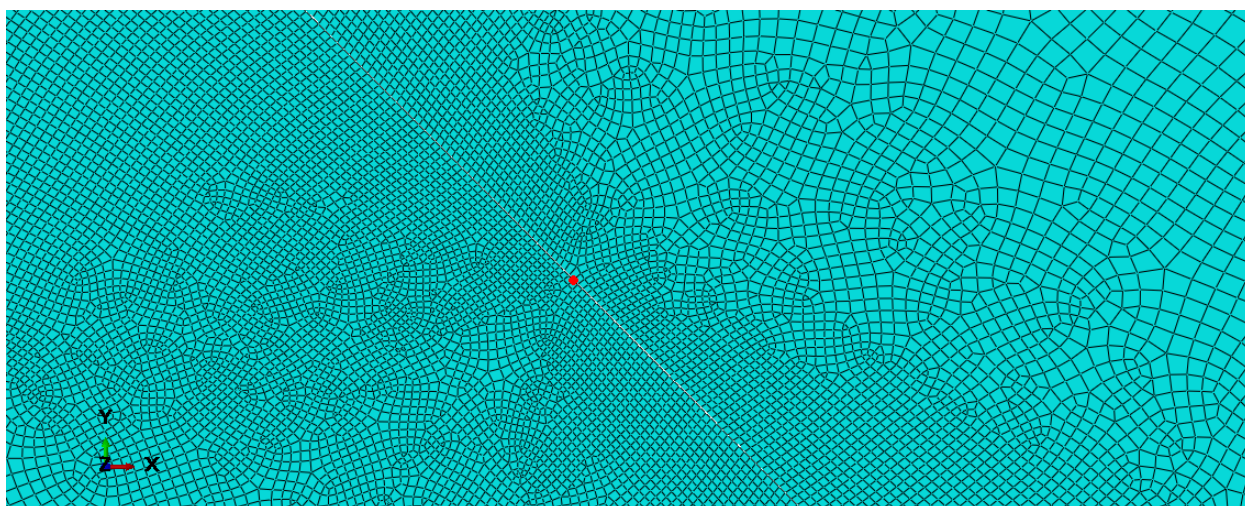


Figura 3-45. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.02 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .

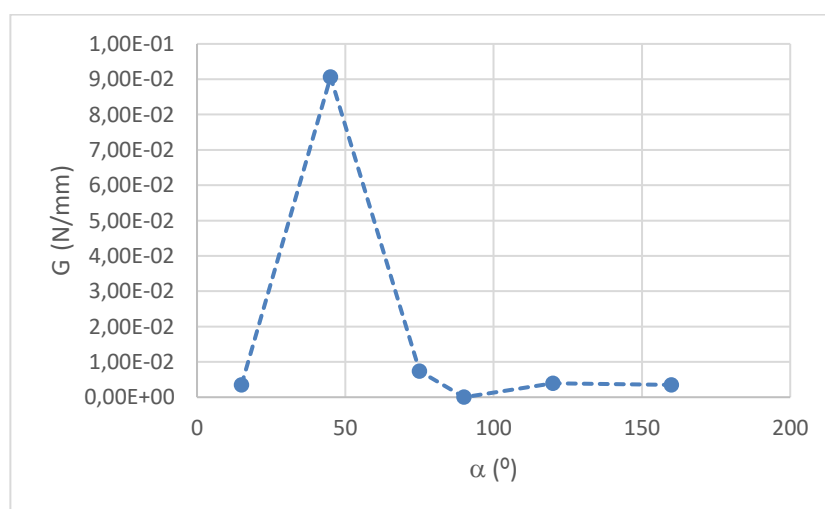


Gráfico 3-13. Evolución G- $\alpha$  en espesor mitad para condición inicial del 40% aplicada en dos franjas de 0.02 mm.

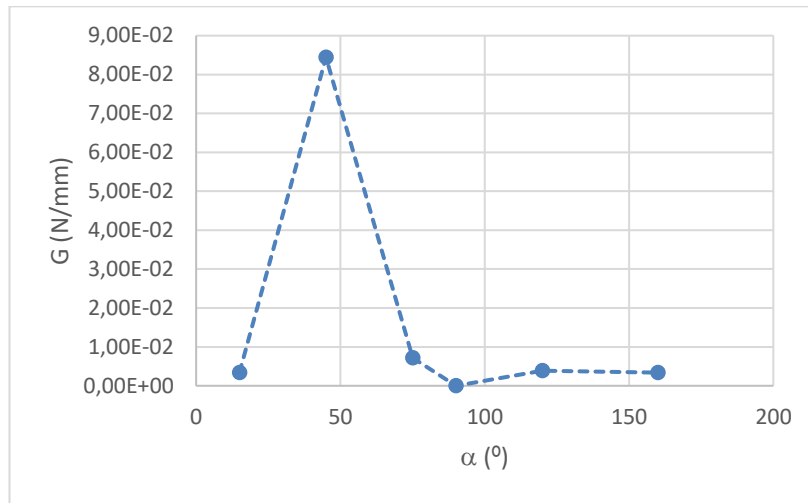


Gráfico 3-14. Evolución G- $\alpha$  en espesor mitad para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de 90°.

Para este espesor de la capa de 90°, la evolución de G (Gráficos 3-13 y 3-14) sí que tiene su máximo en 45°, pero ya que en el análisis de tensiones circunferenciales se ha visto que solo existen compresiones en el entorno del fondo de la delaminación, aunque la orientación más probable de crecimiento de grieta sea 45°, no es posible que esta se genere de acuerdo al mecanismo de daño asumido

### 3.4.3 Modelo con grieta de 0.06 mm que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación de gran tamaño

Se realizó también para este espesor de la capa de 90° el análisis del comportamiento de una grieta de mayor tamaño, partiendo esta desde el fondo de una delaminación. Se aplican sobre el modelo la carga longitudinal que modela la tracción aplicada durante el ensayo y la carga transversal como condición inicial.

La condición inicial se ha aplicado hasta el momento de dos maneras diferentes: en la totalidad de la capa de 90° y en dos franjas pegadas a las interfases, de ancho variable en función de la grieta modelada en cada caso. En estos modelos con espesor mitad de la capa de 90° y grieta de 0.06 mm, solo puede contemplarse la primera opción ya que el espesor no permite la definición de dos franjas de 0.06 mm de ancho dentro de él.

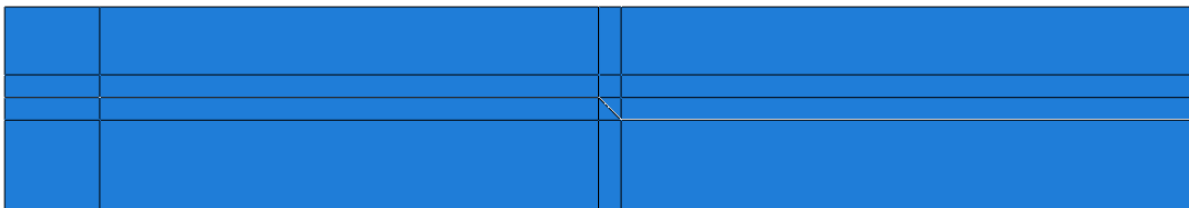


Figura 3-46. Imagen del modelo con delaminación y grieta de 0.06 mm en espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .

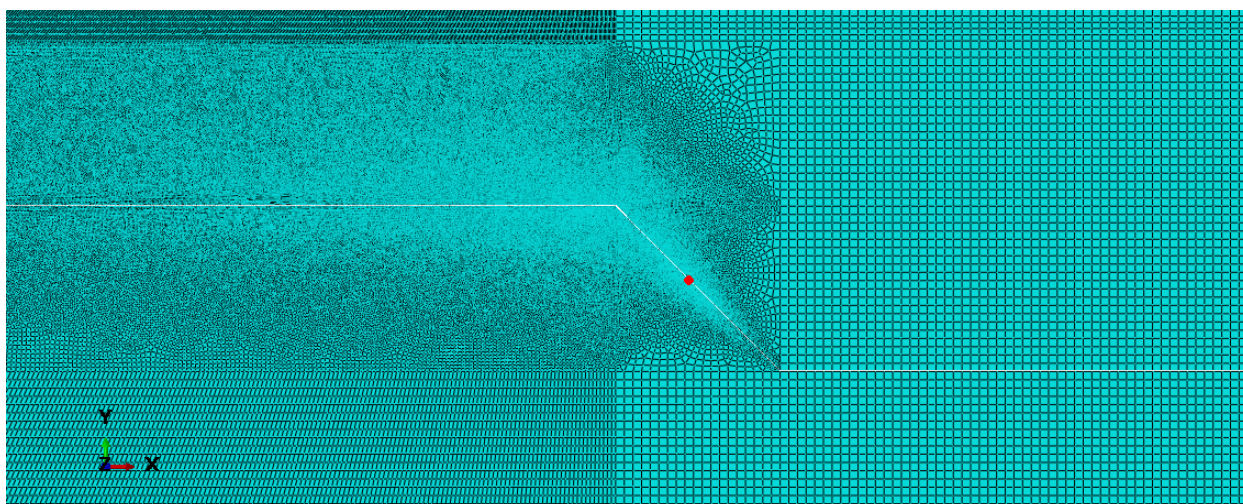


Figura 3-47. Imagen de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .

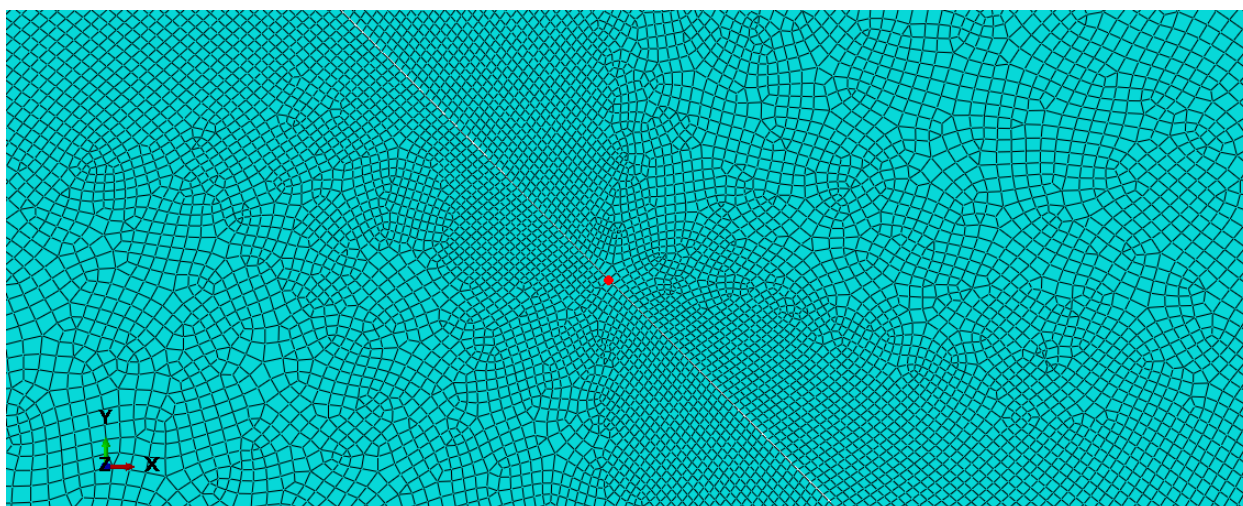


Figura 3-48. Zoom de la malla en el entorno del fondo de la grieta de 0.06 mm (marcado) en el modelo con espesor mitad para  $\alpha = 45^\circ$ .

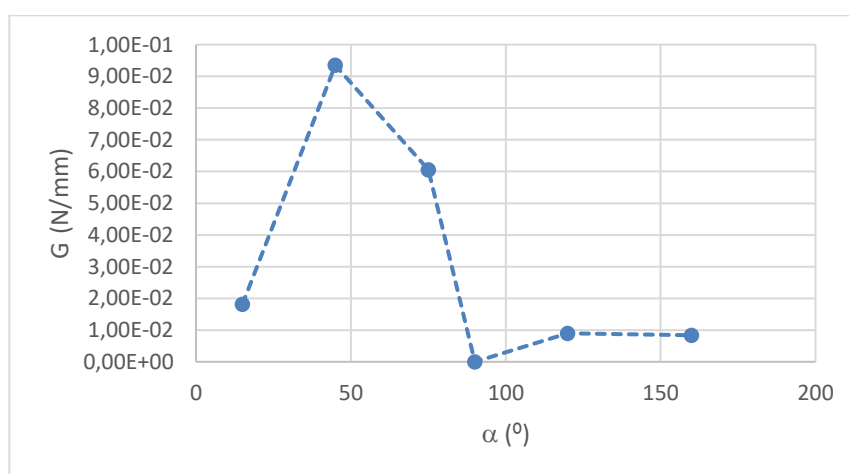


Gráfico 3-15. Evolución G- $\alpha$  en espesor mitad (grieta triple) para condición inicial del 40% aplicada en toda la capa de  $90^\circ$ .

De la evolución representada en el Gráfico 3-15, sacamos las mismas conclusiones que en el apartado anterior. La orientación más probable de crecimiento de grieta en este caso serían los  $45^\circ$  con respecto a la interfase, pero de nuevo los resultados previos no avalan el que esta la grieta se genere.

### 3.5 Crecimiento de la grieta que se interna en la capa de $90^\circ$ desde el fondo de una delaminación de gran tamaño (2.1 mm) en modelo con espesor original de la capa de $90^\circ$

Con los resultados obtenidos hasta este momento, parece quedar demostrado que, si existiera una delaminación de gran tamaño, desde su fondo podría aparecer una pequeña grieta que se interne en la capa de  $90^\circ$  con una orientación de  $45^\circ$ . Todo esto para el laminado con espesor de la capa de  $90^\circ$  de 0.19 mm y no para laminados distintos a este.

Se decidió en este punto ver si esta pequeña grieta podría crecer atravesando completamente la capa de  $90^\circ$  provocando así el fallo observado experimentalmente. Para ello se realizaron modelos con diferentes longitudes de grieta que crece desde el fondo de la delaminación. Se aplicó a estos la carga longitudinal y una condición inicial del 90% en toda la capa de  $90^\circ$  y se obtuvo el valor de la tasa de liberación de energía.

El valor de la carga transversal aplicada como condición inicial es ahora del 90% de la carga longitudinal porque en los estudios realizados en paralelo a este trabajo, se llegó a la conclusión de que las tensiones generadas debido al efecto borde podían alcanzar valores bastante mayores al 40% aplicado hasta el momento. Además, esta condición se aplicó sobre toda la capa de  $90^\circ$  porque se descubrió que el perfil de estas tensiones tendría una forma intermedia a las dos con las que se ha trabajado hasta el momento. Teniendo que aplicarla igual en todos los modelos, para que los resultados fueran comparables, tenía más sentido hacerlo en toda la capa de  $90^\circ$ , al ser el tamaño de la grieta lo que varía de unos a otros (nos interesa que la grieta quede siempre contenida en la zona afectada por las tensiones transversales).

En la Figura 3-49 puede verse un esquema de los modelos realizados para este apartado.

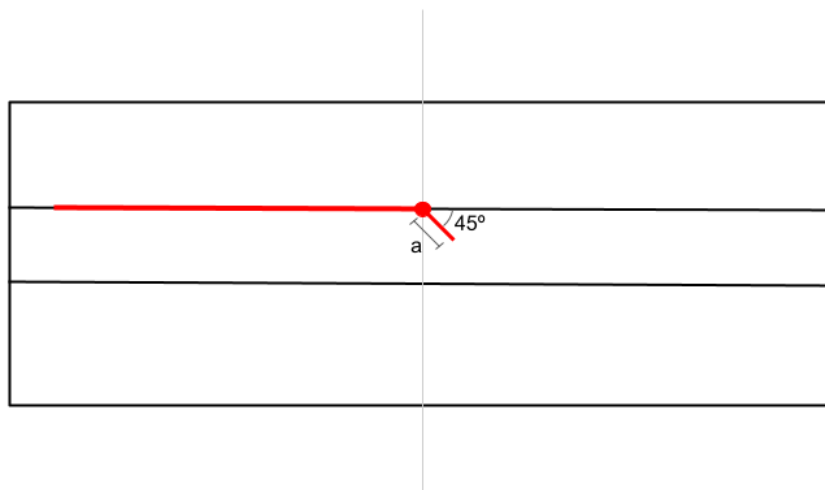


Figura 3-49. Esquema de los modelos para estudiar el posible crecimiento de una grieta atravesando la capa de  $90^\circ$  a  $45^\circ$  desde el fondo de una delaminación.

En el Gráfico 3-16 se representa la evolución de G con la longitud de dicha grieta:

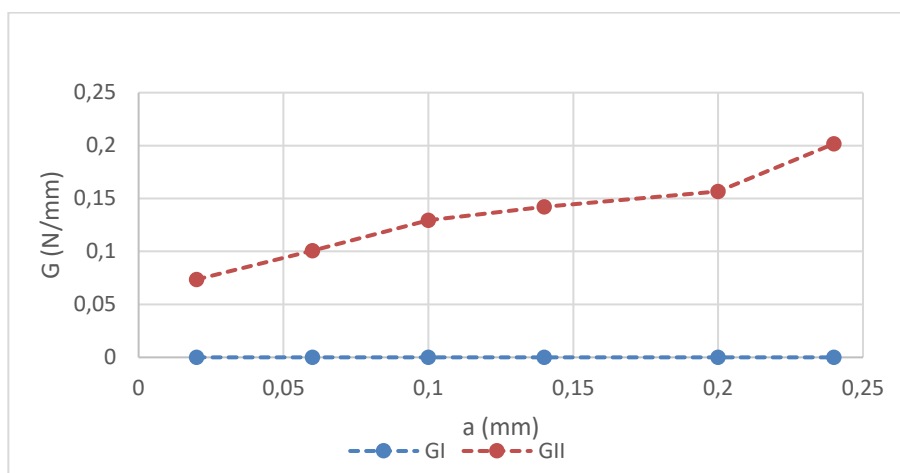


Gráfico 3-16. Evolución  $G-\alpha$  (simulación de crecimiento de la grieta que atraviesa la capa de  $90^\circ$  partiendo de una delaminación).

La tasa de liberación de energía va haciéndose mayor cuanto más grande es la grieta, lo cual indica que el crecimiento de la misma es posible. Esto quiere decir que la grieta cuya generación a  $45^\circ$  desde el fondo de una delaminación preexistente se ha demostrado ser posible en apartados anteriores, es posible que crezca atravesando la capa de  $90^\circ$  dando lugar a lo observado experimentalmente. Por la contribución de los modos se observa que el crecimiento sería en Modo II.

Se realizó este mismo análisis, pero sin delaminación, es decir, considerando la posibilidad de que primero apareciera la grieta que atraviesa la capa de  $90^\circ$  y después delaminara la interfase. En estos modelos la condición inicial aplicada fue del 80% sobre toda la capa de  $90^\circ$ , por los mismos motivos explicados para el caso anterior.

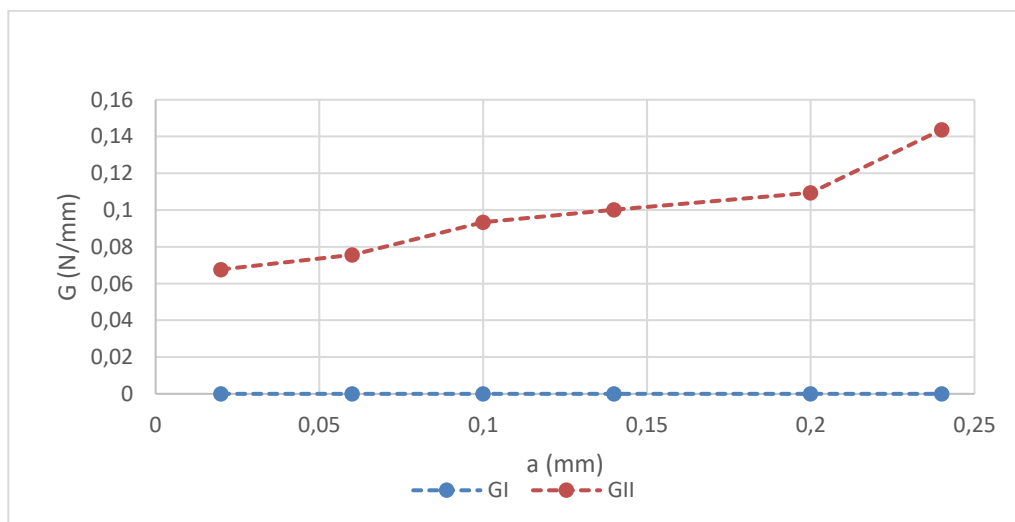


Gráfico 3-17. Evolución  $G-\alpha$  (simulación de crecimiento de la grieta que atraviesa la capa de  $90^\circ$  sin delaminación).

De nuevo, como puede verse en el Gráfico 3-17, la tasa de liberación de energía aumenta con el tamaño de la grieta. Este resultado nos dice que si se generara por cualquier motivo una pequeña grieta orientada a  $45^\circ$  desde la interfase, sin delaminación, esta podría crecer atravesando la capa de  $90^\circ$  en esa misma dirección. La aparición de esta grieta es bastante improbable, pero se observaron bastantes despegues fibra-matriz contiguos en laminados de este tipo, lo que podría asimilarse a una pequeña grieta.

Volviendo a la hipótesis de que existe una delaminación anterior al daño en la capa de  $90^\circ$ : cuando dicha delaminación es de 2.1 mm, la zona de concentración de tensiones circunferenciales se orienta a  $45^\circ$  como ya se

ha visto, ¿podría esto ocurrir también con delaminaciones más pequeñas?

Para responder a esta pregunta, se analizaron los mapas de tensiones circunferenciales en el fondo de delaminaciones de diferentes tamaños: 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 1.02, 1.52, 2 y 2.06 mm. Cabe decir que todas fueron modeladas de manera que el fondo derecho de la misma quedará en el centro del modelo, es decir, lo que varía de una a otra es la distancia desde el fondo izquierdo hasta el extremo izquierdo del modelo. Esto hizo que pudiera usarse siempre el modelo, conservando el mallado en el fondo de la delaminación, cambiando únicamente el tipo de interacción entre superficies.

Se observó que, para todos los tamaños de delaminación inferiores a 2 mm, en el entorno del fondo de la misma solo aparecían compresiones. Esto quiere decir que es necesaria la preexistencia de una delaminación de tamaño significativo para que desde su fondo pueda crecer una grieta que atravesase la capa de 90°.

Se presentan en las Figuras 3-50, 3-51 y 3-52 algunos de los mapas de tensiones circunferenciales obtenidos.

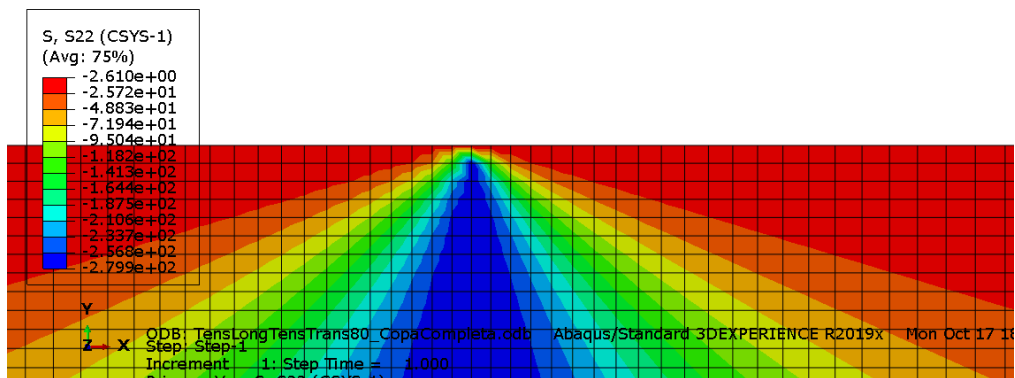


Figura 3-50. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 0.02 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de 90°).

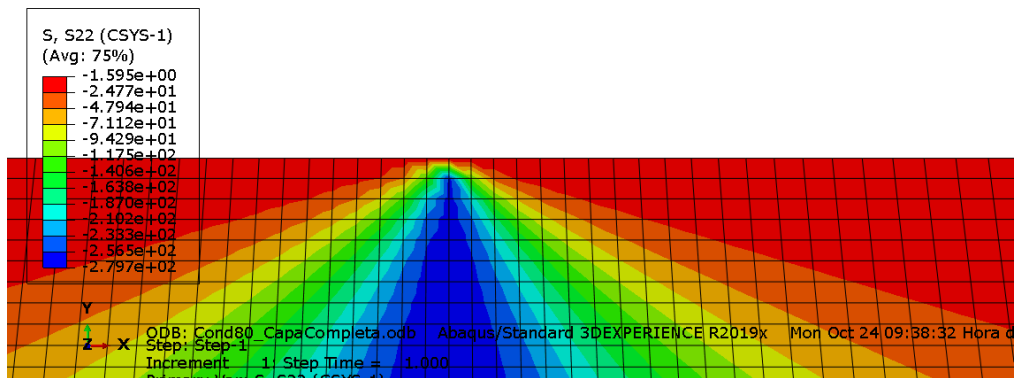


Figura 3-51. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 1.52 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de 90°).

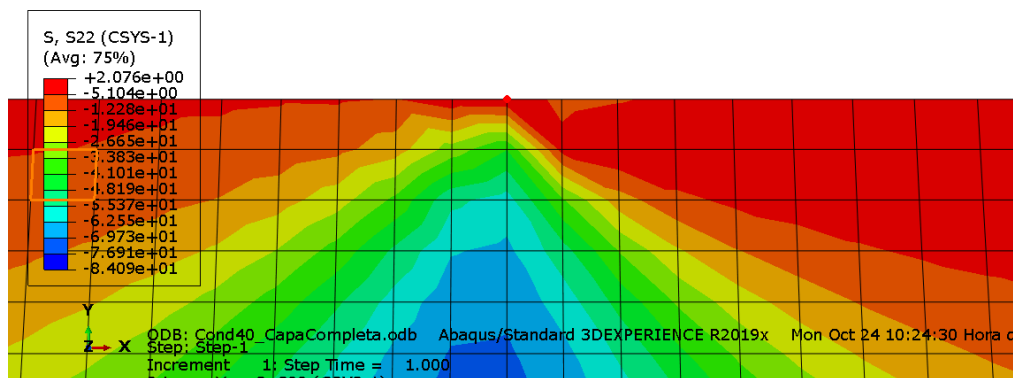


Figura 3-52. Mapa de tensiones circunferenciales en el fondo de una delaminación de 2 mm (espesor normal, carga longitudinal y condición inicial del 80% en toda la capa de 90°).

### 3.6 Crecimiento de un pequeño despegue central en la interfase del modelo de espesor normal de la capa de 90°

Los resultados obtenidos hasta el momento indican que es necesaria una delaminación de gran tamaño para que desde el fondo de la misma se genere una pequeña grieta orientada a 45° grados con respecto a la interfase. Esta grieta podría crecer atravesando la totalidad de la capa de 90° bajo las condiciones de carga con las que se está trabajando. Sin la existencia de la delaminación sería prácticamente imposible que se generara una grieta en la dirección que se busca, ya que cabe la posibilidad que la grieta se genere a partir de despegues fibra-matriz, pero estos tendrían que ser numerosos, contiguos y orientados a 45°.

Hasta ahora se ha asumido la existencia de la delaminación, pero es necesario demostrar la aparición de la misma para que el resto de resultados obtenidos sean válidos. La primera posible explicación que se decidió explorar fue que esta delaminación de gran tamaño se generara a partir de un pequeño despegue central preexistente en la interfase entre las capas a 0° y 90°. Es habitual que este tipo de laminados presente pequeños despegues entre capas.

Partiendo de esta idea se decidió modelar en el laminado de espesor de 0.19 mm (espesor original) un pequeño despegue central y analizar su posible crecimiento. Para ello se generaron modelos con tamaño creciente de delaminación y se representó la tasa de liberación de energía en su fondo frente a la longitud de la misma.

La Figura 3-53 representa un esquema que ayuda a entender el estudio realizado en este apartado.

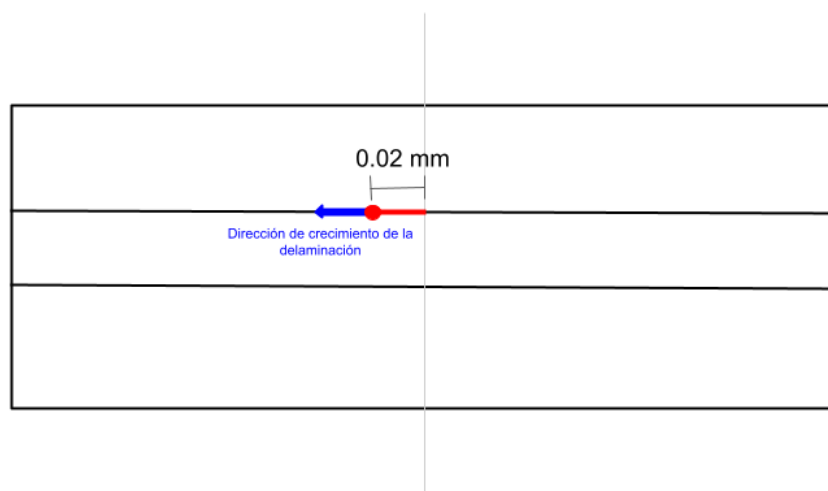


Figura 3-53. Esquema que representa el crecimiento de delaminación que se intentó modelar en este apartado.

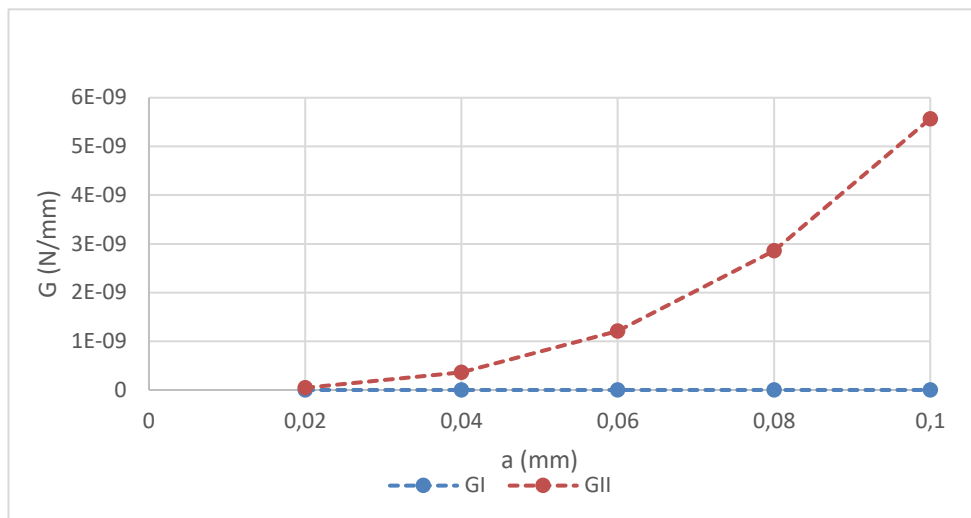


Gráfico 3-18. Evolución de G con la longitud de la delaminación.

Los valores de G aumentan exponencialmente al aumentar el tamaño de la delaminación como puede verse en el Gráfico 3-18. Esto quiere decir que sería posible obtener la grieta de 2 mm (necesaria para la aparición de la grieta a 45°) a partir de un pequeño despegue entre la capa de 0° y la capa de 90°.



## 4 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.

Esta investigación no se inicia con este trabajo, en trabajos anteriores a este se llegó a conclusiones bastante interesantes, aunque no se consiguió obtener la explicación que se buscaba. Dichas conclusiones sirven de base a los estudios realizados y presentados en este documento.

Dos de los resultados más relevantes fueron:

- Sometiendo los modelos de espesor de la capa de 90° de 0.19 mm (con delaminación, sin ella, con grietas de varios tamaños, etc.) solo a la carga longitudinal que simula el propio ensayo de tracción y al decremento térmico asociado al curado del material, no se obtuvo evidencia de que el laminado fuera a romper como lo hizo en los ensayos realizados.
- En el estudio de modelos tridimensionales de este mismo laminado se detectó la aparición de unas tensiones internas perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga durante el ensayo de tracción. Estas tensiones son consecuencia del efecto borde, tienen valor significativo y aparecen sobre todo en las zonas de la capa 90° más cercanas a las capas de 0°

Estos dos resultados llevaron a explorar la vía de aplicación sobre los modelos de estas tensiones consecuencia del efecto borde, en busca de algún indicio de la aparición de grietas tal y como se observó en el ensayo experimental.

Partiendo de esta idea se aplicó sobre los modelos con los que ya se había trabajado una tensión transversal del 40% de la carga longitudinal en los extremos superior e inferior del mismo. Los resultados obtenidos con esta configuración de carga no conseguían justificar lo ocurrido.

Es cierto que introducir estas tensiones en el modelo como una carga exterior no reproducía lo que realmente sucede ya que las tensiones generadas por el efecto borde no afectan a todo el modelo, sino que se concentran en la capa de 90°. Es por ello, que se decidió probar aplicando dichas tensiones, de nuevo del 40% de la carga longitudinal, como una condición inicial sobre dos zonas de la capa de 90° colindantes con las interfases o en la totalidad de esta capa.

Con esta nueva configuración de carga tanto el criterio de máxima tensión circunferencial como el de máxima tasa de liberación de energía apuntan a que la orientación más probable de crecimiento de una grieta que se interna en la capa de 90° desde el fondo de una delaminación es a 45° con respecto a la interfase, justo lo que buscábamos encontrar.

Tras la obtención de este resultado, se planteó que tan importante era obtener la explicación de por qué ocurre lo observado experimentalmente en el laminado de espesor "original" como comprobar que, bajo esas condiciones de carga, esto no ocurre en laminados diferentes a este.

Se realizaron modelos con espesor doble y espesor mitad y se realizaron los mismos estudios que sobre los modelos con espesor de 0.19 mm. Para el espesor doble los resultados apuntan a que la rotura ocurrirá en perpendicular a la aplicación de la carga del ensayo de tracción y para el espesor mitad no parece posible que se genere grieta en ninguna dirección desde el fondo de una delaminación preexistente (zona comprimida).

También se realizaron modelos con tamaños crecientes de la grieta que se interna en la capa de 90° desde el fondo de la delaminación para corroborar que la dirección de aparición de la grieta se conserva durante su

crecimiento a través de la capa de 90°.

Con esto se aportan evidencias que ayudan a explicar lo observado experimentalmente partiendo de la hipótesis de la preexistencia de una delaminación de gran tamaño en el laminado.

Llegados a este punto, era necesario ver si era posible la generación de dicha delaminación. Para ello se modeló el crecimiento de la misma desde un pequeño despegue (cuya presencia es habitual en este tipo de laminados) de manera manual, es decir, generando modelos con longitud creciente de la misma. La tasa de liberación de energía aumentaba conforme lo hacía la longitud de la delaminación por lo que, bajo las condiciones de carga antes comentadas, el despegue inicial de fibras podría convertirse en una gran delaminación.

Por tanto, como conclusión final puede decirse que se ha encontrado evidencia cualitativa con los modelos numéricos desarrollados y a partir de las hipótesis asumidas que apoya la aparición de una grieta a 45° en la capa de 90 de un laminado [0<sub>2</sub> 90 0<sub>2</sub>] sometido a tracción.

Este trabajo deja varias líneas abiertas para seguir trabajando:

- 1) 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.
- 2) Sería interesante examinar el interior de las probetas ensayadas con la finalidad de detectar hasta de distancia desde la cara de las mismas afectan las tensiones consecuencia del efecto borde.
- 3) Ahondar en el efecto borde para tener más información acerca de cómo afecta realmente a cada laminado y como podría modelarse durante la realización de estudios del tipo de los presentados en este documento de manera más realista, con un cálculo preciso del estado de tensiones biaxiales que se genera, identificando la contribución de la componente asociada al curado y mecánica, y comparando con parámetros críticos de rotura del material

---

## REFERENCIAS

---

- [1]. Izquierdo, C., 2021. *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*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. 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.
- [5]. Sánchez-Carmona S., Barroso A., V. Correa E., París F. Non-conventional failures caused by the edge effect in cross-ply laminates made of ultra-thin plies, Composites Part B 254 (2023) 110576.
- [6]. Culebras, E., 2021. *Estudio de fallo no convencional en laminados  $[0_m, 90_n]_s$ : caracterización del fallo a partir del efecto de borde*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.