

Trabajo Fin de Grado

Estudio del comportamiento a fractura de una viga
curva de material compuesto

Study on the fracture behavior of a curved beam made
of composite material

Autor:

Mario Andreu Ordoñez

Director:

Carlos Mallor Turón

Titulación del autor:

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2024/2025

RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento a fractura de una probeta de viga curva de material compuesto, analizando la propagación de grietas mediante un enfoque experimental y numérico basado en la técnica de cierre virtual de grieta (VCCT). Se estudia una probeta de viga curva fabricada con fibras de carbono y resina epoxi, en la que se incorpora una capa de teflón intermedia que actúa como una grieta preexistente, y se somete a cargas a flexión en cuatro puntos según la norma ASTM D6415. Se integran ensayos experimentales con simulaciones de elementos finitos (FEM) en Abaqus 2024 para modelar la propagación de grietas. Esta combinación permite correlar los resultados experimentales y numéricos, validando la precisión del modelo y demostrando la fiabilidad de los métodos de simulación para predecir el comportamiento estructural de los materiales compuestos.

ABSTRACT

This project focuses on the study of the fracture behavior of a curved composite beam, analyzing crack propagation through an experimental and numerical approach based on the Virtual Crack Closure Technique (VCCT). The study involves a curved beam specimen made of carbon fibers and epoxy resin, incorporating an intermediate Teflon layer that acts as a pre-existing crack, and subjected to four-point bending loads following the ASTM D6415 standard. Experimental tests are integrated with finite element simulations (FEM) in Abaqus 2024 to model crack propagation. This combination enables the correlation of experimental and numerical results, validating the model's accuracy and demonstrating the reliability of simulation methods for predicting the structural behavior of composite materials.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Relación del proyecto con los ODS	9
1.2	Objeto y alcance	11
2	MECÁNICA DE LA FRACTURA	13
2.1	Introducción	13
2.2	Fundamentos	13
2.3	Mecánica de la fractura elástico-lineal (LEFM)	15
3	MATERIALES COMPUESTOS	18
3.1	Fibra de carbono	19
3.2	Resinas epoxi	20
4	ENSAYO EXPERIMENTAL	21
4.1	Introducción	21
4.2	Normativa ASTM D6415	21
4.3	Propuesta de la configuración del ensayo	23
4.4	Fabricación de probetas	25
4.5	Configuración del ensayo	26
5	MODELO NUMÉRICO	29
5.1	Introducción	29
5.2	Descripción del modelo de elementos finitos	30
5.2.1	Geometría	30
5.2.2	Mallado	31
5.2.3	Material	33
5.2.4	Cargas y condiciones de contorno	35
5.2.5	Modelado de la grieta mediante par de contacto y propiedades de fractura en su interacción	37
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
6.1	Análisis experimental	40
6.1.1	Resultados	40

6.2	Análisis numérico	46
6.2.1	Resultados tensionales.....	46
6.2.2	Resultados en el campo de desplazamientos	49
6.2.3	Resultados de la curva fuerzas-desplazamiento	51
6.2.4	Resultados de la correlación fuerza-desplazamiento entre el ensayo experimental y el modelo numérico	53
6.2.5	Análisis de la propagación grieta.....	55
6.2.6	Resultados de la correlación longitud de grieta-desplazamiento entre el ensayo experimental y el modelo numérico.	57
6.2.7	Análisis de la tasa de liberación de energía de deformación y modos de fractura..	59
7	CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	63
8	BIBLIOGRAFÍA	65
	ANEXOS	68
	ANEXO A. Tablas de resultados del análisis numérico	68
	ANEXO B. Implementación modelado de grieta con VCCT en Abaqus (Interactions)	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.	9
Figura 2. Teoría de Griffith [9].	13
Figura 3. Modos de carga de una grieta.	14
Figura 4. Relación entre la tasa crítica equivalente de liberación de energía (GC) y el ratio de modo mixto (GII/GT).	16
Figura 5. Matriz y refuerzo materiales compuestos [13].	18
Figura 6. Tela con fibra de carbono.	19
Figura 7. Geometría de la probeta del ensayo.....	22
Figura 8. Viga curva a flexión a cuatro puntos.	23
Figura 9. Configuración de la probeta con teflón de 15 mm descentrado en el ala derecha y frentes de grieta en las alas izquierda y derecha.	24
Figura 10. Utillaje y probeta de fibra de carbono con resina epoxi.	25
Figura 11. Máquina universal de ensayos y utillaje de acuerdo con la norma ASTM D6415, de izquierda a derecha.....	26

Figura 12. Izqda.-Foco luz fría, drcha. Cámara CCD 5Mpx Monitorización.....	26
Figura 13. Correlación Sigma (α)- Vic-2D-2009.....	27
Figura 14. Correlación desplazamientos horizontales, U- Vic-2D-2009.....	28
Figura 15. Correlación desplazamientos verticales, V Vic-2D-2009.	28
Figura 16. Geometría de viga curva y detalle del contacto de un rodillo superior con la probeta.	31
Figura 17. Elemento CPE4I.	32
Figura 18. Malla y tres detalles de malla en las zonas de estudio.....	33
Figura 19. Representación propiedades elásticas material ortotrópico.....	34
Figura 20. Matriz rigidez ortotrópica.....	35
Figura 21. Valores matriz rigidez en Abaqus 2024.	35
Figura 22. Cargas y condiciones de contorno.....	36
Figura 23. Técnica de cierre virtual de grietas para elementos 2D de 4 nodos [20].....	38
Figura 24. Gráfica fuerza-desplazamiento probeta sin teflón en el ensayo experimental.	40
Figura 25. Longitud de grieta y fuerza respecto el número de imágenes en la Prueba experimental 1.....	41
Figura 26. Fuerza normalizada con el espesor respecto desplazamiento Prueba 1 Experimental.	42
Figura 27. Longitud de grieta respecto desplazamiento Prueba 1 Experimental.....	42
Figura 28. Inicio propagación grieta parte curva Prueba experimental 1.	43
Figura 29. Longitud de grieta y fuerza Prueba experimental 2.....	43
Figura 30. Fuerza normalizada con el espesor respecto desplazamiento Prueba 2 Experimental.	44
Figura 31. Longitud de grieta respecto desplazamiento Prueba 2 Experimental.....	44
Figura 32. Inicio propagación grieta parte curva Prueba experimental 2.	45
Figura 33. Grieta total Prueba experimental 2.	45
Figura 34. Tensión en la dirección de las fibras, S11, en el inicio de la propagación de la grieta.	46
Figura 35. Tensión en la dirección de las fibras, S11, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.	47
Figura 36. Tensión en la dirección de las fibras, S22, en el inicio de la propagación de la grieta.	48
Figura 37. Tensión en la dirección de las fibras, S22, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.	48
Figura 38. Desplazamiento vertical, U2, en el inicio de la propagación de la grieta.....	49
Figura 39. Desplazamiento vertical, U2, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.	50

Figura 40. Desplazamiento horizontal, U_1 , en el inicio de la propagación de la grieta.	50
Figura 41. Desplazamiento horizontal, U_1 , cuando la propagación de la grieta es de 5mm.	51
Figura 42. Curva fuerza vs. Desplazamiento y fuerza normalizada con el espesor vs. desplazamiento, de izquierda a derecha, para la probeta sin teflón.	51
Figura 43. Curva fuerza vs. Desplazamiento y fuerza normalizada con el espesor vs. desplazamiento, de izquierda a derecha, para la probeta con teflón de 15 mm descentrado.	52
Figura 44. Comparativa fuerza-desplazamiento para la probeta sin teflón.	54
Figura 45. Curva fuerza-desplazamiento para la probeta con teflón de 15mm descentrado.	55
Figura 46. Evolución grieta.	56
Figura 47. Longitud de grieta (a) frente desplazamiento.	57
Figura 48. Comparativa longitud de grieta respecto al desplazamiento teflón 15 mm descentrado.	57
Figura 49. Representación frentes de grieta ala derecha y ala izquierda.	59
Figura 50. Tasa de liberación de energía de deformación en modo I, modo II y equivalente, frente a la longitud de grieta para el ala izquierda.	60
Figura 51. Tasa de liberación de energía de deformación equivalente frente al ratio modo mixto.	61
Figura 52. Tangencial Behavior.	72
Figura 53. Normal Behavior	72
Figura 54. Fracture Criterion.	73
Figura 55. Geometric Properties.	74
Figura 56. Interacción entre las superficies de contacto.	75
Figura 57. Creación de la grieta.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros utilizados en el modelo de fractura	17
Tabla 2. Dimensiones de acuerdo con la norma ASTM D6415 en comparación con los considerados en las probetas	24
Tabla 3. Propiedades del material compuesto utilizado en la simulación.	34
Tabla 4. Desplazamiento y rotación rodillos	36

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo y auge de los materiales compuestos surge en el siglo XX, impulsado por su creciente uso en sectores como la automoción, la construcción, la electrónica y las energías renovables. Sin embargo, su aplicación principal es en el sector aeroespacial, donde son empleados principalmente con fines estructurales. Este sector, demanda materiales con propiedades específicas que cumplan rigurosos criterios de seguridad, eficiencia y rendimiento, requisitos que los materiales compuestos satisfacen gracias a su ligereza, alta resistencia, durabilidad, elevada rigidez y buena versatilidad. Actualmente, los últimos modelos de aviones tienen un elevado porcentaje en peso de materiales compuestos, desplazando materiales tradicionales como el acero o el aluminio [1].

Los materiales compuestos están formados por una matriz y un refuerzo, permitiendo ajustar sus propiedades variando la orientación de las fibras o la composición de la matriz. En aplicaciones con altos requerimientos estructurales de rigidez y resistencia, el material compuesto más utilizado es la combinación de fibra de carbono y resina epoxi, destacando la fibra de carbono preimpregnada con resina por su facilidad de uso y gran precisión. Sin embargo, a pesar de sus excelentes propiedades en la dirección de las fibras, son más débiles cuando se aplican esfuerzos fuera del plano, lo que puede llevar a la aparición de grietas, deformaciones o incluso delaminación [2].

La delaminación ocurre cuando las capas que conforman el laminado se separan debido a cargas fuera del plano, impactos o fatiga. Este fenómeno es uno de los modos de falla más comunes en materiales compuestos. Es especialmente crítico por su complejidad de análisis y las graves consecuencias que implica para el desempeño estructural [3]. Este trabajo se centra en el análisis de la propagación de una grieta preexistente entre capas del material compuesto.

El estudio de la aparición y propagación de grietas en materiales compuestos representa un área de investigación crucial y con muchos aspectos por resolver. Es un tema que plantea grandes retos tanto en su análisis experimental como en su modelización numérica, por lo que se necesita profundizar en este campo para avanzar en el diseño y optimización. Aunque las herramientas actuales de cálculo numérico permiten determinar las propiedades esenciales para analizar la propagación de la grieta, es evidente que la investigación en este campo debe continuar, con el objetivo de desarrollar métodos más precisos y eficaces. Desde los primeros estudios de Irwin [4] y Griffith [5], quienes asentaron las bases de la mecánica de fractura, se ha continuado evolucionando con el

objetivo de controlar y predecir el comportamiento de las grietas. Por ejemplo, trabajos recientes como el de Ranz [2], han empleado elementos cohesivos para modelar su propagación.

Sin embargo, este trabajo opta por un enfoque alternativo, la técnica de Cierre Virtual de Grieta, en inglés, Virtual Crack Closure Technique (VCCT). El estudio se centra en el estudio a fractura de una probeta de viga curva fabricada con material compuesto y con una grieta preexistente en la capa central, la cual ha sido sometida a ensayos de flexión en cuatro puntos. Para ello, se han realizado tanto ensayos experimentales como simulaciones numéricas utilizando el método VCCT en el software Abaqus 2024. Este trabajo se ha llevado a cabo en el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA), constituyendo un avance científico y estratégico que, a su vez, fortalece su capacidad para abordar futuros proyectos relacionados con la fractura en materiales compuestos.

1.1 Relación del proyecto con los ODS

ODS son las siglas de Objetivos de Desarrollo Sostenible. Son un conjunto de 17 objetivos globales adoptados en 2015 por los Estados miembros de las Naciones Unidas como parte de la agenda de 2030 para el Desarrollo Sostenible [6]. Los 17 ODS mostrados en la Figura 1 abordan una amplia gama de cuestiones interconectadas, que incluyen la producción y consumo responsables, la promoción de la prosperidad económica, la acción climática, la innovación industrial, entre otros.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Incorporar estos objetivos y tenerlos en cuenta es esencial para garantizar un impacto positivo en la sociedad, la economía y el medioambiente, abordando desafíos globales de manera inclusiva y sostenible, contribuyendo a la creación de soluciones que no solo generan valor inmediato, sino que también promueven el bienestar a largo plazo.

Cada objetivo se desglosa en unas metas específicas y se establecen indicadores para medir el progreso hacia su cumplimiento. Este trabajo está relacionado con varios de estos ODS como:

ODS 9. Industria, Innovación e Infraestructura

El diseño de materiales compuestos para aplicaciones estructurales contribuye a la innovación tecnológica desarrollando infraestructuras sostenibles además de fomentar la industrialización avanzada

ODS 9.4. *Modernizar infraestructuras y reconvertir industrias para que sean sostenibles.* Se contribuye directamente al desarrollo de tecnologías más limpias y procesos industriales eficientes al investigar cómo optimizar materiales compuestos.

ODS 9.5. Incrementar la investigación científica y la capacidad tecnológica. El uso de modelos Finite Element Methods (FEM) y técnicas avanzadas como la Técnica de cierre virtual de grieta (VCCT) representa un avance en el conocimiento aplicado en la ingeniería de materiales.

ODS 12. Producción y consumo sostenible

Los materiales compuestos implican altos costes energéticos y de materiales en su producción. Por lo que su estudio, reduce el uso innecesario de recursos y prolonga la vida útil de los productos fabricados.

ODS 12.5. Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. Al diseñar estructuras más eficientes usando métodos numéricos, se requiere menos material para la fabricación y, por lo tanto, disminuye los desechos generados

ODS 12.a. Ayudar a fortalecer la capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades sostenibles de consumo y producción. El uso de FEM para optimizar el diseño de materiales compuestos fortalece la capacidad científica y tecnológica y las prácticas de producción más sostenibles.

ODS 13. Acción por el clima

ODS 13.3 Mejorar la educación y la capacidad humana e institucional respecto a la mitigación del cambio climático. Los materiales compuestos contribuyen a la reducción de emisiones y permite estructuras más eficientes.

ODS 17. Alianza para lograr los Objetivos

La colaboración entre investigadores y autoridades locales, tal como se menciona en el desarrollo y la implementación de este estudio, refleja la importancia de las alianzas para alcanzar objetivos comunes.

Estos ODS son reflejados en el proyecto a través de la utilización de tecnologías avanzadas y metodologías detalladas, como el modelado FEM y la validación experimental, que optimizan el diseño de materiales compuestos, reduciendo residuos y promoviendo soluciones más sostenibles en la industria.

1.2 Objeto y alcance

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento a fractura de una probeta de viga curva de material compuesto, centrándose en la propagación de grietas mediante la técnica de Cierre Virtual de Grieta (VCCT). Dentro de este marco se plantean los siguientes objetivos:

- Diseñar y ejecutar ensayos experimentales en probetas de material compuesto sometidas a flexión en cuatro puntos, tal y como se describe en la normativa ASTM D6415 [7]. Adicionalmente, se propone incluir teflón en la probeta a modo de iniciador de grieta para evaluar y analizar la propagación de grieta.
- Monitorear y analizar la propagación de grietas, utilizando técnicas de adquisición de imágenes.
- Desarrollar un modelo de elementos finitos en Abaqus basado en el método VCCT para simular la propagación de grietas reproduciendo las condiciones de los ensayos experimentales.
- Evaluar la tasa de liberación de energía de deformación en modo I y modo II de la grieta, así como las tensiones inducidas por la geometría curva, para determinar cuándo y cómo se producen las grietas.
- Establecer una correlación entre los datos experimentales y los resultados numéricos, validando la precisión y fiabilidad del modelo de simulación. Para la validación se analizarán todos los resultados clave, como fuerzas, tensiones, propagación de grieta y resultados relacionados con la mecánica de fractura.

Para alcanzar los objetivos planteados, el trabajo se ha realizado siguiendo las siguientes etapas:

Inicialmente se fabricaron las probetas de viga curvas de fibra de carbono y resina epoxi incorporando un teflón de 15 mm descentrado en el ala derecha para recrear una grieta preexistente. Estas probetas se ensayan en una máquina universal de ensayos, adaptando la configuración a las características del material y la geometría curva, de acuerdo con la normativa ASTM D6415. Durante los ensayos, se monitorean los datos de fuerzas y desplazamientos con una máquina universal de ensayos y la propagación de la grieta con el DIC (correlación digital de imágenes).

Una vez caracterizado el comportamiento de la probeta a nivel experimental, se desarrollará un modelo numérico con el paquete de cálculo Abaqus 2024, empleando el método de elementos finitos. En este modelo se consideran las propiedades específicas del material y su geometría curva, se utiliza un mallado refinado y se simula la grieta mediante la Técnica de Cierre Virtual de Grieta o más comúnmente en inglés, Virtual Crack Closure Technique (VCCT). Posteriormente, los datos numéricos y experimentales se recogen y procesan en Excel para analizar los resultados y realizar las gráficas fuerza-desplazamiento, longitud de grieta- desplazamiento, modo de fractura-longitud de grieta y modo de fractura equivalente-ratio modo mixto. Además, se analizarán las tensiones, desplazamientos, fuerzas y propagación de grieta del modelo numérico. También se estudiarán los modos de fractura.

Finalmente, una vez obtenidos los datos experimentales y numéricos, se lleva a cabo su correlación para validar la precisión y fiabilidad del modelo de simulación. Esta comparación se realiza mediante gráficos realizados en Excel que permiten analizar y contrastar los resultados, asegurando la coherencia entre las simulaciones numéricas y los ensayos experimentales.

2 MECÁNICA DE LA FRACTURA

2.1 Introducción

La mecánica de fractura es una rama de la mecánica de sólidos deformables que estudia la estabilidad estructural de los materiales. Ésta se ocupa de los problemas de propagación de grietas bajo la influencia de tensiones y su relación con las propiedades mecánicas y la estructura del material “Irwin [4]”. Es decir, estudia cómo y porque se rompen los materiales bajo cargas.

Es crucial para predecir fallas en estructuras críticas, como puentes o aviones. Surgió de estudios de Griffith [5] sobre grietas en vidrio y se consolidó con aplicaciones prácticas en la ingeniería durante el siglo XX. Su relevancia se debe a que, incluso pequeños defectos en materiales pueden provocar fallas catastróficas.

La Mecánica de Fractura busca diseñar componentes que resistan estas fallas y definir límites de seguridad. Comprenderla es esencial para prevenir accidentes e innovar en materiales más resistentes [8].

2.2 Fundamentos

El análisis de fractura se basa en dos conceptos: concentración de tensiones y energía de deformación. Según la teoría de Griffith, tal y como se ilustra en la Figura 2, la existencia de microfisuras (grietas) reduce la energía total del sistema al liberar energía elástica almacenada por lo que produce un efecto de concentración de tensiones, de modo que la tensión efectiva es muy superior a la impuesta. Esto puede llevar a una fractura si esta energía supera la resistencia del material [9]. Westergaard amplió este marco al introducir el factor de intensidad de tensiones (K), describiendo cómo las tensiones se concentran en las puntas de las grietas. Estos conceptos básicos pueden predecir cuándo una grieta se propaga.

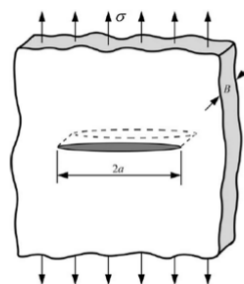


Figura 2. Teoría de Griffith [9].

La fractura puede variar dependiendo del material, ya que pueden fracturarse de forma frágil o dúctil. La fractura dúctil ocurre lentamente con deformación plástica significativa, típica en metales como el acero, en cambio, la fractura frágil es rápida y sin deformación plástica, común en vidrio o cerámica. En el caso de estudio, los materiales compuestos sufren una fractura frágil.

La fractura también se puede clasificar en los modos de carga que puede presentar una grieta, como se muestra en la Figura 3:

- **Modo I:** Las caras de la grieta se abren (tensiones normales a la superficie de la grieta)
- **Modo II:** Las caras de la grieta se deslizan una sobre otra (cortadura en el plano)
- **Modo III:** Las caras de la grieta se desgarran o cortan (cortadura fuera del plano)

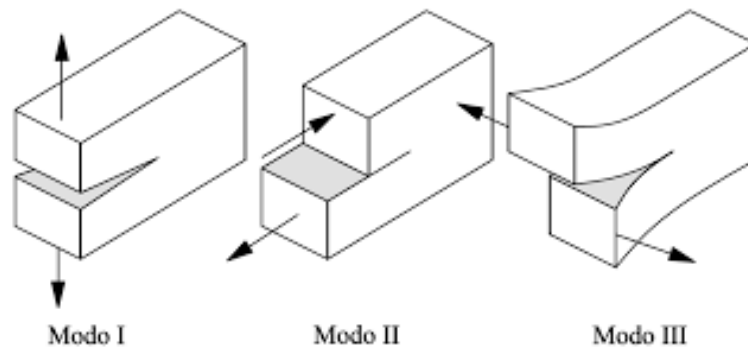


Figura 3. Modos de carga de una grieta.

Cuando una grieta experimenta una combinación de los tres modos básicos de deformación, ocurre el modo mixto. Esto sucede cuando las cargas no están perfectamente alineadas con la grieta, generando tensiones complejas en su punta. En el modo mixto, la grieta puede cambiar de trayectoria para minimizar tensiones.

En general, la mecánica de fractura, especialmente en metales y materiales compuestos, se desarrolla en tres etapas principales:

- (i) Iniciación o nucleación de grieta
- (ii) Propagación de la delaminación
- (iii) Crecimiento rápido o inestable de la grieta

En este trabajo, se centra el análisis en la segunda etapa, debido a la presencia de una grieta preexistente, por lo que la nucleación ya ha ocurrido y no se considera ni la posible nucleación ni la posterior delaminación en otras capas.

2.3 Mecánica de la fractura elástico-lineal (LEFM)

La mecánica lineal-elástica de fractura es una teoría que estudia el comportamiento de materiales con grietas, asumiendo que estos son linealmente elásticos, es decir, se deforman proporcionalmente a las tensiones aplicadas, como este caso de estudio.

Surgió a partir de los trabajos de Irwin, quien mostró que las tensiones en la punta de una grieta se concentran y pueden llegar a valores infinitos (singularidad) cuando el radio de la punta tiende a cero. Griffith continuó los estudios de Irwin, ya que ningún material puede soportar un valor de tensión infinita sin romperse. Él desarrolló una teoría basada en la energía según la cual, para que una grieta aumente, la energía potencial de la fuerza aplicada debe superar la energía superficial del material. Tiene que haber equilibrio entre la energía elástica almacenada que disminuye y el aumento de la superficie total por formación de la grieta.

La grieta existente crecerá y se producirá una fractura si la energía requerida para propagar la grieta (suma del trabajo desarrollado por la tensión aplicada y la energía elástica liberada al extenderse la grieta) puede ser suministrada por el sistema.

En este trabajo, el enfoque de la mecánica de fractura se centrará en el criterio energético. El enfoque energético se centra en la posibilidad de que una grieta crezca cuando la energía disponible para su crecimiento es suficiente para vencer la resistencia del material. La tasa de liberación de energía de deformación G , se define como el cambio en la energía potencial de un área cerca a la grieta para materiales elástico-lineales. En el momento de la fractura $G=G_c$, tasa de liberación de energía crítica, la cual es la medida de la tenacidad de fractura. La tasa de liberación de energía de deformación viene dada por

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (1)$$

donde W es el trabajo externo, U es la energía elástica almacenada y A el área de la grieta.

Para realizar correctamente el análisis de los diferentes modos de fractura y mejorar la precisión de las predicciones en los materiales compuestos, autores como Benzeggagh y Kenane [10], han propuesto un criterio denominado frecuentemente como criterio B-K. Para su análisis, se emplean Ec. (2) y Ec. (3), las cuales expresan la tasa de liberación de

energía de deformación crítica equivalente G_C como una función entre la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I y el modo II:

$$G_C = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) * \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_{III}} \right)^\eta \quad (2)$$

$$G_T = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (3)$$

En donde G_C es la tasa de liberación de energía de deformación crítica equivalente (valor necesario para que ocurra la propagación de la grieta bajo una combinación de modos de fractura), G_T es la tasa de liberación de energía total (representa la cantidad total de energía por unidad de área liberada durante la propagación de una grieta, debido a todos los modos de fractura presentes (G_I , G_{II} y G_{III})) y η es un parámetro empírico que define la forma en que los modos de fractura interactúan, ajustando la resistencia al crecimiento de la grieta en materiales compuestos en el modelo BK.

Con la intención de visualizar la dependencia de la tasa crítica equivalente de liberación de energía (G_C) respecto al ratio de modo mixto (G_{II}/G_T) se emplea la Figura 4 para ver cómo G_C cambia a medida que la proporción de energía liberada en modo II aumenta respecto a la energía total G_T . G_{II}/G_T varía entre 0 y 1, siendo $G_{II}/G_T = 0$ cuando la fractura es puramente en modo I y $G_{II}/G_T = 1$ cuando la fractura es puramente modo II y los valores intermedios representan fractura en modo mixto.

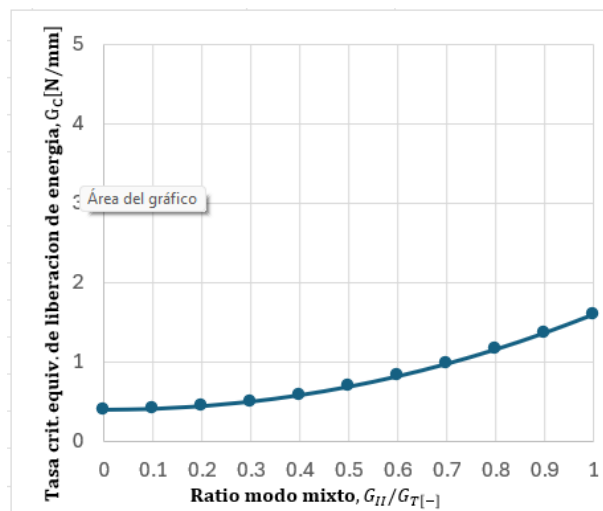


Figura 4. Relación entre la tasa crítica equivalente de liberación de energía (G_C) y el ratio de modo mixto (G_{II}/G_T).

Los siguientes valores han sido obtenidos experimentalmente en los ensayos del ITA:

	Símbolo	Valor	Unidad
<i>Energía crítica Modo I</i>	G_{IC}	0.4	[N/mm]
<i>Energía crítica Modo II</i>	G_{IIC}	1.6	[N/mm]
<i>Energía crítica Modo III</i>	G_{IIIC}	1.6	[N/mm]
<i>Parámetro interpolación B-K</i>	η	2.051	[-]

Tabla 1. Parámetros utilizados en el modelo de fractura.

En la Figura 4, cuando la tasa equivalente de liberación de energía del punto de la grieta modelado mediante un nodo (G_{equiv}) excede el valor crítico (G_C) representado por la curva, se produce la propagación de la grieta. Esto se debe a que la energía es suficiente para superar la resistencia del material al avance de la grieta. En cambio, cuando G_{equiv} está por debajo de G_C , la grieta no se propaga.

3 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por la combinación de dos o más materiales con el objetivo de aprovechar las propiedades de cada uno de ellos para obtener un producto con características superiores a las de los materiales originales.

Normalmente, un material compuesto consta de dos fases; una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo, tal y como se muestra en la Figura 5. La matriz une y protege al refuerzo, proporcionando cohesión y distribuyendo las cargas, mientras que el refuerzo (fibras o partículas) proporciona la resistencia y rigidez mejorando sus propiedades mecánicas.

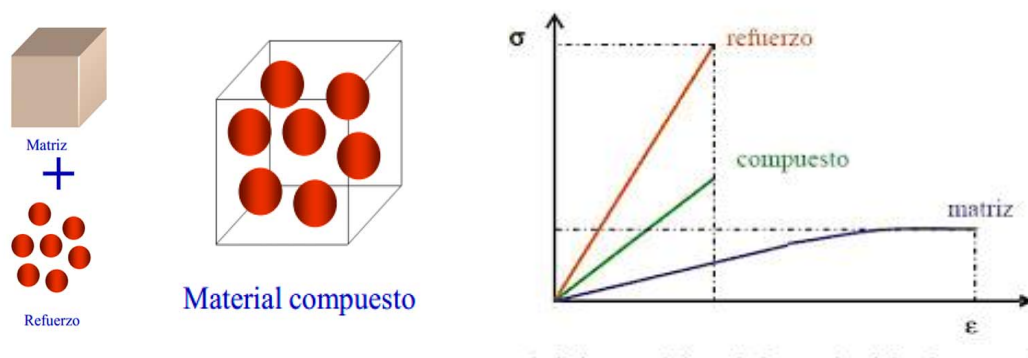


Figura 5. Matriz y refuerzo materiales compuestos [13].

Los refuerzos pueden clasificarse según su geometría en partículas o fibras. Los materiales compuestos reforzados con partículas tienen un menor coste económico, aunque las propiedades mecánicas conseguidas son menores que en el caso de materiales reforzados con fibras. Por ello, en sectores como la aeronáutica, se priorizan las propiedades mecánicas óptimas, por lo que los materiales reforzados con fibras son los más empleados. Existen diversos factores que contribuyen al comportamiento de un material compuesto reforzado con fibra, como la longitud de fibra (cortas o largas), la orientación de las fibras, la forma de la sección o el material. Las más utilizadas en la industria son las fibras de carbono, de vidrio, de boro y de aramida.

De forma general, los refuerzos con fibra no se aplican por sí solos, debido a que no pueden soportar esfuerzos de compresión ni esfuerzos transversales. Por lo tanto, es necesario el uso de una matriz para mantener las fibras o partículas unidas, protegerlas de condiciones externas y transferir las cargas externas de unas fibras a otras.

Las matrices pueden ser poliméricas, metálicas o cerámicas, siendo las matrices poliméricas las más utilizadas en la industria. Estas pueden ser de origen termoplástico o

de origen termoestable. Las matrices más utilizadas de base polimérica termoestable son epoxi, vinil éster y poliéster [9] .

3.1 Fibra de carbono

La fibra de carbono es un refuerzo aplicado de forma muy habitual en la industria aeronáutica, entre las que destacan la resistencia, la flexibilidad y la ligereza. La fibra de carbono permite la fabricación de piezas reduciendo su peso sin comprometer su rigidez ni su resistencia mecánica. Se aprovecha su elasticidad y fortaleza ante factores externos que le permite conservar su estructura bajo cambios bruscos de temperatura.

Entre las propiedades de la fibra de carbono destacan [15] :

- Alta resistencia mecánica, tenacidad y densidad
- Resistencia térmica
- Estabilidad dimensional (logra conservar su forma)
- Conductividad térmica y eléctrica
- Resistencia química
- Resistencia a la corrosión y a la fatiga

Es importante destacar que, dependiendo de la orientación del tejido, como puede observarse en la Figura 6, la tela de carbono puede ser más fuerte en una dirección determinada o igual en todas sus direcciones. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando se disponen en la dirección de las tensiones. Por esta razón, una pequeña pieza puede soportar el impacto de muchas toneladas y deformarse mínimamente. De ahí la importancia en la elección del número y orientación de las fibras que forman el tejido para obtener una rigidez y resistencia que cumpla los requisitos deseados en la aplicación [16].



Figura 6. Tela con fibra de carbono.

3.2 Resinas epoxi

La resina epoxi es un producto obtenido del petróleo, que se presenta como sólido o líquido viscoso sin propiedades mecánicas destacables. Sin embargo, al reaccionar con agentes de curado, se transforma en un polímero termoestable con una estructura reticulada e insoluble, ofreciendo alta resistencia a ácidos y disolventes, además de excelentes propiedades mecánicas.

Actualmente, las resinas epoxi son las más utilizadas debido a su gran estabilidad a altas prestaciones con una temperatura máxima de servicio de unos 170°C. A pesar de ser más costosa que otras matrices poliméricas, más de dos tercios de las matrices poliméricas empleadas en la industria aeronáutica son de este tipo, debido a sus propiedades [14] :

- Excelentes propiedades mecánicas y térmicas
- Buen aislamiento eléctrico
- Buena resistencia a la humedad
- Elevada resistencia química
- Alta impregnación en los refuerzos de fibra, debido a su baja viscosidad
- Capacidad de obtener piezas de difícil acabado sin tener un coste muy elevado
- Gran versatilidad, pudiendo variar los parámetros de fabricación para adaptar la resina a la aplicación deseada.

4 ENSAYO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

El ensayo experimental consiste en determinar la propagación de una grieta preexistente en una probeta de viga curva de material compuesto reforzado con fibras continuas utilizando una muestra de viga curvada a 90°. La viga curvada consta de dos patas o alas rectas conectadas por una curva de 90° con un radio interior de 10mm. En ella, se produce una tensión de tracción fuera del plano (a través del espesor) en la región curva del modelo cuando se aplica carga.

En este trabajo, se ha realizado el ensayo con una máquina universal de ensayos de forma similar a como se describe en la normativa internacional ASTM D6415. Sin embargo, a diferencia de como se describe en la norma, en esta ocasión se ha colocado un teflón en la probeta que actúa emulando una grieta. De esta forma, se puede observar la propagación de la grieta, con el objetivo de analizarla de manera controlada. Además, se se ha explicado la fabricación de las probetas de material compuesto y la disposición del ensayo. Para la monitorización del ensayo se usan los sensores de fuerza y desplazamiento de la máquina junto con un sistema de adquisición basado en imágenes, denominado DIC.

Se ha colaborado en la definición del ensayo experimental, y se ha asistido a la ejecución de los ensayos realizados por parte de técnicos expertos del ITA, así como la fabricación y preparación de las probetas. Los datos obtenidos en los ensayos experimentales son necesarios para la posterior correlación con los datos numéricos y comprobar el correcto funcionamiento del modelo.

4.2 Normativa ASTM D6415

El ensayo más implantado y la norma que mejor rige nuestro modelo es la ASTM D6415 [7]. Este método de prueba determina la resistencia a la flexión en una viga curva de material compuesto reforzado con fibras continuas utilizando una muestra de viga curva de 90°, como se muestra en la Figura 7. La viga consta de dos patas rectas conectadas por una curva de 90° con un radio interno de 6,4 mm. Se genera un esfuerzo de tracción fuera del plano (a través del espesor) en la región curva de la muestra cuando se aplica fuerza. Este método de prueba está limitado al uso con compuestos formados por capas de tejidos o capas de fibras unidireccionales.

La geometría de la probeta a ensayar es la presentada en la Figura 7:

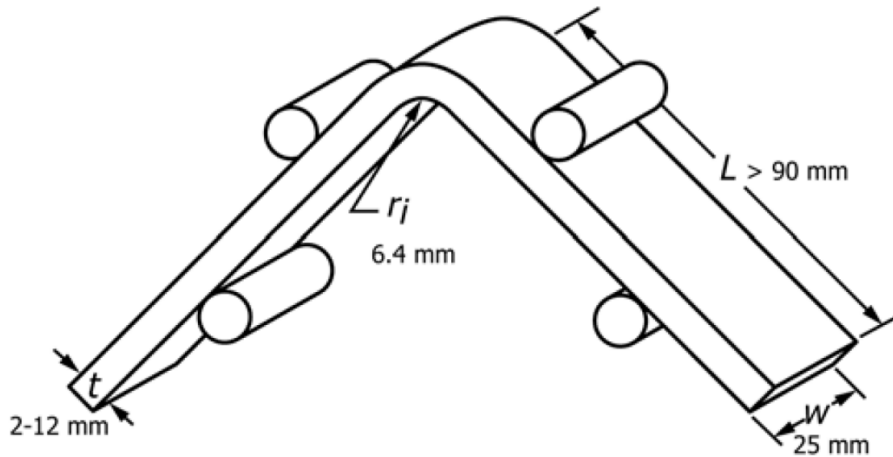


Figura 7. Geometría de la probeta del ensayo.

La normativa exige una serie de restricciones:

- Ángulo de los brazos: $\alpha = 90 \pm 3^\circ$
- Ancho: $W = 25 \pm 1 \text{ mm}$
- Radio interior: $r_i = 6,4 \pm 0,2 \text{ mm}$
- Espesor: $t = 2 \div 12 \text{ mm}$
- Longitud patas: $L > 50 \text{ mm}$

Esta normativa también describe la disposición del utillaje, es decir, la posición y dimensiones de los rodillos y la aplicación de la carga, como se muestra en la Figura 8:

- Distancia rodillos inferiores: $l_b = 75 \pm 2 \text{ mm}$
- Distancia rodillos superiores: $l_t = 100 \pm 2 \text{ mm}$
- Diámetro rodillos: $D = 6 \div 10 \text{ mm}$

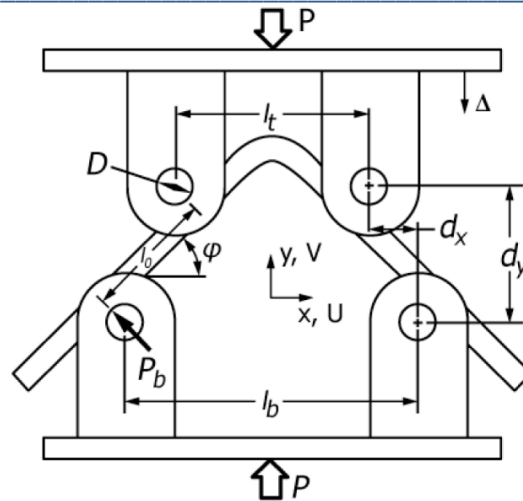


Figura 8. Viga curva a flexión a cuatro puntos.

4.3 Propuesta de la configuración del ensayo

La normativa ASTM D6415 se utiliza para medir la resistencia a la flexión en estructuras curvas en materiales compuestos, es decir, el objetivo de la norma es calcular la tensión máxima de la probeta para que no se produzca de ninguna manera una grieta, pero no aborda aspectos respecto a la propagación de la grieta.

Durante el ensayo, las grietas pueden formarse debido a la concentración de tensiones en la curvatura de la muestra. Estas tensiones pueden superar la capacidad del material para resistir la delaminación o fractura interna. Por lo tanto, este trabajo de investigación va más allá de la norma, al analizar y calcular la propagación de grietas. De este modo, se podría prever cómo y en qué medida propagarán.

Como se ha comentado, también trasciende lo establecido en la norma implementando el uso de teflones. Un teflón es una tira de material de unas pocas micras de espesor que se coloca entre las capas del material durante la fabricación para simular imperfecciones como grietas, poros, etc. El objetivo es examinar la probeta y observar cómo avanza la grieta cuando existen, inicialmente, estas imperfecciones.

La norma establece la geometría tanto de la probeta como del utillaje con sus respectivas tolerancias, pero, en este trabajo, se varían algunos de estos parámetros. Por un lado, el ancho (W) de la probeta experimental varía entre 20 mm y 25 mm dependiendo de la fabricación. Posteriormente, las fuerzas serán normalizadas dividiéndolas entre el ancho. Por otro lado, el radio interior de acuerdo con la norma es 6.4 mm, mientras que las probetas empleadas se han fabricado con un radio interior de 10mm. El resto de los

parámetros se han considerado de acuerdo con la norma, como puede observarse en el resumen que aparece en la Tabla 2.

	Normativa ASTM D6415	Probeta experimental
Angulo brazos (α) °	90 ± 3	90
Ancho (W) mm	25 ± 1	20÷25
Radio interior(r_i) mm	$6,4 \pm 0,2$	10
Espesor (t) mm	$2 \div 12$	3.66
Longitud patas (L) mm	> 50	100
Distancia rodillos inferiores(l_b) mm	75 ± 2	75
Distancia rodillos superiores(l_t) mm	100 ± 2	100
Diámetro rodillos (D) mm	$6 \div 10$	9.5

Tabla 2. Dimensiones de acuerdo con la norma ASTM D6415 en comparación con los considerados en las probetas.

En la Figura 9 se muestra la configuración del modelo, en la que se incorpora un teflón de 15 mm descentrado en el ala derecha. La introducción del teflón en la probeta produce la aparición de dos frentes de grieta, en los extremos de esta. A lo largo del ensayo se analizará cómo evolucionan estos frentes de grieta.

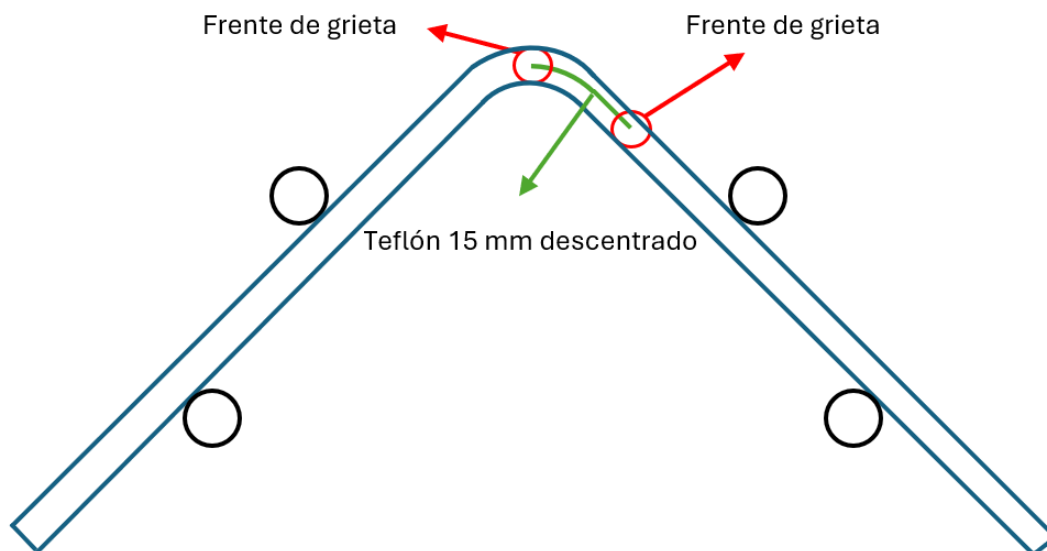


Figura 9. Configuración de la probeta con teflón de 15 mm descentrado en el ala derecha y frentes de grieta en las alas izquierda y derecha.

4.4 Fabricación de probetas

Las probetas se fabrican utilizando material compuesto, específicamente fibra de carbono y resina epoxi. Por su facilidad de uso y precisión, se ha utilizado cinta de fibra de carbono preimpregnada con resina epoxi, método comúnmente utilizado en el ámbito aeronáutico.

La fabricación de la probeta requiere un utillaje adecuado, diseñado para disponer las láminas de fibra de carbono en un ángulo de 90° y con un radio interior de 10 mm. El utillaje empleado y el resultado final de la fabricación se observa en la Figura 10:

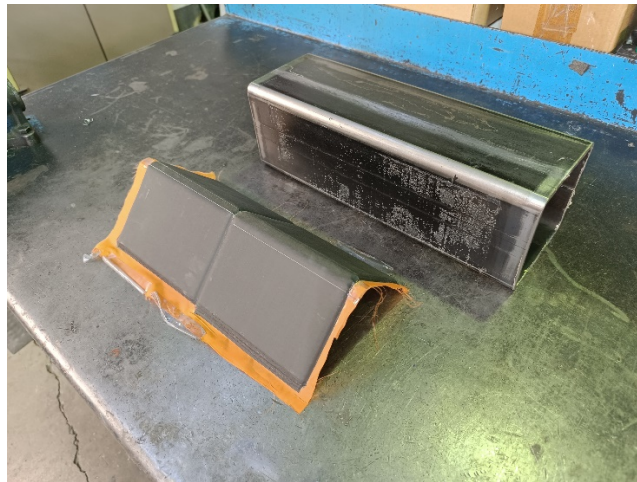


Figura 10. Utillaje y probeta de fibra de carbono con resina epoxi.

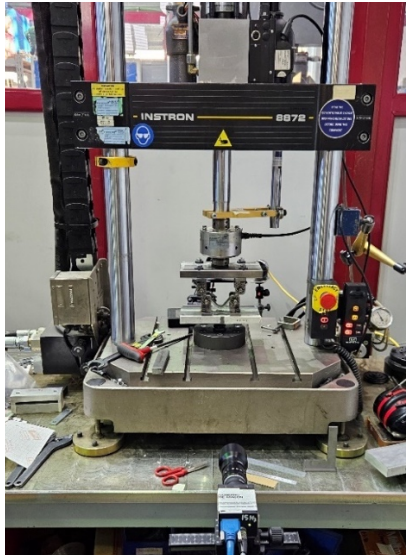
El proceso de fabricación del laminado comienza con la colocación de una capa de peel-ply (material naranja) que aporta rugosidad, dando el acabado deseado a la superficie de la pieza. Sobre esta se colocan 10 capas de fibra de carbono, adheridas entre sí gracias al preimpregnado. Posteriormente, se incorpora una película de teflón de 13 μ m y una longitud de 15mm. Este material, al no adherirse a las fibras de carbono, simula una grieta preexistente, que es lo que realmente se busca. Finalmente, se añaden otras 10 capas de fibra de carbono y una última capa de peel-ply, asegurando un buen acabado.

Una vez apiladas las fibras correctamente, se realiza el proceso de vacío, donde la probeta se sella dentro de una bolsa de vacío y se somete a presión, asegurando una compactación uniforme antes del curado. Posteriormente, el curado se realiza en un horno a 180°C durante un periodo de 2 horas.

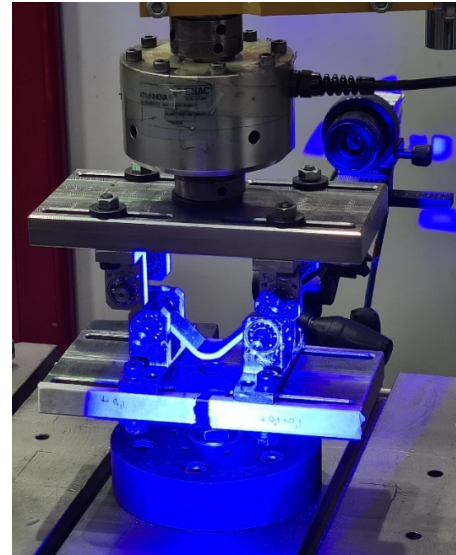
Finalmente, ésta se recorta y se prepara según las necesidades, en este caso, a una anchura aproximadamente de 25 mm.

4.5 Configuración del ensayo

Las probetas se disponen en una máquina universal de ensayos Instron 8872, como se puede ver en la Figura 11.a). Ésta es una máquina hidráulica uniaxial, la cual es utilizada para poder realizar ensayos a fatiga en trabajos futuros. Se dispone de un utillaje de flexión a cuatro puntos para acomodar las probetas según indica la norma ASTM D6415, el cual se aprecia en la Figura 11.b)



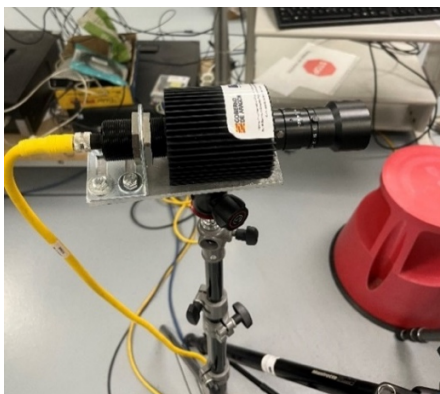
a)



b)

Figura 11. Máquina universal de ensayos y utillaje de acuerdo con la norma ASTM D6415, de izquierda a derecha.

Para poder realizar una correcta monitorización, se emplean dos cámaras CCD de 5 megapíxeles, configuradas para capturar imágenes a una frecuencia de 5Hz, que se pueden ver en la Figura 12.b) Además, tal y como se muestra en la Figura 12.a), se utiliza un sistema de iluminación de dos focos de luz fría para reducir el tiempo de exposición de las cámaras y así conseguir mayor frecuencia de adquisición y hacer posible que la cámara funcione a 5Hz.



a)



b)

Figura 12. Izqda.-Foco luz fría, drcha. Cámara CCD 5Mpx Monitorización.

Para el análisis y representación de los resultados del ensayo se emplea el software Vic-2D-2009 de Corralated Solutions. Es una herramienta empleada para la correlación digital de imágenes (DIC), diseñada para medir desplazamientos y deformaciones en 2D a partir de una muestra sometida a carga mecánica [17].

Por un lado, la cámara CCD realiza fotos del ensayo a 5Hz, y estas fotos son enviadas al software Vic-2D-2009 para su estudio. Este software, analizando todas las imágenes en cada instante, va calculando el desplazamiento píxel por píxel, desde el momento inicial, sin aplicar carga, hasta el momento final, cuando la grieta ya se ha propagado, observando cómo se ha movido de una imagen a otra cada píxel. Con esta información, combinada con un parámetro de correlación entre las imágenes, se monitoriza la propagación de la grieta.

Como se puede ver en la Figura 13, con los diferentes colores se puede observar la correlación de las imágenes en cada punto. En cuanto al parámetro $\sigma(\alpha)$, en la probeta con el teflón de 15mm descentrado, los colores fríos (morados y azules) representan una gran correlación entre las imágenes, lo que quiere decir que no se ha desplazado ni deformado la probeta en esas regiones. En cambio, los colores cálidos (rojos, amarillos, verdes) indican que, en esas zonas, la probeta se ha deformado y desplazado, lo que muestra que la grieta se ha propagado. Por otro lado, en la zona central derecha, representada en negro y sin colorear, se encuentra el teflón.

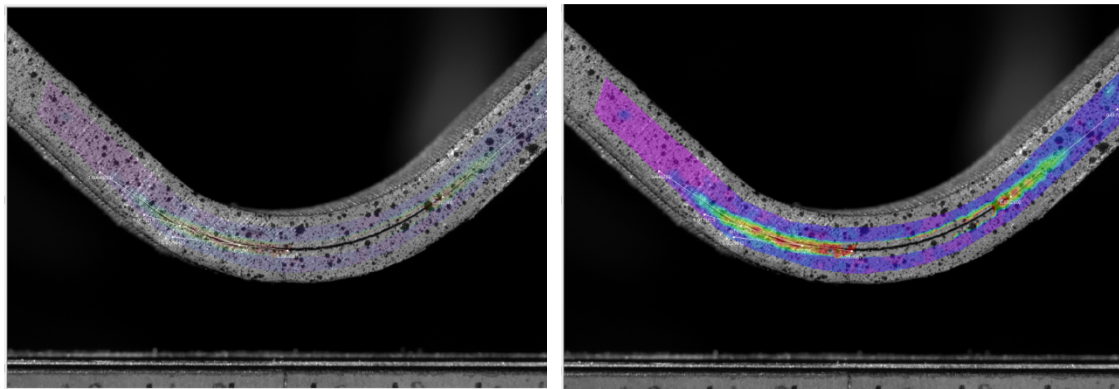


Figura 13. Correlación Sigma (α)- Vic-2D-2009.

Este parámetro sigma, que indica la correlación entre las imágenes en cada punto, nos da información de lo que pasa en el ensayo, cómo se ha deformado la probeta y hacia dónde va avanzando la grieta. Esto también nos permite colocar el extensómetro COD (Crack opening displacemnt) virtual en la zona donde avanza la grieta. El COD hace referencia a la separación entre las caras de una grieta en un material bajo tensión, que se usa

comúnmente en mecánica de fractura para describir la magnitud de la apertura en la punta de la grieta [18].

Una vez observada la correcta correlación entre las imágenes con la representación de $\sigma(\alpha)$ en la Figura 13, este extensómetro COD también permite medir la diferencia en desplazamientos, como se observa en la Figura 14 y Figura 15, y con ello, calcular las deformaciones.

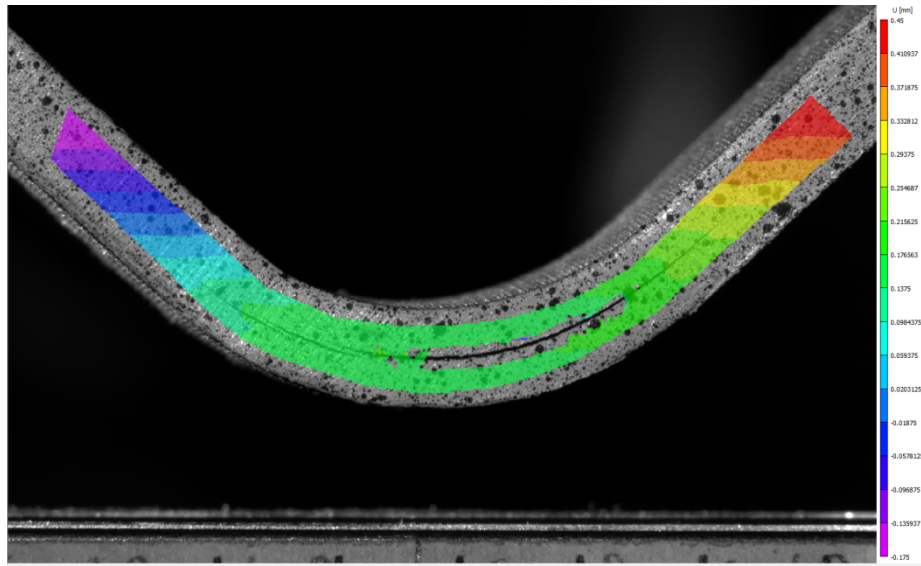


Figura 14. Correlación desplazamientos horizontales, U- Vic-2D-2009.

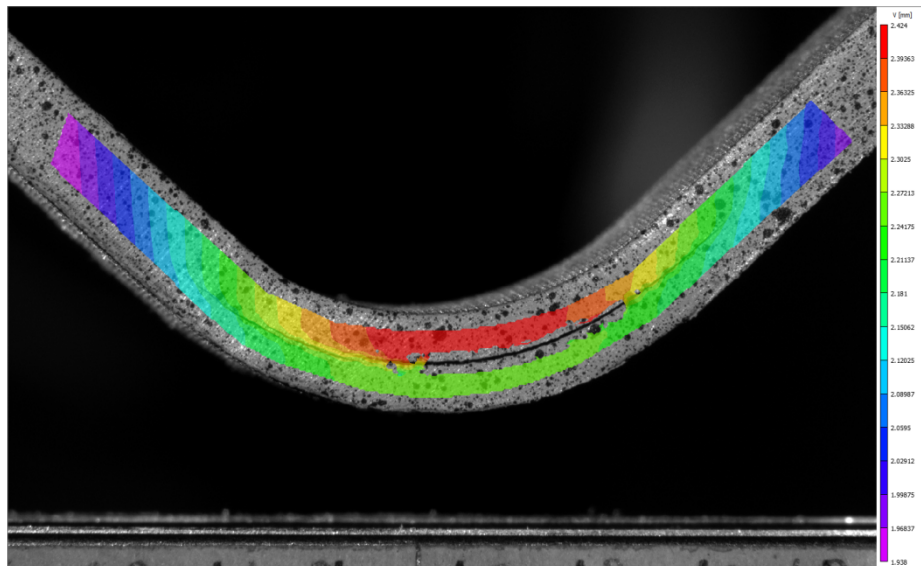


Figura 15. Correlación desplazamientos verticales, V Vic-2D-2009.

5 MODELO NUMÉRICO

5.1 Introducción

En este trabajo se lleva a cabo la simulación numérica del comportamiento de una probeta curva de material compuesto, utilizando el método de elementos finitos. El objetivo principal es analizar su comportamiento y correlar los resultados con los ensayos experimentales, con la finalidad de validar su implementación en aplicaciones industriales.

El método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica utilizada para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales en problemas complejos de ingeniería y física, como tensiones o deformaciones, donde las soluciones exactas son difíciles de obtener y, por tanto, es necesario el uso de métodos que permitan obtener soluciones numéricas aproximadas a la real. Al dividir un sistema en elementos pequeños y aplicando condiciones de contorno, el MEF permite simular fenómenos físicos en geometrías complicadas, logrando gran precisión [19].

El programa que se va a utilizar es Abaqus 2024, el cual nos permite crear, analizar y visualizar modelos y simulación de elementos finitos. Este programa emplea tres módulos distintos para completar el proceso de modelado, cálculo y postprocesado. Por lo tanto, permite desarrollar un análisis completo, integrando todas las etapas de simulación en una única plataforma, lo cual facilita tanto al proceso de simulación como la interpretación de los resultados obtenidos.

Este se utiliza ampliamente en las industrias para el análisis de integridad estructural, vibración y rendimiento de componentes y conjuntos. Permite realizar simulaciones no lineales, donde el comportamiento del sistema puede cambiar drásticamente según las condiciones de carga, las deformaciones o los límites de los materiales. Este análisis permite estudiar cómo se comportan los materiales y estructuras en condiciones extremas, como en nuestro caso la fractura. Además, nos permitirá modelar y analizar la propagación de la grieta para las diferentes pruebas utilizando una amplia gama de materiales, entre ellos los materiales compuestos.

5.2 Descripción del modelo de elementos finitos

A continuación, se procederá a modelar la probeta junto a su utillaje. Se realizará un refinamiento adecuado del mallado y se definirán las cargas y condiciones de contorno. El modelado de la grieta se realizará utilizando el método VCCT. El análisis de los resultados datos será llevado a cabo con Abaqus.

El programa no especifica de manera predeterminada las unidades utilizadas, pero estas serán para las distancias y desplazamientos milímetros (mm) y para las cargas Newtons (N). Como resultado las tensiones se expresarán en megapascals (MPa).

5.2.1 Geometría

La geometría de la pieza se diseñará en dos dimensiones, como se puede observar en la Figura 16, y estará compuesta por dos partes principales o sólidos, cada uno definido de manera individual:

Probeta: Elemento deformable de tipo Shell (elemento placa). Este tipo de elemento se utiliza para modelar estructuras delgadas con un espesor pequeño en comparación con sus otras dimensiones, ideales para problemas donde los esfuerzos y deformaciones están dominados por la flexión.

Como se puede observar en la Figura 16, se han realizado diversas particiones en la probeta, pero estas tienen únicamente la función de optimizar el mallado. La probeta se ha subdividido en dos partes “probeta_inf” y la “probeta_sup” con el objetivo de poder modelar correctamente la grieta. Probeta_sup se refiere a la mitad superior del espesor de la probeta, es decir, a la mitad de las capas de fibra de carbono. Por su parte, probeta_inf corresponde a la mitad inferior. Esta subdivisión permite incorporar diferentes configuraciones de teflones.

Rodillos: Elemento rígido discreto de tipo Wire (alambre). Estos elementos se utilizan para representar estructuras delgadas que se comportan como cuerpos rígidos, es decir, no sufren deformaciones significativas bajo carga, pero transmiten fuerzas y momentos a los nodos con lo que interactúan.

En este elemento es necesario definir un punto de referencia (RF) para asegurar la correcta aplicación de las cargas y condiciones de contorno. Los rodillos se han subdividido en “rodillos_sup” y en “rodillos_inf” ya que geométricamente son iguales, pero tienen diferente posicionamiento y condiciones de contorno.

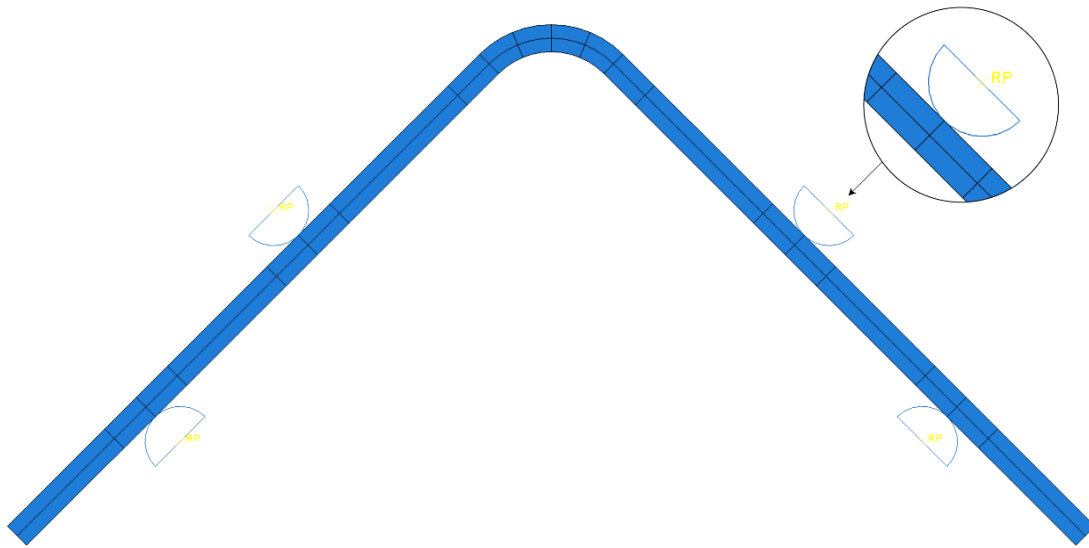


Figura 16. Geometría de viga curva y detalle del contacto de un rodillo superior con la probeta.

5.2.2 Mallado

El mallado es uno de los aspectos clave para el modelado de la pieza, ya que influye directamente en la precisión de los resultados obtenidos y en la eficiencia del cálculo. Es fundamental seleccionar de manera adecuada las dimensiones de la malla para garantizar un equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo. Un mallado excesivamente fino puede derivar en largos periodos de cálculo sin mejorar la resolución del problema, mientras que un mallado demasiado grueso podría no reflejar adecuadamente el comportamiento real del sistema.

En este caso, se han utilizado elementos de tipo CPE4I, que son elementos cuadrilaterales bilineales de 4 nodos con modos incompatibles con deformación plana. Estos elementos, como se muestra en la Figura 14, cuentan con cuatro nodos ubicados en las esquinas del cuadrilátero y emplean una función de interpolación bilineal para aproximar las deformaciones y tensiones en su interior. La opción de “modos incompatibles” permite que el elemento tenga funciones de deformación adicionales, lo que mejora su capacidad para aproximar las deformaciones de flexión [20].

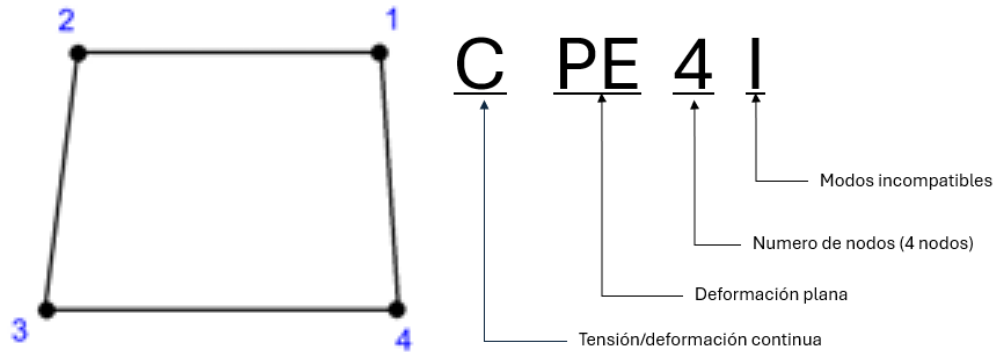


Figura 17. Elemento CPE4I.

La malla se ha refinado específicamente en las zonas críticas de análisis. Principalmente se ha realizado un refinamiento exhaustivo en la curvatura de la probeta, ya que en esta zona es donde se propagará la grieta y donde aparecerán las tensiones y resultados de fractura ,como la tasa de liberación de energía de deformación, necesarios para nuestro estudio. En esta zona se ha implementado una malla de 0.5 mm, lo suficientemente fina para su adecuado estudio.

En la zona entre los rodillos superiores y la curvatura se ha realizado una malla progresiva, de más fina (0.5 mm) en los extremos a más gruesa en el centro (2.5 mm).

Por otro lado, también es de gran importancia refinar la malla en las zonas de contacto con los rodillos, por lo que se ha utilizado una malla de 2.5mm, ya que interesan los resultados de fuerzas en dichas zonas para calcular posteriormente las curvas fuerza-desplazamiento. El resto de las zonas tienen un mallado de 5mm. Los diferentes tamaños de malla los podemos observar gráficamente en la Figura 18.

Las particiones realizadas, que podemos ver en la Figura 16, son de gran importancia para poder realizar una malla perfectamente estructurada, delimitando así las zonas de estudio, las cuales tendrán un diferente mallado.

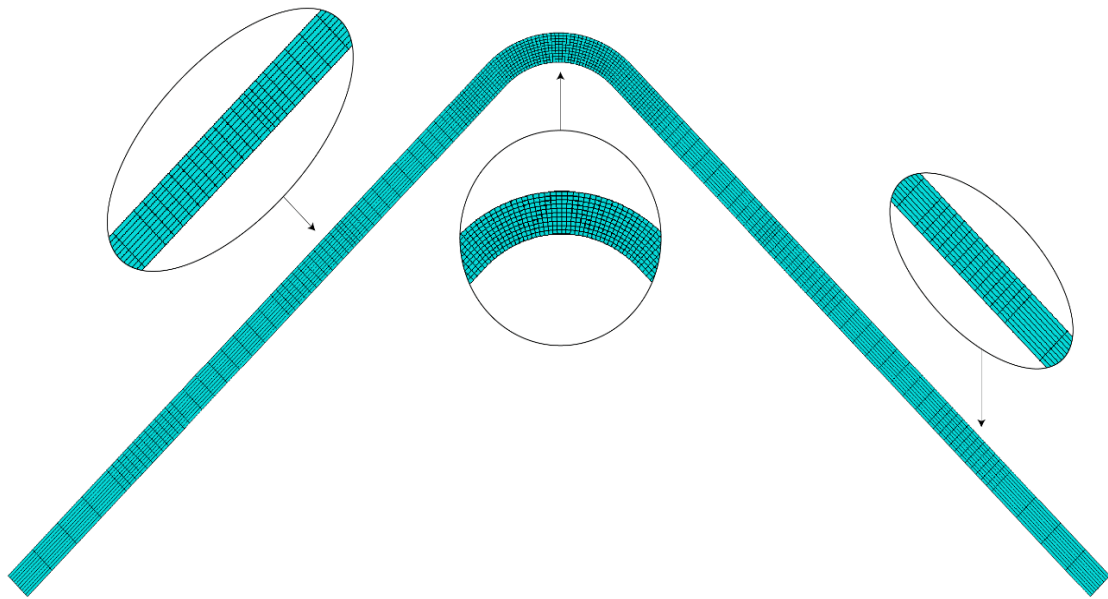


Figura 18. Malla y tres detalles de malla en las zonas de estudio.

5.2.3 Material

El material seleccionado para fabricar las probetas es el Hexply-M21/34%/UD194/IMA-12K, un preimpregnado compuesto por fibras de carbono (IMA-12K) y resina epoxi (M21) con un contenido de resina del 34% en peso. Este material destaca por su alta resistencia y rigidez específica, anisotropía controlada y características optimizadas para aplicaciones en estructuras livianas.

Este material es ortótropo, es decir, es un tipo de material anisotrópico cuyas propiedades mecánicas o físicas, como la rigidez o resistencia, son diferentes en la dirección longitudinal, transversal y a través del espesor. Por lo tanto, tendrá diferentes propiedades en las diferentes direcciones [21], [22].

Para la definición del material en Abaqus, se necesitan tanto los módulos elásticos (longitudinal, transversal y a través del espesor) como el coeficiente de Poisson correspondiente en cada una de las tres direcciones principales. Estas propiedades elásticas se ilustran en la Figura 19 y están resumidas en la Tabla 3, que detalla los parámetros utilizados en el análisis numérico.

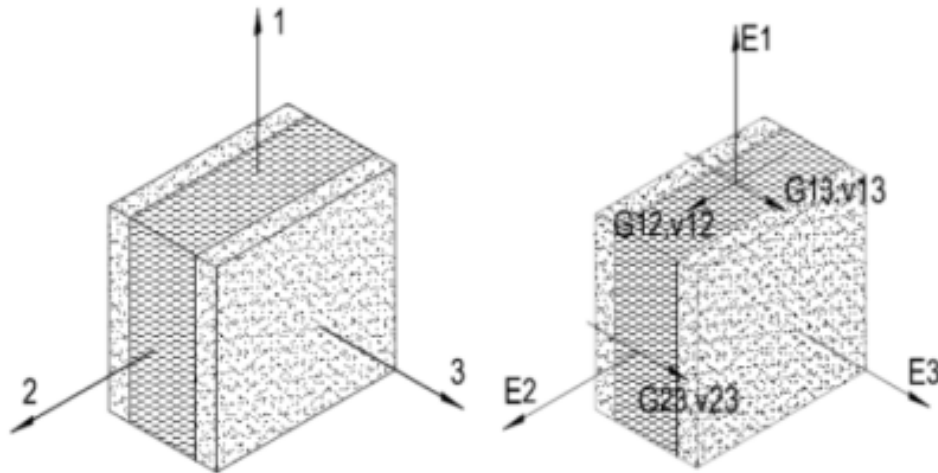


Figura 19. Representación propiedades elásticas material ortotrópico.

E1[Pa]	E2[Pa]	E3[Pa]	*n₁₂	*n₁₃	*n₂₃
Módulo elástico en la dirección de la fibra	Módulo elástico en la dirección transversal a la fibra	Módulo elástico en la dirección fuera del plano	Coeficiente de Poisson entre las direcciones 1 y 2	Coeficiente de Poisson entre las direcciones 1 y 3	Coeficiente de Poisson entre las direcciones 2 y 3
1.78E+11	8.66E+9	8.66E+9	0.324	0.324	0.3

*n₁₂: representa cómo el material se contrae transversalmente (dirección 2) cuando se aplica una tensión en la dirección de las fibras (dirección 1)

*n₁₃: muestra la contracción en la dirección 3 (el espesor) cuando se estira en la dirección de las fibras.

*n₂₃: muestra la deformación transversal (dirección 3) cuando la tensión se aplica perpendicularmente a las fibras (dirección 2).

G₁₃ [Pa]	G₁₂ [Pa]	G₂₃ [Pa]	ρ [kg/m³]	Espesor [m]	Espesor/capa [m]
Módulo transversal o de cizalladura en el plano de la fibra	Módulos transversales o de cizalladura para definir el comportamiento transversal de los elementos Shell		Densidad	Espesor total	Espesor de cada capa (20 capas en total)
5.2E+9	5.2E+9	3.33E+9	1.58E+3	4.38E-3	1.843E-4

Tabla 3. Propiedades del material compuesto utilizado en la simulación.

Al ser un material ortotrópico se necesita su matriz de rigidez ortotrópica, como se muestra en la Figura 20, para modelar adecuadamente su comportamiento elástico. Para ello necesitamos sus propiedades elásticas, que se pueden ver en la Tabla 3.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & sym & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

Figura 20. Matriz rigidez ortotrópica.

Data									
	D1111	D1122	D2222	D1133	D2233	D3333	D1212	D1313	D2323
1	180643.822	4073.685636	9607.250003	4073.685636	2946.480772	9607.250003	5200	5200	3330.384615

$$\begin{pmatrix} 180643.822 & 4073.685636 & 4073.685636 & 0 & 0 & 0 \\ 4073.685636 & 9607.250003 & 2946.480772 & 0 & 0 & 0 \\ 4073.685636 & 2946.480772 & 9607.250003 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3330.384615 \end{pmatrix}$$

Figura 21. Valores matriz rigidez en Abaqus 2024.

En el presente estudio, no se ha considerado el efecto del rozamiento de los rodillos con la probeta. Por tanto, se asume que su influencia es despreciable. Esta suposición se toma de acuerdo con una simulación de un experimento similar, en la cual se define una condición de contacto libre de fricción entre la probeta y los rodillos [2].

5.2.4 Cargas y condiciones de contorno

Las condiciones de contorno simulan las restricciones aplicadas al modelo, definiendo cómo debe comportarse y cómo interactúa con su entorno durante el análisis. Estas condiciones especifican el movimiento, las restricciones de desplazamiento y la aplicación de carga, incluyendo su magnitud, dirección, sentido y puntos de aplicación.

En este trabajo, la definición de las cargas y condiciones de contorno se ha basado en el comportamiento observado en los ensayos experimentales, analizando su movimiento. Tal y como se ha mencionado en el ensayo experimental, los rodillos inferiores están completamente fijos, por lo que tienen todos los grados de libertad restringidos tanto desplazamientos como rotaciones (encastre). Se aplica un desplazamiento vertical de 5 mm, correspondiente al utilizado en la probeta experimental cuando la grieta ya ha progresado significativamente. Por otro lado, se restringen todos los grados de libertad, excepto el desplazamiento vertical impuesto.

En cuanto a la probeta, para evitar cualquier movimiento horizontal y garantizar su estabilidad, se ha aplicado una condición de contorno adicional en un nodo en el centro de la probeta en el que se restringe el desplazamiento horizontal. En resumen, las condiciones de contorno se detallan en la siguiente tabla:

	Desplazamiento		Rotación
	Horizontal	Vertical	
Rodillos inferiores	$X=0$	$Y=0$	$Z=0$
Rodillos superiores	$X=0$	$Y=-5\text{ mm}$	$Z=0$
Nodo central probeta	$X=0$	$Y=\text{libre}$	$Z=\text{libre}$

Tabla 4. Desplazamiento y rotación rodillos

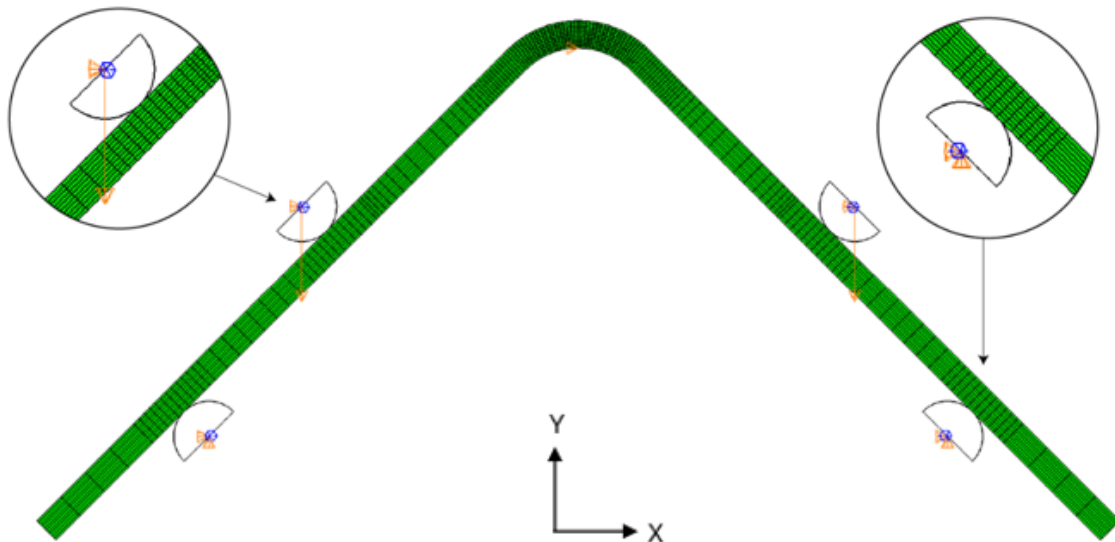


Figura 22. Cargas y condiciones de contorno.

5.2.5 Modelado de la grieta mediante par de contacto y propiedades de fractura en su interacción

El modelado de la grieta es el eje central del presente trabajo, ya que permitirá obtener los resultados de su propagación. Dado que su implementación es menos habitual en la industria en comparación con otros análisis más simples, se ha considerado preciso una explicación más detallada tanto del modelo utilizado, el Cierre Virtual de Grieta (VCCT), como de su aplicación práctica en Abaqus. Ésta última se encontrará en el Anexo A.

Abaqus ofrece diversas herramientas para analizar aspectos relacionados con la mecánica de fractura. Para este estudio se va a utilizar el método de Cierre Virtual de Grieta (VCCT), que se aplica principalmente para estudiar la propagación de grietas en materiales compuestos, especialmente cuando se trata de laminados entre las capas.

El VCCT es una técnica basada en la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM), diseñada para analizar la energía liberada durante la propagación de grietas en materiales frágiles. Es especialmente útil en materiales compuestos debido a su capacidad para simular el comportamiento de las grietas interlaminares, una de las formas más comunes del daño de estos materiales. Al implementarse en Abaqus, permite predecir de manera precisa, la propagación de grietas bajo condiciones de carga estática. En los análisis de VCCT, el plano de delaminación se modela utilizando propagación de grietas en Abaqus, la cual se basa en modelar un par de contacto junto con la definición de las propiedades de fractura en su interacción. Para ello, el programa utiliza las propiedades específicas del material, como la tenacidad a la fractura en los modos I, II y III críticas de fractura para los modos G_I , G_{II} , G_{III} , y evalúa si la grieta se propagará comparando las tasas de liberación de energía calculadas con los valores críticos del material.

El VCCT permite determinar si una grieta continuará propagándose al comparar la energía liberada por unidad de área con un valor crítico, conocido como la tasa de liberación de energía crítica (G_c). Si la energía liberada supera este valor, la grieta se propaga, de lo contrario, se detiene. Hay que destacar que este método es adecuado para grietas que se propagan a lo largo de superficies predefinidas.

Esta técnica se basa en la idea de que la energía liberada, cuando una grieta se propaga en una longitud determinada (δa), es igual a la energía necesaria para cerrar la grieta en esa misma longitud. En la Figura 23, esto se representa mediante dos situaciones, en la parte superior, la grieta cerrada, y en la parte inferior, la grieta se está propagando. Los

puntos i y j corresponden a nodos en el frente de grieta, necesarios para calcular la energía asociada al proceso de propagación.

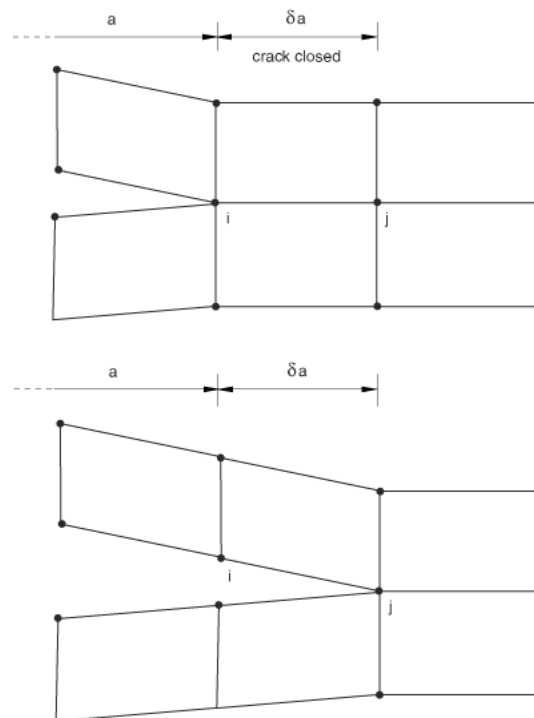


Figura 23. Técnica de cierre virtual de grietas para elementos 2D de 4 nodos [20].

En la parte superior de la imagen, la grieta está cerrada y se observa cómo la extensión desde el nodo i al nodo j libera energía almacenada en el material. Esta liberación de energía depende de las fuerzas que actúan en los nodos cercanos al frente de grieta y de los desplazamientos relativos entre ellos. En la parte inferior, se representa el proceso inverso: la misma energía sería necesaria para cerrar la grieta desde su nuevo frente de grieta, mostrando el principio de la conservación de la energía.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan en detalle los resultados experimentales y numéricos, así como la correlación entre ellos para verificar que las estimaciones del modelo numérico son correctas.

Los datos experimentales son esenciales para confirmar hipótesis mediante mediciones precisas que describen cuantitativamente los fenómenos estudiados. Por otro lado, los datos numéricos permiten comparar resultados experimentales con modelos teóricos, identificando discrepancias y refinando las teorías para que representen mejor la realidad. La correlación numérico-experimental es un aspecto fundamental para validar la exactitud y fiabilidad de los modelos utilizados. Esto garantiza que las predicciones realizadas de los modelos son representativas del comportamiento real del material o estructura. Dicha validación es esencial para el diseño, la evaluación de seguridad y la optimización de componentes, especialmente en áreas como la mecánica de fractura donde los errores pueden tener consecuencias críticas. En cuanto a la correlación, se analizarán las curvas fuerza-desplazamiento y las curvas longitud de grieta-desplazamiento.

En este trabajo se han estudiado probetas con y sin teflón. Gracias a los resultados del modelo experimental, que sirve de marco para la comparación de los modelos numéricos de simulación, se podrá comprobar la precisión de la metodología de modelado FEM. Esto se llevará a cabo a través de los análisis de correlación. La configuración que se analizará corresponde a una probeta con teflón de 15 mm, descentrado hacia el lado derecho desde el centro de curvatura. Se llevarán a cabo dos pruebas experimentales de la probeta de 15mm de teflón descentrado, las cuales serán empleadas para el análisis del modelo. Además, para comprobar la rigidez de la probeta sin grieta preexistente, se han realizado una prueba sin teflón.

En primer lugar, se exponen los datos obtenidos de los ensayos experimentales, seguidos de los resultados del modelo numérico. Esto permite realizar la correlación numérico-experimental, validando así el modelo numérico a partir de los ensayos experimentales.

6.1 Análisis experimental

El análisis experimental permite validar el modelo numérico para poder realizar la correlación numérico-experimental y validar así el modelo. Por lo tanto, en este análisis realizaremos un análisis exhaustivo de los parámetros necesarios para posteriormente realizar dicha correlación. El análisis incluye tanto la curva fuerza-desplazamiento del ensayo de la probeta sin teflón como la curva fuerza-desplazamiento y la curva longitud de grieta-desplazamiento de los dos ensayos de la probeta con teflón de 15 mm descentrado en el ala derecha.

6.1.1 Resultados

En primer lugar, se analiza el ensayo de la probeta sin teflón. Este ensayo se centra en la curva fuerza-desplazamiento, ya que su principal objetivo es validar la rigidez del modelo numérico. La Figura 24 muestra la gráfica típica de un ensayo en una probeta en la que aparece delaminación en las diferentes capas del material compuesto. Las caídas de fuerza observadas reflejan momentos de fractura local o microfracturas en la probeta, donde el material alcanza su límite de resistencia, lo que provoca esta caída brusca en la fuerza aplicada en regiones específicas.

Sin embargo, en la correlación numérico-experimental, únicamente se va a considerar la pendiente inicial de la curva, correspondiente a la región elástica. Este enfoque permite evaluar y comprobar la rigidez del modelo. Este trabajo se centra en la progresión de la grieta en la capa central de la probeta, por lo que la delaminación en el resto de capas, correspondiente a los distintos “saltos” de fuerza, este modelo no lo contempla.

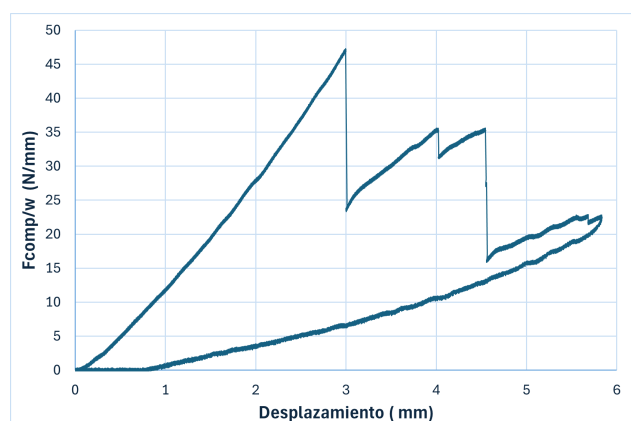


Figura 24. Gráfica fuerza-desplazamiento probeta sin teflón en el ensayo experimental.

A continuación, se analizarán los dos ensayos (Prueba experimental 1 y Prueba experimental 2) de la probeta con teflón de 15 mm descentrado. En estas pruebas, el ensayo se ha llevado a cabo hasta la delaminación en otras capas, ya que el análisis se

centra en la propagación de la grieta en la capa central. En la Figura 25, se representa la longitud de grieta del ala izquierda y la fuerza. El eje X indica el número de imágenes tomadas durante la prueba, lo que equivale al tiempo relativo del ensayo (se hace una imagen cada 5Hz o 0.2 segundos). La fuerza (curva azul) de la gráfica aumenta progresivamente hasta que se produce una caída brusca cuando se aplica una fuerza de 480 N, momento en el que se produce el inicio de la delaminación en otras capas distintas de la central, fenómeno que no se aborda en este trabajo. En cuanto a la longitud de grieta, ésta permanece estable en las etapas iniciales, pero a medida que se incrementa la carga, la grieta comienzan a propagarse de forma escalonada, alcanzando 6 mm antes de delaminar en otras capas.

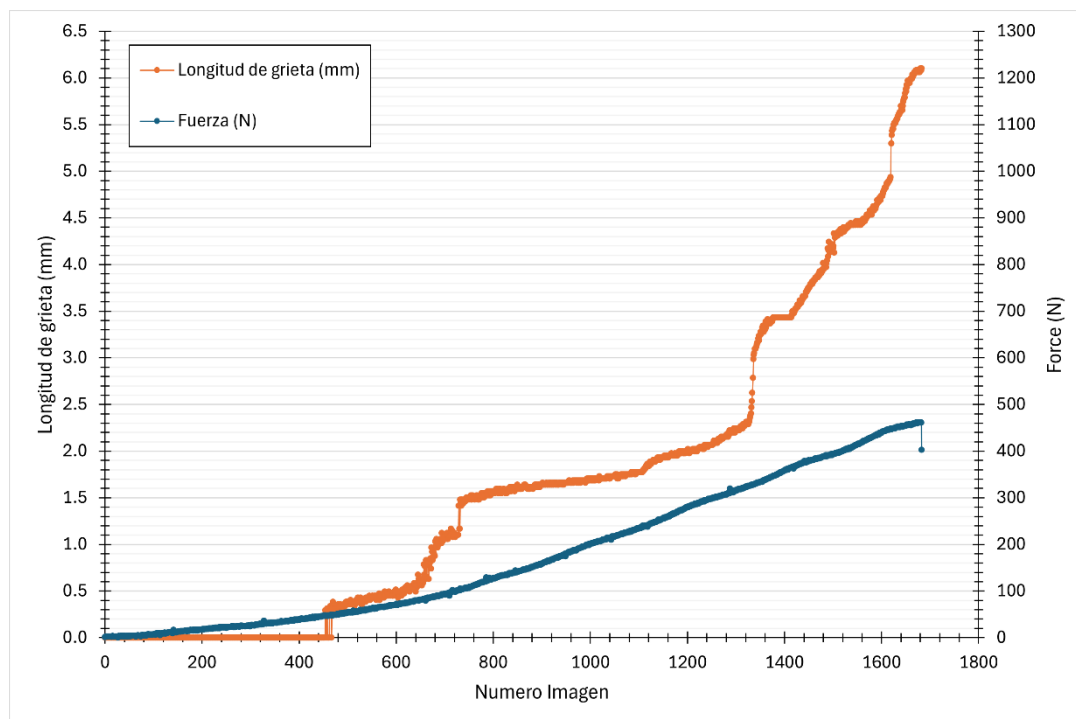


Figura 25. Longitud de grieta y fuerza respecto el número de imágenes en la Prueba experimental 1.

A partir de los datos anteriores y considerando el registro de desplazamientos aplicado en la maquina universal de ensayos, se generan la curva fuerza normalizada con el espesor-desplazamiento y la curva longitud de grieta-desplazamiento de la Prueba 1 Experimental, representadas en la Figura 26 y Figura 27, respectivamente.



Figura 26. Fuerza normalizada con el espesor respecto desplazamiento Prueba 1 Experimental.

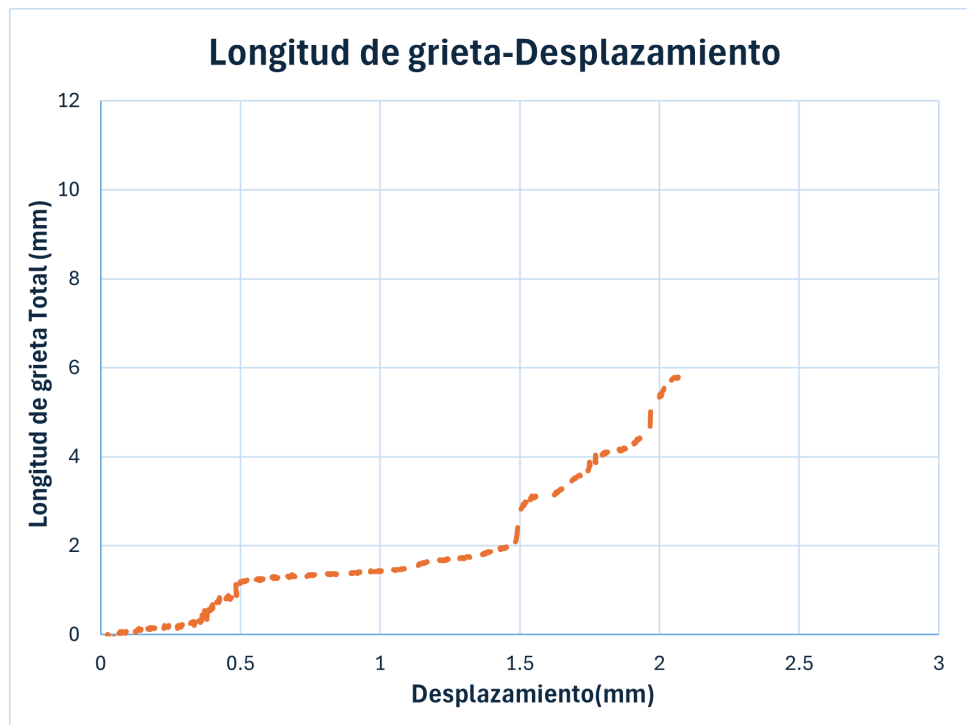


Figura 27. Longitud de grieta respecto desplazamiento Prueba 1 Experimental.

En la Figura 28 se observa el inicio de la propagación de la grieta de la Prueba experimental 1. La grieta visible en la parte izquierda es el teflón y se aprecia cómo progresa levemente la grieta hacia la derecha. Ésta es la representación visual de la longitud de grieta de la imagen 500 aproximadamente.

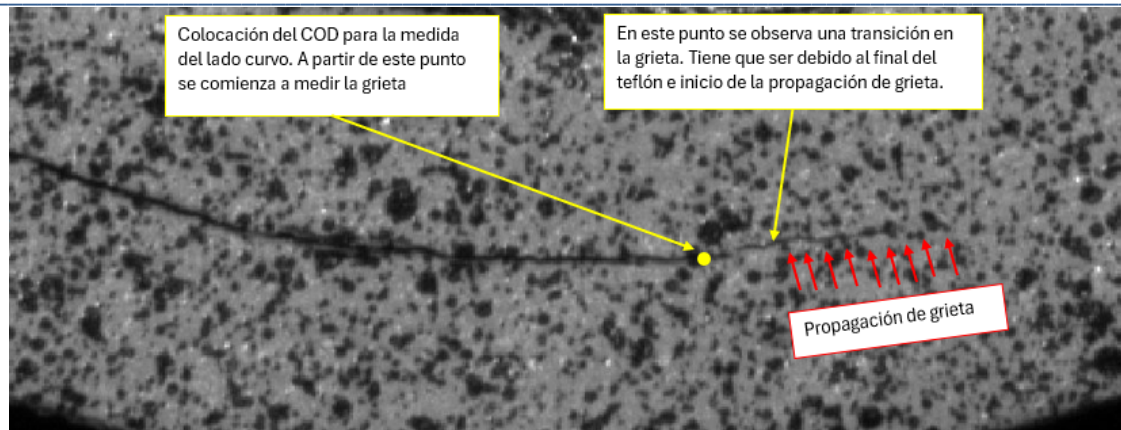


Figura 28. Inicio propagación grieta parte curva Prueba experimental 1.

Por otro lado, en la Figura 29 se analiza la Prueba experimental 2, donde se obtienen las curvas que relacionan la longitud de grieta y la fuerza respecto al número de imágenes, que equivale al tiempo. Las curvas en ambos ensayos presentan un comportamiento similar, aunque en esta prueba se observa que la fuerza aplicada alcanza valores cercanos a 700 N antes de delaminar en una capa diferente a la del teflón y la longitud de grieta alcanza 12 mm.

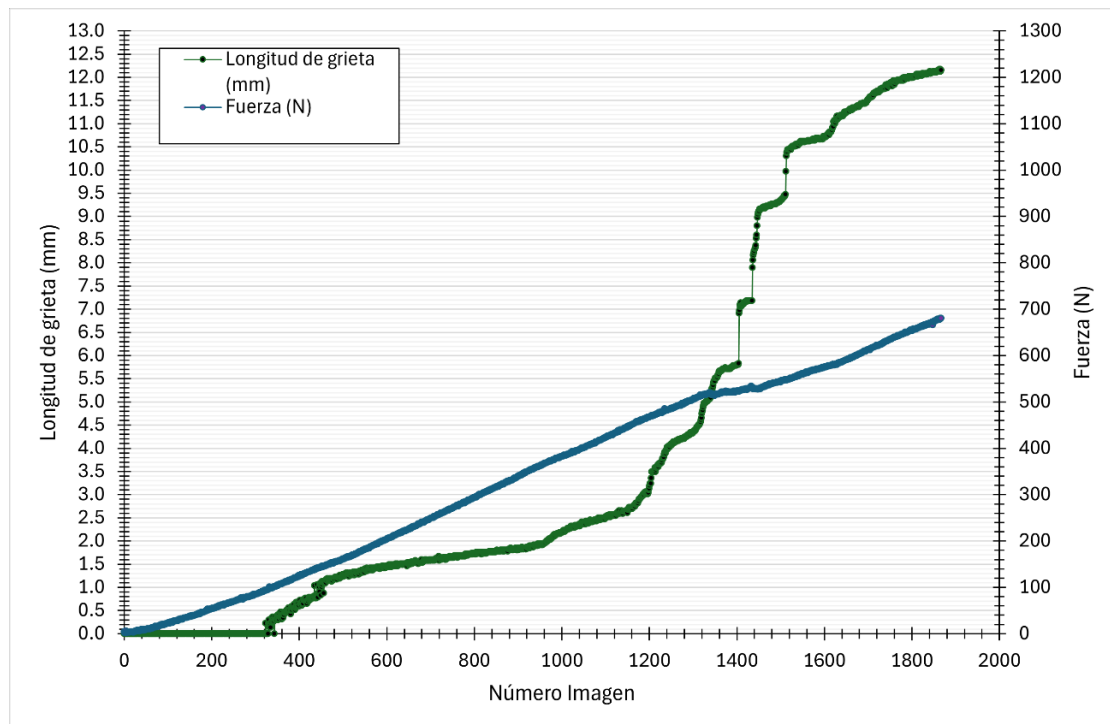


Figura 29. Longitud de grieta y fuerza Prueba experimental 2.

Esta gráfica, considerando el registro del desplazamiento de la máquina, se utilizará para obtener las curvas fuerza normalizada con el espesor-desplazamiento y longitud de grieta-desplazamiento, mostradas en la Figura 30 y Figura 31, respectivamente. Estas son las curvas que emplearemos posteriormente para la correlación numérico-experimental.

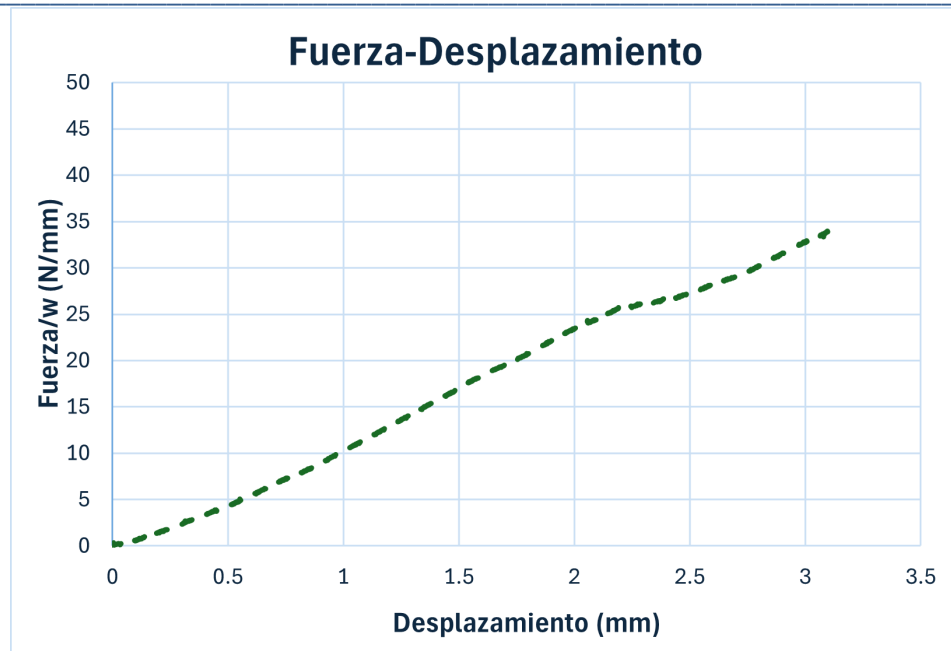


Figura 30. Fuerza normalizada con el espesor respecto desplazamiento Prueba 2 Experimental.

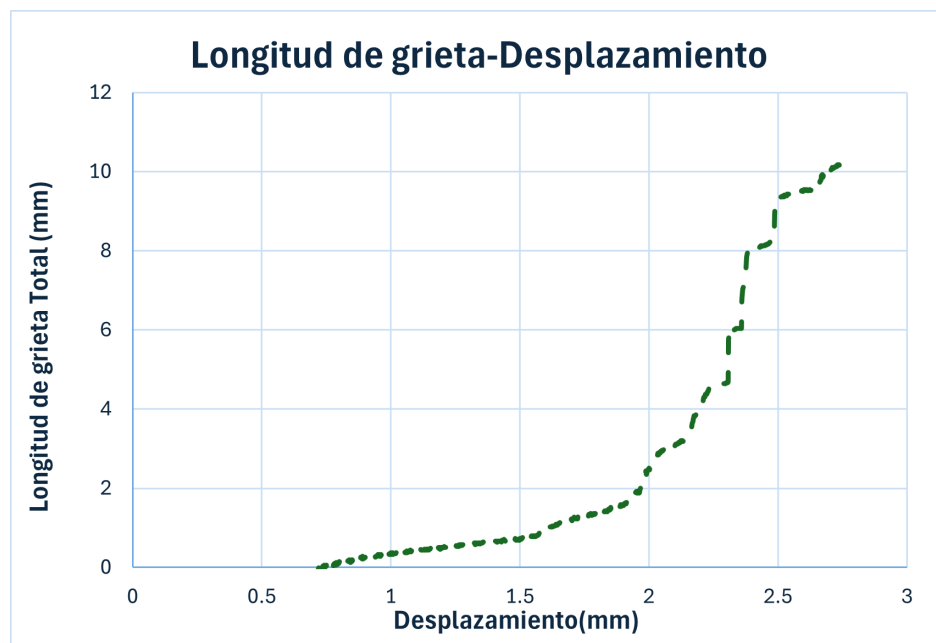


Figura 31. Longitud de grieta respecto desplazamiento Prueba 2 Experimental.

En la Figura 32 se muestra el inicio de la propagación de la grieta de la Prueba experimental 2, representando visualmente la longitud de grieta de la imagen 400 aproximadamente. En el margen derecho de la imagen se localiza el teflón, mientras que hacia la izquierda se aprecia claramente como la grieta comienza a progresar. En la Figura 33 se observa la grieta total al final de la Prueba experimental 2.



Figura 32. Inicio propagación grieta parte curva Prueba experimental 2.

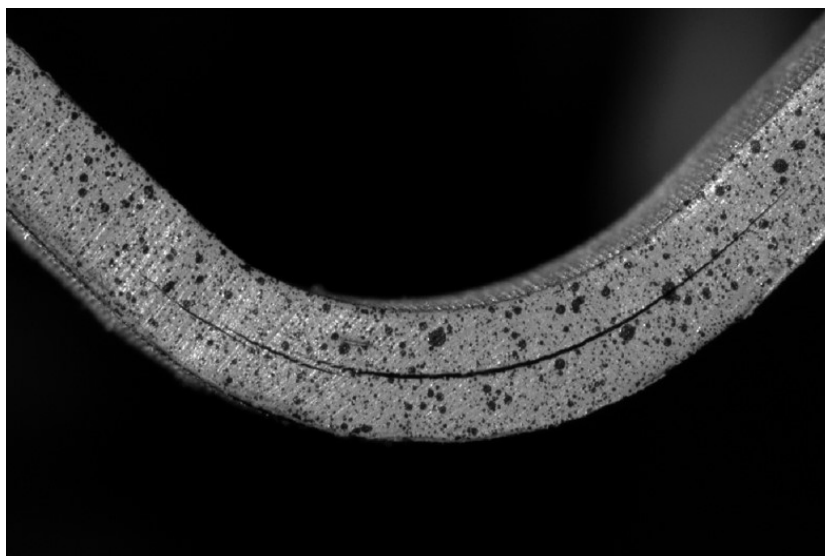


Figura 33. Grieta total Prueba experimental 2.

6.2 Análisis numérico

Una vez tenemos el modelo preparado en Abaqus con sus condiciones de contorno, las cargas y el modelado de la grieta, se realiza un análisis más detallado, donde se pueden observar las tensiones, los desplazamientos, la propagación de la grieta y los modos de fractura. Se analizará el modelo principalmente en los instantes de mayor importancia, que son cuando se inicia la grieta y cuando la grieta ya ha progresado 5mm, ya que es prácticamente lo que progresa la grieta en el modelo experimental, lo que nos permite correlar los datos numéricos y experimentales.

6.2.1 Resultados tensionales

En primer lugar, se presenta la distribución de tensiones en la dirección de las fibras (S11) y en la dirección del espesor (S22), tanto en el instante que comienza la propagación de la grieta como cuando la grieta ya ha progresado 5 mm.

En un material compuesto, la resistencia en la dirección de las fibras (S11) es considerablemente mayor que en otras direcciones. Las fibras están diseñadas para soportar las cargas principales en esta dirección, mientras que la matriz que las rodea transfiere cargas perpendiculares y es estructuralmente más débil. En el caso de la tensión S11, el efecto de la grieta altera la distribución de las tensiones, aumentandolas en las cercanías de la punta de grieta debido a la concentración de esfuerzos. En un material compuesto, si las fibras comienzan a romperse o se produce delaminación entre capas, el material pierde rigidez en esa región, lo que a su vez obliga a las fibras restantes a soportar más carga en la dirección de S11. La Figura 34 muestra la distribución de tensiones S11 al inicio de la propagación de la grieta.

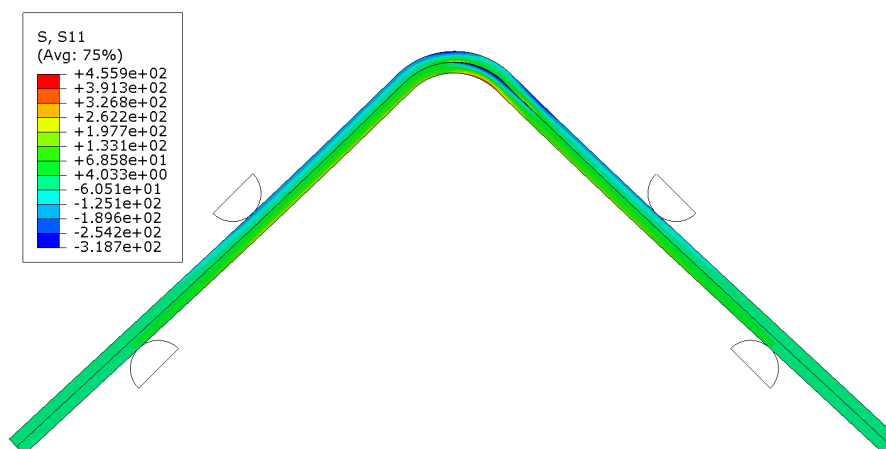


Figura 34. Tensión en la dirección de las fibras, S11, en el inicio de la propagación de la grieta.

Se puede observar que la zona interior (rojo) tiene los valores más altos de tensión positiva alcanzando 455.9 MPa, lo que indica tensión de tracción debido al esfuerzo de flexión. En cambio, la parte exterior de la curvatura (azul oscuro) corresponde a tensiones negativas alcanzando -318.7Mpa, lo que implica tensiones de compresión. Lo mismo sucede cuando la grieta se ha propagado 5 mm, como se muestra en la Figura 35.

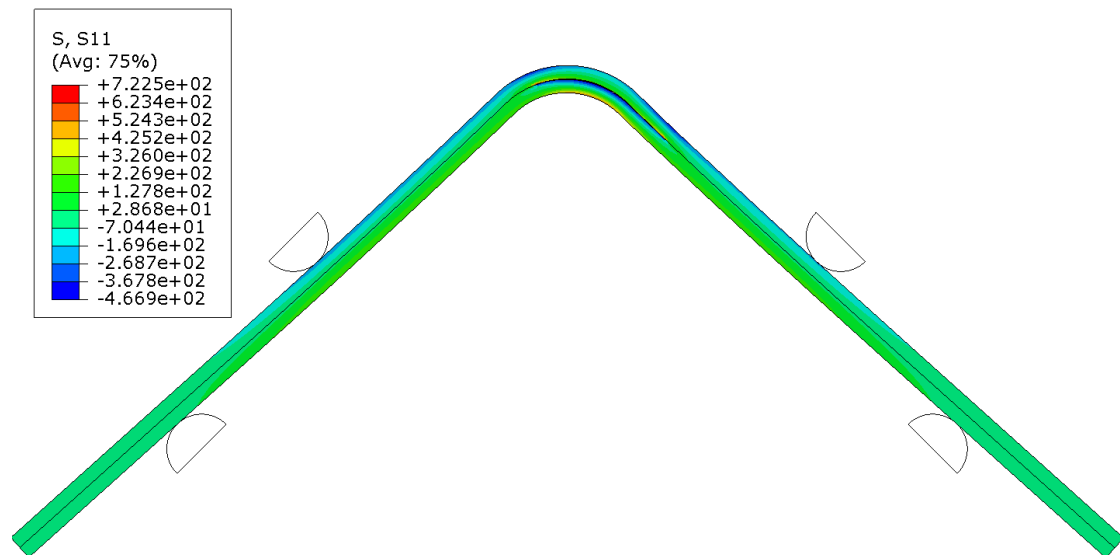


Figura 35. Tensión en la dirección de las fibras, S11, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.

Las tensiones S11 tienden a aumentar a medida que la grieta crece, debido a la distribución de esfuerzos. Como se puede observar en la Figura 35 , la máxima tensión de tracción es 722.5 MPa y la máxima tensiones de compresión es -466.9MPa cuando la grieta ha progresado 5 mm.

A continuación, se representan las tensiones S22, es decir, las tensiones en la dirección del espesor. Esta componente muestra cómo la matriz principalmente resiste esfuerzos en esta dirección. En la Figura 36, se pueden observar las tensiones S22 en el inicio de la propagación de la grieta, que ilustra a la perfección la presencia del teflón de 15mm descentrado a la derecha. El teflón, al producir menor rigidez y capacidad para transferir tensiones, provoca la interrupción en la continuidad de las tensiones en la región donde está ubicado.

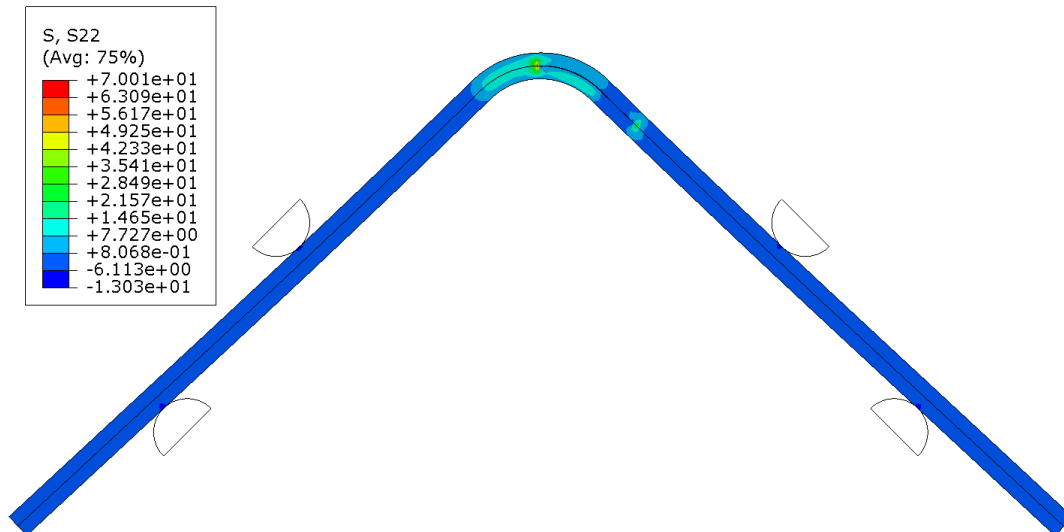


Figura 36. Tensión en la dirección de las fibras, S22, en el inicio de la propagación de la grieta.

Tal y como muestra en la Figura 36, cuando la grieta empieza a propagarse, las tensiones S22 se concentran en la curvatura. La máxima tensión de tracción se concentra en el frente de grieta siendo 700.1 MPa, donde la grieta se propaga transversalmente.

También se presenta la tensión S22 cuando la grieta ha propagado 5 mm, en la Figura 37:

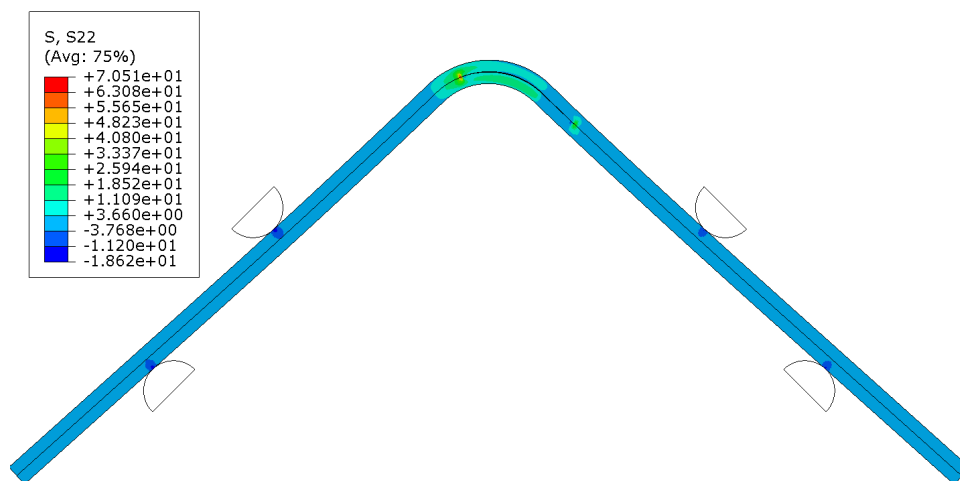


Figura 37. Tensión en la dirección de las fibras, S22, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.

Cuando la grieta avanza 5 mm, se observa un ligero incremento en los valores máximos, concentrados en el frente de grieta, tal como lo evidencian los colores cálidos, como el amarillo y naranja. Este incremento ocurre porque la grieta reduce la capacidad de la matriz para transferir cargas perpendiculares provocando una concentración de tensiones críticas que favorecen la propagación de la grieta.

Como era de esperar, en la región curva de la probeta se concentra el mayor nivel de tensiones, ya que la geometría curva genera una redistribución de las tensiones, maximizándolas en la zona cercana al interior de la curva, debido al esfuerzo de tracción principal.

En las zonas rectas de la probeta, las tensiones son más uniformes y de menos magnitud (colores verdes o azules claros), ya que estas partes no están sometidas a las mismas complejidades de carga que la zona curva.

6.2.2 Resultados en el campo de desplazamientos

A continuación, se analiza el desplazamiento vertical, representado con la Figura 38:

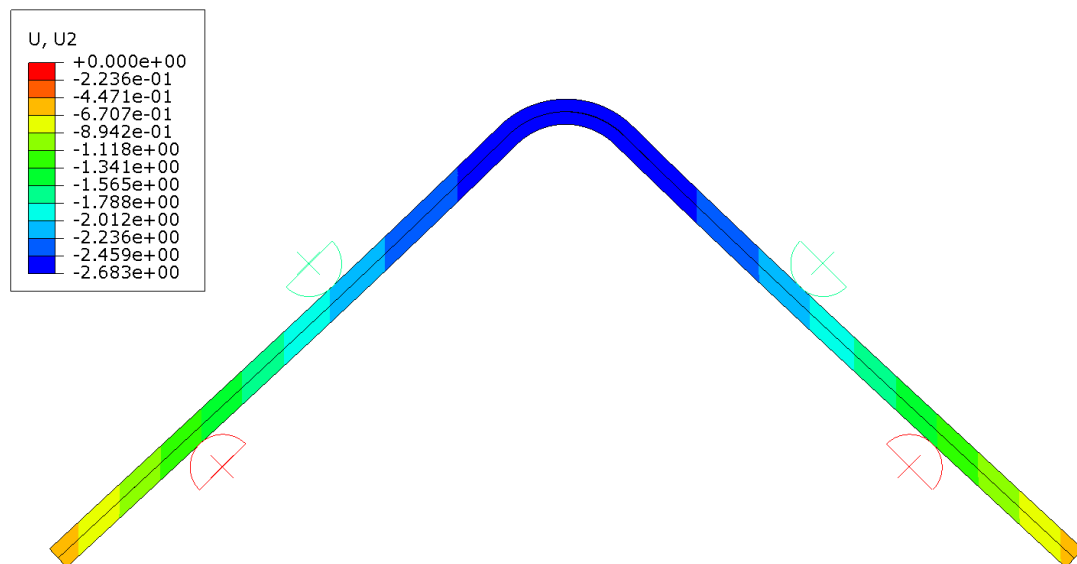


Figura 38. Desplazamiento vertical, U2, en el inicio de la propagación de la grieta.

En el momento en el que empieza a propagarse la grieta, se aplica un desplazamiento vertical a los rodillos superiores de 1.6 mm. Como resultado, la zona curva de la probeta se desplaza verticalmente 2.7 mm (zona que más se desplaza y donde progresa la grieta). Cuando la grieta ha avanzado 5mm, el desplazamiento aplicado sobre los rodillos superiores es de 2.2mm y la zona curva donde propaga la grieta se desplaza 3.8mm, tal y como se muestra en la Figura 39:

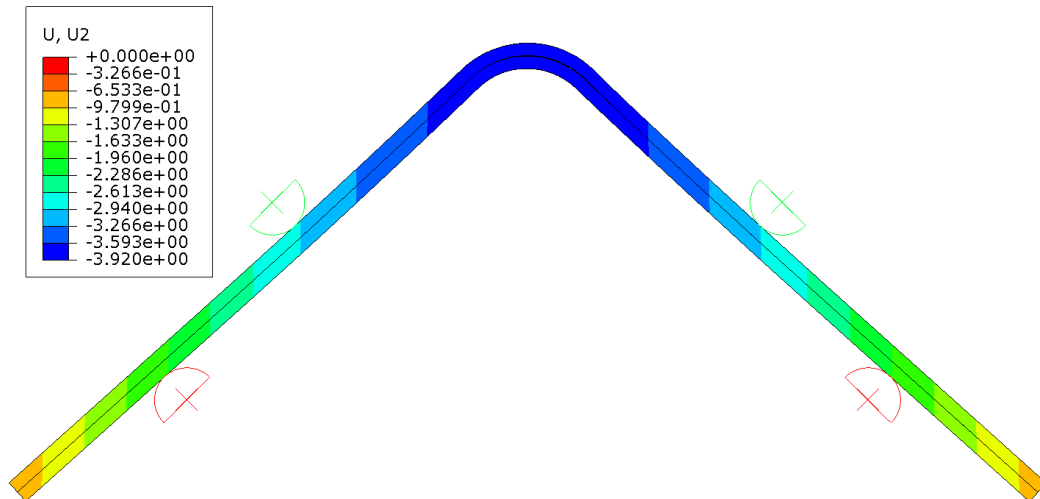


Figura 39. Desplazamiento vertical, U2, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.

Para realizar un análisis exhaustivo, también se va a representar el desplazamiento horizontal en ambos instantes, tal y como se muestra en la Figura 40 y Figura 41. Este desplazamiento se debe al deslizamiento de la probeta sobre los rodillos y, en consecuencia, produce que los extremos de la probeta (zona azul oscuro y zona roja) se desplacen horizontalmente como consecuencia de su apertura dado la forma de cargarla en flexión a 4 puntos.

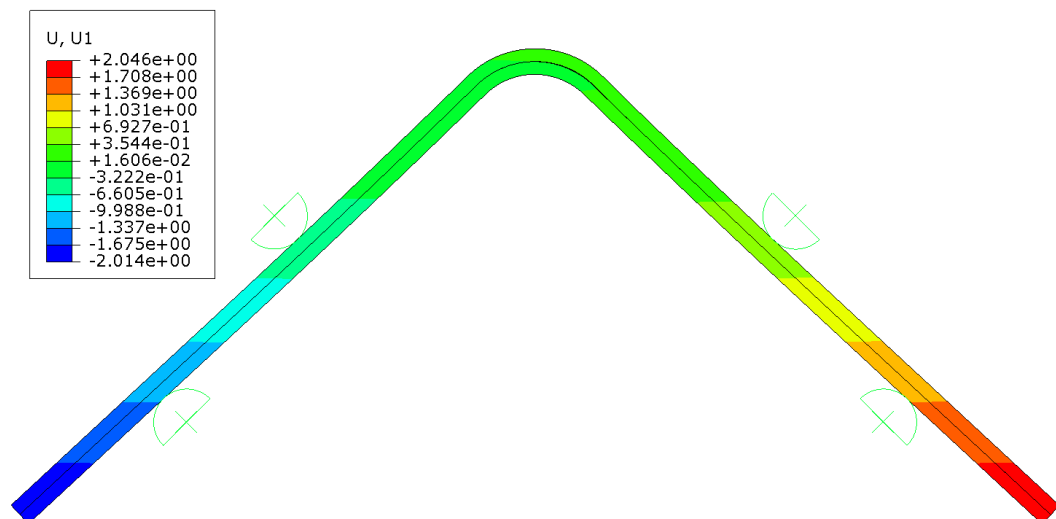


Figura 40. Desplazamiento horizontal, U1, en el inicio de la propagación de la grieta.

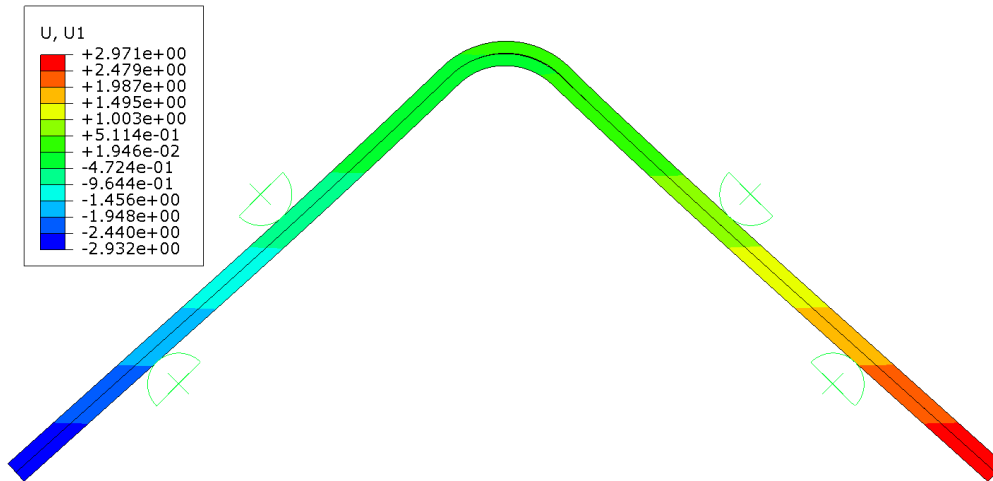


Figura 41. Desplazamiento horizontal, U1, cuando la propagación de la grieta es de 5mm.

6.2.3 Resultados de la curva fuerzas-desplazamiento

Con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de la probeta, es fundamental analizar la fuerza en cada instante del desplazamiento aplicado. Abaqus permite extraer esta relación, lo que permite construir la curva fuerza-desplazamiento, identificar la fuerza crítica en la que se propagan las grietas y evaluar la rigidez de la probeta.

En primer lugar, con el objetivo de evaluar la rigidez, se representa la curva fuerza-desplazamiento de la probeta sin teflón en Figura 42. Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo. A Tabla A 1.

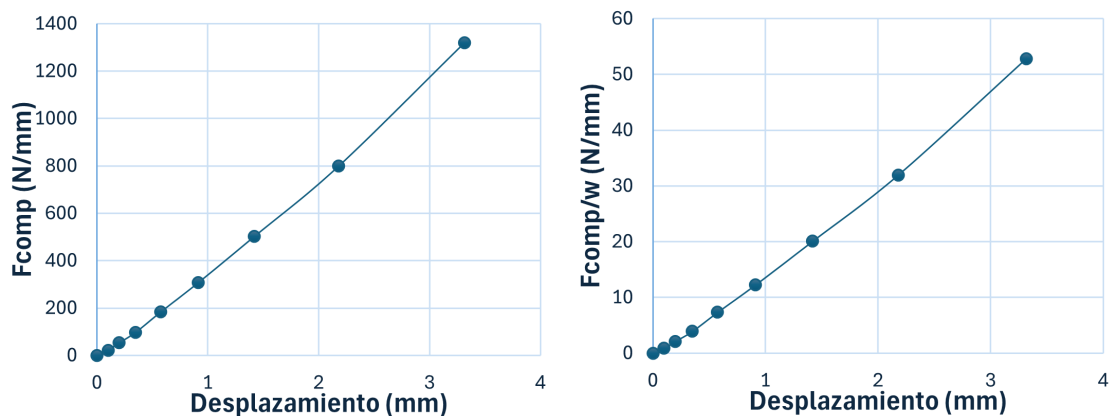


Figura 42. Curva fuerza vs. Desplazamiento y fuerza normalizada con el espesor vs. desplazamiento, de izquierda a derecha, para la probeta sin teflón.

La pendiente del tramo inicial de la curva fuerza-desplazamiento refleja directamente la rigidez del sistema, un parámetro fundamental para continuar con las correlaciones numérico-experimentales y validar el modelo.

Por otro lado, se va a analizar la probeta con teflón de 15 mm descentrado. Al aplicar un desplazamiento a los rodillos superiores, se genera una fuerza en la probeta, cuya evolución permite identificar la fuerza crítica en la que comienza a propagarse una grieta, reflejando así las condiciones de falla del material compuesto. Esta fuerza se obtiene por equilibrio de fuerzas como la suma de las reacciones en ambos rodillos. En la Figura 43 se muestra la curva del modelo de teflón de 15mm descentrado. Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo. A Tabla A 2.

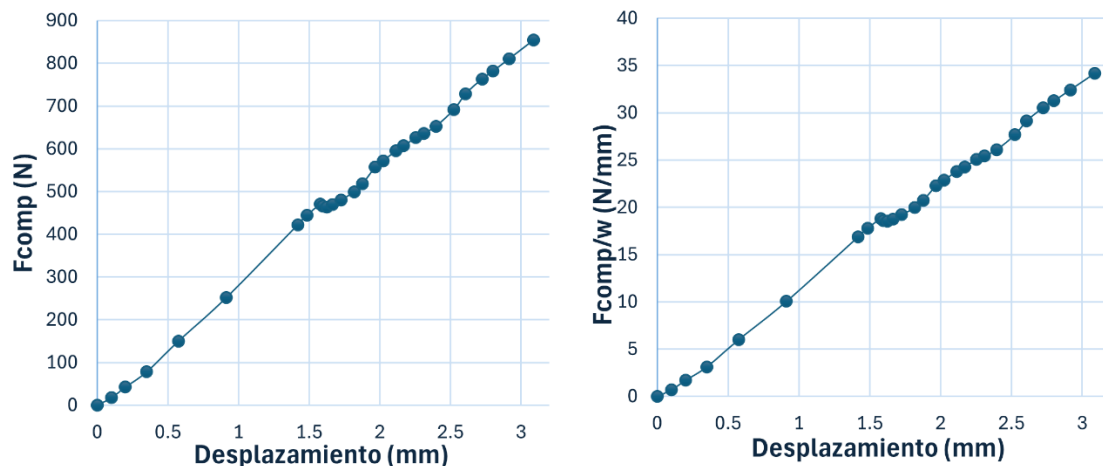


Figura 43. Curva fuerza vs. Desplazamiento y fuerza normalizada con el espesor vs. desplazamiento, de izquierda a derecha, para la probeta con teflón de 15 mm descentrado.

En el caso de la probeta con teflón de 15 mm descentrado, se observa que la grieta se inicia cuando la fuerza alcanza 470.6 N, por lo que es la fuerza crítica para este modelo. Para asegurar la comparabilidad entre probetas con diferentes espesores, se calcula el valor de la fuerza normalizada respecto al espesor (F_{comp}/w) que, en este caso, es de 18.82 N/mm. Este parámetro permite una correlación más precisa al eliminar las diferencias debidas a variaciones geométricas en el espesor. En la gráfica fuerza-desplazamiento de la Figura 43, se observa que la curva tiene un cambio notable en la pendiente alrededor de un desplazamiento de 1.58mm. Este cambio indica una variación en el comportamiento mecánico del sistema y, en este caso, señala el momento en que se inicia la propagación de la grieta. Antes del cambio de pendiente, está, es más pronunciada, lo que nos indica una mayor rigidez del sistema, sin evidencia de propagación de grieta. Una vez la pendiente disminuye, se puede interpretar que la grieta ha comenzado a propagarse. La reducción de la pendiente indica que la probeta está perdiendo rigidez debido al avance de la grieta. Las caídas adicionales que se observan a lo largo de la curva fuerza desplazamiento se deben a la propagación progresiva de la grieta.

A medida que aplicamos un desplazamiento mayor sobre los rodillos superiores, tanto el desplazamiento de la probeta como la fuerza aplicada aumentan proporcionalmente. Este incremento refleja como el material compuesto responde al incremento de carga, inicialmente mediante deformación elástica, y posteriormente, con la propagación de grietas cuando se alcanzan niveles críticos de tensión. En el caso en que la grieta haya progresado 5 mm, la fuerza necesaria para generar esta condición es de 592.2 N. Al normalizar este valor dividiendo la fuerza aplicada entre el espesor de la probeta (w), se obtiene un valor de $F_{comp}/w = 23.81 \text{ N/mm}$.

La presencia del teflón en las probetas introduce un elemento adicional que distorsionan la distribución interna de tensiones y fuerzas, generando discontinuidades que varían la rigidez. Por esta razón, la evaluación de la rigidez se realizará con la probeta sin teflón, garantizando así resultados fiables y representativos del comportamiento intrínseco del material compuesto.

6.2.4 Resultados de la correlación fuerza-desplazamiento entre el ensayo experimental y el modelo numérico

En primer lugar, se evalúa la correlación entre los resultados numéricos y experimentales de la curva fuerza-desplazamiento de la probeta sin teflón. Este caso base representa el comportamiento del material sin ninguna influencia adicional lo que permite analizar la rigidez inicial de la probeta de material compuesto. La pendiente de la curva fuerza-desplazamiento, antes de que se produzcan deformaciones significativas, es un indicador de la rigidez del modelo. En la Figura 44, se muestran las curvas fuerza-desplazamiento para el ensayo experimental y procedente de los resultados del modelo numérico. Ambas curvas tienen prácticamente la misma pendiente, por lo que el modelo numérico reproduce adecuadamente el comportamiento elástico del sistema.

Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo B. Tabla A 2.



Figura 44. Comparativa fuerza-desplazamiento para la probeta sin teflón.

En la Figura 45, se muestra las curvas fuerza-desplazamiento para la probeta con teflón de 15mm descentrado del modelo numérico frente a las dos pruebas experimentales. La línea naranja discontinua (Prueba experimental 1) corresponde a una de las pruebas experimentales realizadas, mientras que la línea verde discontinua (Prueba experimental 2) representa la segunda prueba experimental. Por otro lado, la línea negra representa los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas. La curva numérica, en comparación con la Prueba experimental 1 sigue una tendencia similar en la región inicial elástica, aunque presenta ligeras fluctuaciones y desviación a medida que aumenta el desplazamiento. La Prueba experimental 2, al igual que la primera prueba, muestra un comportamiento cercano al modelo numérico, incluso se mantiene más alineada con la numérica en desplazamientos mayores hasta que se empieza a propagar la grieta (esto se puede ver en la caída de fuerza).

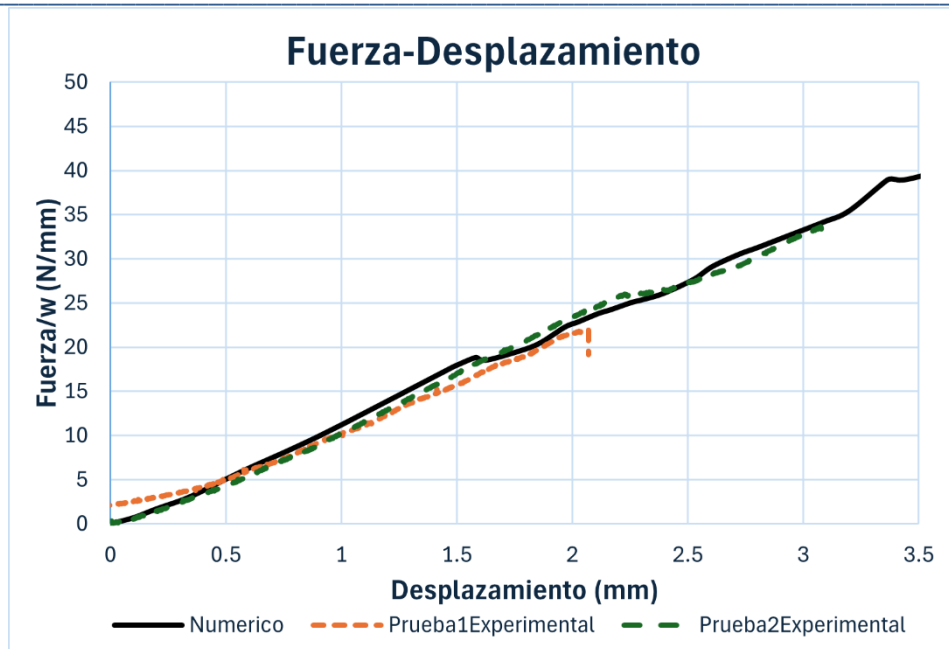


Figura 45. Curva fuerza-desplazamiento para la probeta con teflón de 15mm descentrado.

Una vez analizada la curva fuerza-desplazamiento de la probeta de teflón 15 mm descentrado, se observa que la pendiente entre las curvas del modelo numérico y las dos pruebas experimentales es prácticamente coincidente, corroborando que los modelos están bien realizados y los datos son fiables.

6.2.5 Análisis de la propagación grieta

La propagación de la grieta es uno de los aspectos cruciales de analizar para entender el comportamiento estructural de la probeta bajo carga. Para este análisis se va a estudiar la propagación de la grieta de la parte curva de la probeta con teflón de 15 mm descentrado, que progresa hacia el ala izquierda.

En el Anexo A Tabla A 3, aparecen los valores numéricos de la longitud de grieta. En la Figura 46, se muestra la progresión de la grieta a lo largo de la simulación hasta los 5 mm de longitud de grieta.

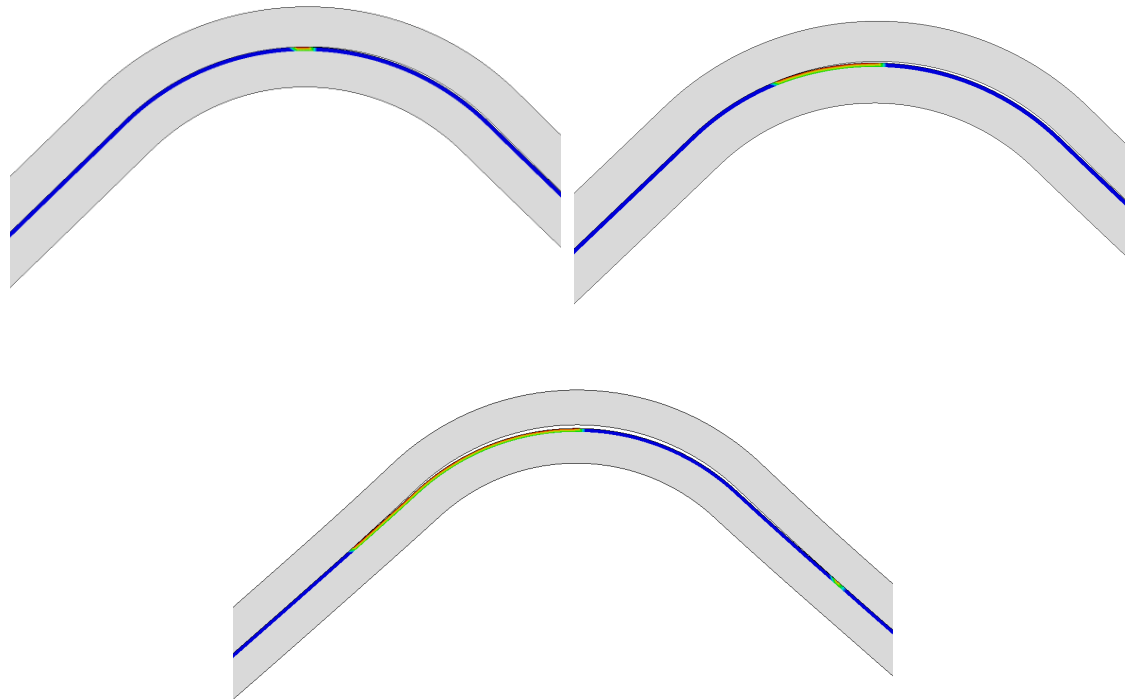


Figura 46. Evolución grieta.

Inicialmente la probeta presenta un diseño asimétrico en cuanto a la longitud de grieta. Considerando el eje de simetría de la probeta como origen de la propagación, la longitud inicial de grieta es de 15 mm hacia el ala derecha y de 0 mm hacia el ala izquierda

La propagación de la grieta comienza cuando el desplazamiento aplicado a la probeta alcanza 1.598 mm. Como resultado de la configuración simétrica de cargas, las máximas tensiones se inducen en el centro de la probeta. Adicionalmente, el hecho de que el teflón se encuentre descentrado condiciona el estado de cargas y supone que el punto central presente el frente de grieta. Es por esto por lo que la grieta tiende a propagarse más fácilmente hacia el lado izquierdo. Debido a esta resistencia, el ala izquierda experimenta un mayor gradiente de esfuerzos, facilitando el crecimiento de la grieta en esta región. A medida que avanza el ensayo, se aprecia que la grieta en el ala izquierda alcanza una longitud de 5 mm cuando el desplazamiento aplicado es de 2.25 mm, mientras que hacia el lado derecho no se observa propagación.

En la Figura 47 se ve representada la evolución de la grieta en el ala izquierda frente al desplazamiento a lo largo del desplazamiento. Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo. A Tabla A 3:

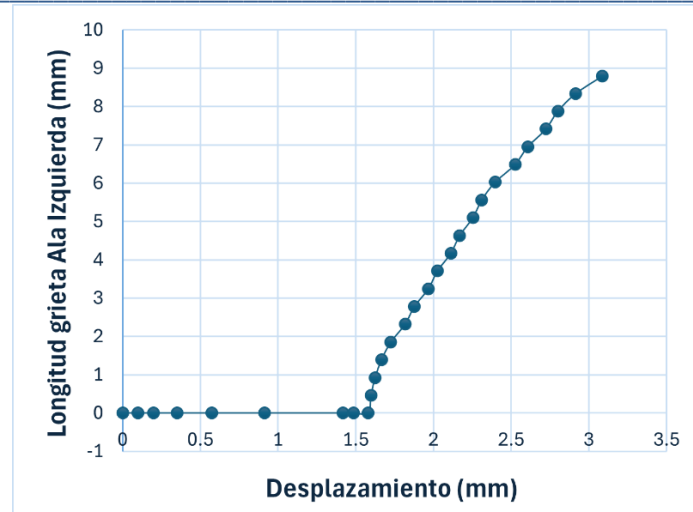


Figura 47. Longitud de grieta (a) frente desplazamiento.

6.2.6 Resultados de la correlación longitud de grieta-desplazamiento entre el ensayo experimental y el modelo numérico.

A continuación, como se representa en la Figura 48, se analiza la relación entre la longitud de grieta total y el desplazamiento para la probeta con teflón descentrado. En la gráfica se representan los resultados numéricos (línea negra continua) y los resultados experimentales de las dos pruebas (líneas discontinuas naranja y verde).

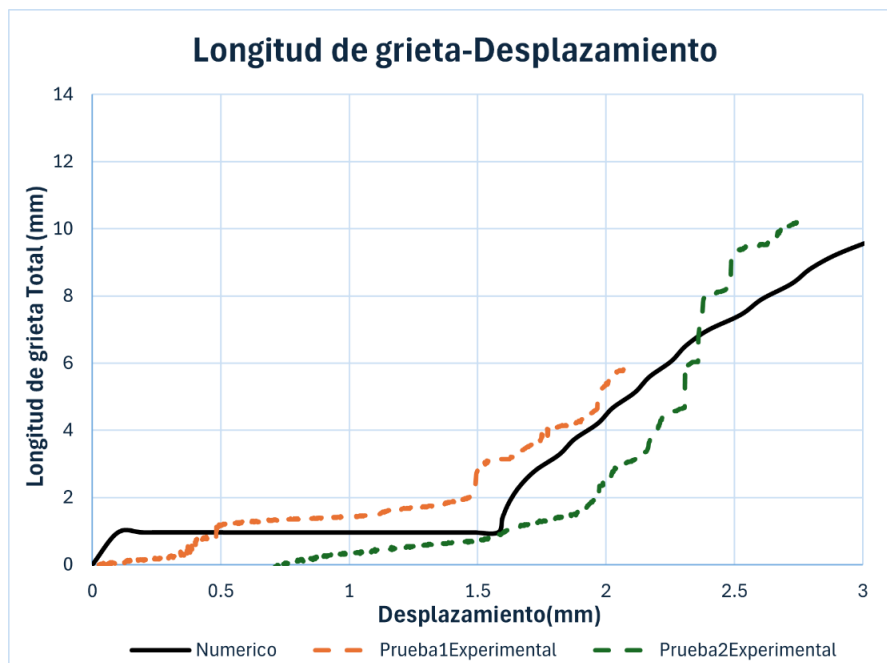


Figura 48. Comparativa longitud de grieta respecto al desplazamiento teflón 15 mm descentrado.

Inicialmente las tres curvas muestran un comportamiento lento o casi nulo de longitud de grieta, lo que indica una fase inicial sin un avance significativo de esta. El modelo

numérico predice con precisión esta fase inicial, manteniéndose cercano a las pruebas experimentales.

Cuando el desplazamiento aplicado sobre los rodillos es de 1.6 mm, el crecimiento de la grieta comienza de forma evidente. Con respecto al modelo numérico, la segunda prueba (curva naranja) muestra un crecimiento temprano y continuo de grieta, mientras que la segunda prueba (curva verde) tiene un retraso más pronunciado, antes de que la grieta comience a crecer significativamente. Estas diferencias podrían atribuirse a variaciones en la geometría de las probetas o a la variabilidad inherente a esta configuración de ensayo y de material. El modelo numérico, por su parte, predice un inicio más gradual del crecimiento de la grieta, lo que refleja el comportamiento idealizado del material que no considera imperfecciones. Finalmente, la grieta de la primera prueba experimental (curva naranja) se propaga hasta prácticamente 6 mm, momento en el que se empieza a observar delaminación entre otras capas diferentes a la capa central y que, por lo tanto, quedan fuera del objeto de este estudio. En cambio, la grieta de la segunda prueba (curva verde) propaga hasta 10 mm. En resumen, tanto las curvas experimentales como la numérica siguen la misma tendencia, demostrando que el modelo se comporta adecuadamente con la suficiente precisión dentro de la variabilidad del ensayo.

6.2.7 Análisis de la tasa de liberación de energía de deformación y modos de fractura

Por último, se realizará el análisis de la mecánica de fractura, es decir, la evolución de los modos de fractura G_I , G_{II} , así como su combinación con la energía equivalente G_{equiv} , a lo largo de la longitud de la probeta. El análisis se centrará en la propagación de la grieta del ala izquierda, sin embargo, también se analizará el frente de grieta del ala derecha, obteniendo así una visión más completa del comportamiento del material. En la Figura 50 se representan estos frentes de grieta.

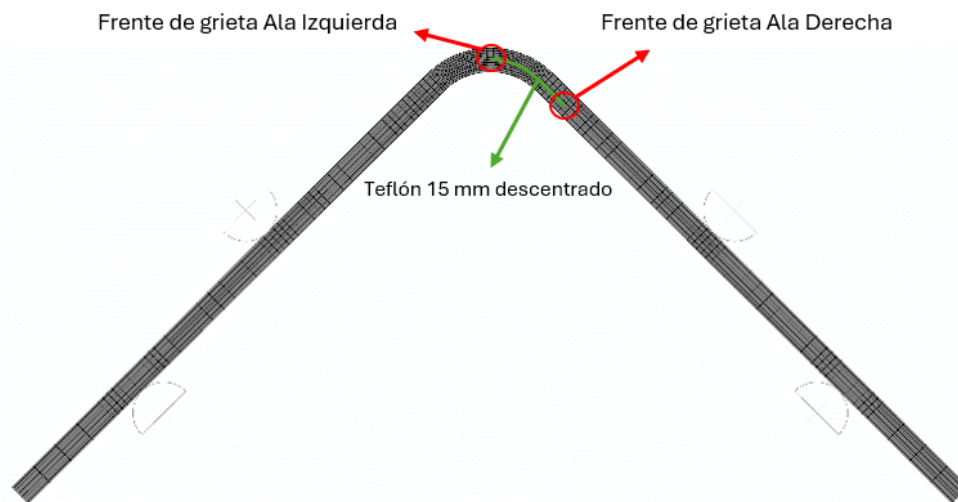


Figura 49. Representación frentes de grieta ala derecha y ala izquierda.

En este modelo de teflón de 15 mm descentrado es importante destacar que, debido a la geometría y la presencia inicial del teflón, se presentan dos frentes de grieta. Uno en el centro de la probeta, el cual progresa hacia el ala izquierda, y otro en el extremo del teflón del ala derecha.

Para este análisis se han realizado en la Figura 50 las curvas G_I , G_{II} , G_{equiv} frente a la longitud de grieta. Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo. A Tabla A 3.

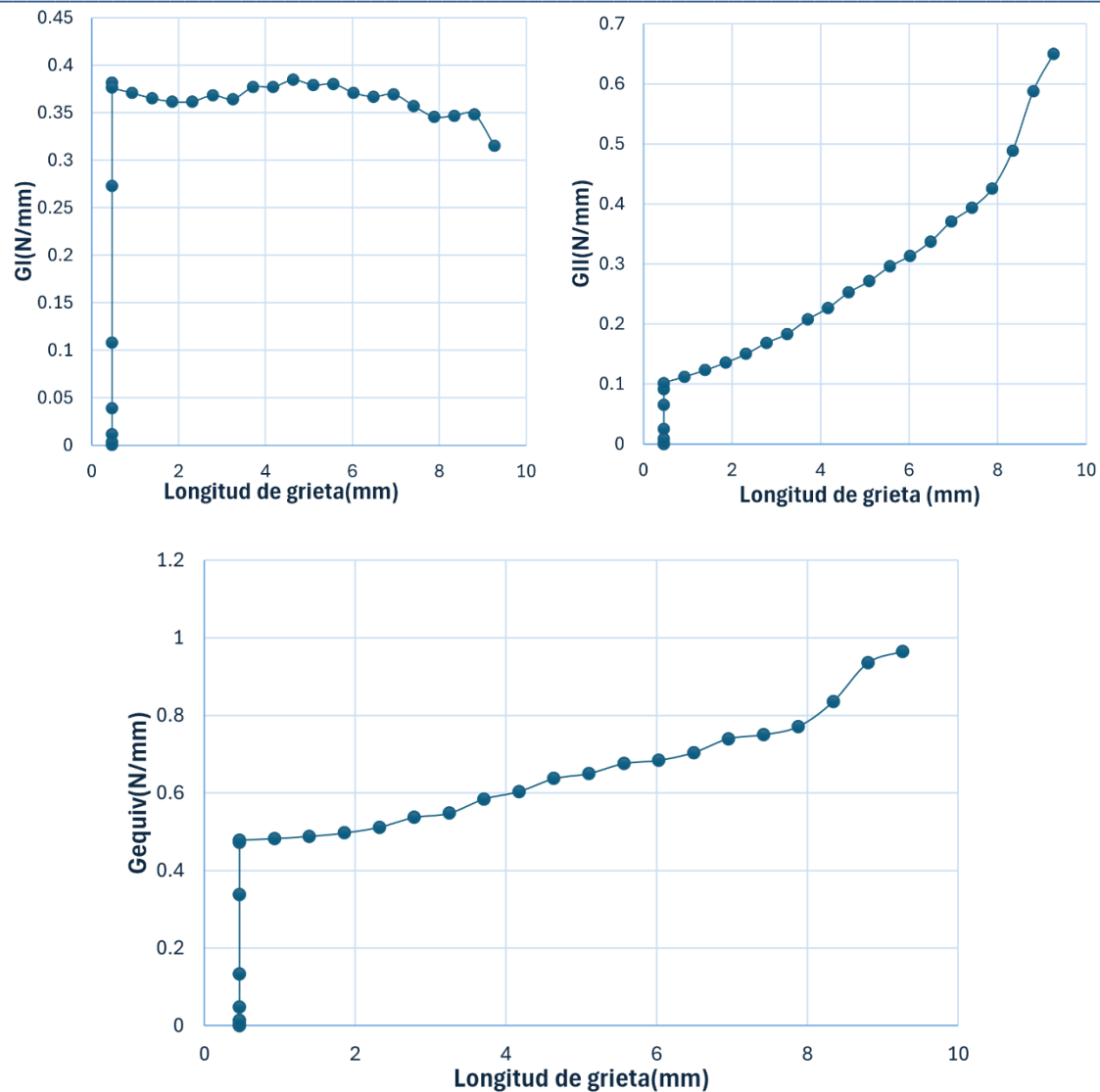


Figura 50. Tasa de liberación de energía de deformación en modo I, modo II y equivalente, frente a la longitud de grieta para el ala izquierda.

En la gráfica de arriba a la izquierda se representa G_I (tasa de liberación de energía de deformación en modo I). En ella podemos ver cómo G_I alcanza 0.38 N/mm, pero cuando la grieta comienza a progresar, se aprecia que G_I , cuando alcanza una longitud de grieta de 9.5 mm y un desplazamiento de 3 mm, muestra una tendencia descendente. Esto indica que el Modo I se reduce con el avance de la grieta, debido al cambio en la redistribución de tensiones en la probeta. Al propagarse la grieta, las tensiones concentradas en la punta de grieta se redistribuyen a lo largo de la probeta, aliviando así las tensiones perpendiculares, responsables del Modo I (apertura), y comenzando a tener más importancia el Modo II (deslizamiento), generado por fuerzas de cizalladura. Este comportamiento se puede apreciar en la Figura 50, en la gráfica de arriba a la derecha. Cuando la grieta comienza a propagarse, G_{II} (Modo II) inicia con un valor de 0.1 N/mm

pero, a medida que la grieta avanza, este valor sigue una tendencia ascendente alcanzando 0.65 N/mm cuando la longitud de grieta es 9.5 mm.

Por último, en la gráfica inferior de la Figura 50, se observa que la curva G_{equiv} está inicialmente dominada por el modo I (G_I) siendo 0.48 N/mm, aunque conforme esta avanza, el modo II (G_{II}) adquiere mayor relevancia, convirtiéndose en el mecanismo predominante, al alcanzar el valor de 0.96 N/mm. La curva G_{equiv} refleja claramente esta transición entre los modos de fractura a lo largo de la propagación de la grieta.

Con la intención de identificar el punto de fractura crítica, además de evaluar la dominancia de los modos de fractura y comparar el comportamiento de ambos frentes de grieta, se representa la tasa de liberación de energía de deformación equivalente (G_{equiv}) frente al ratio de modo mixto (G_{II}/G_T). Esto se muestra en la Figura 51.

Los valores numéricos de esta curva pueden consultarse en el Anexo. A Tabla A 3

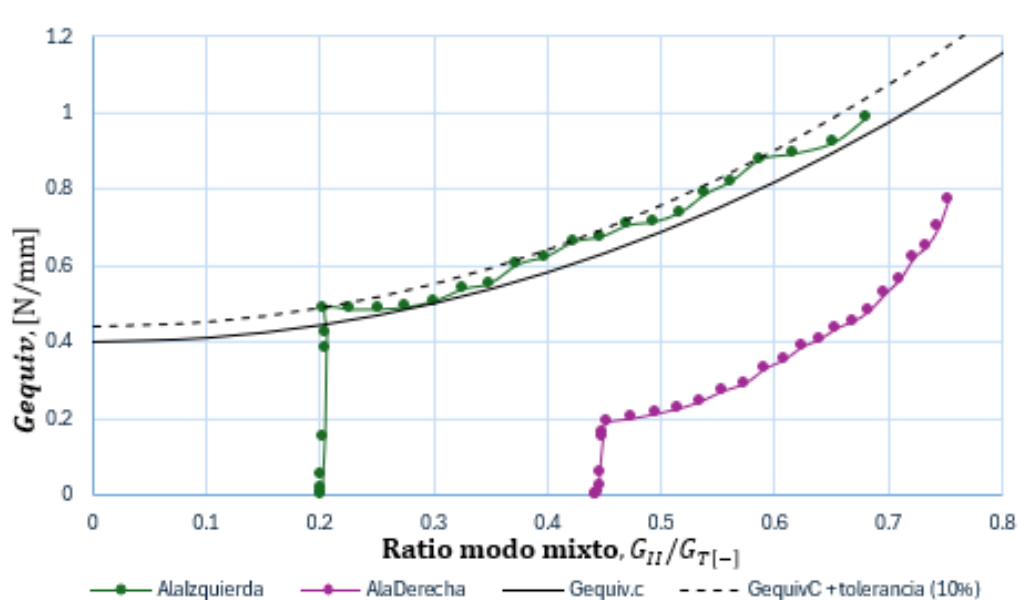


Figura 51. Tasa de liberación de energía de deformación equivalente frente al ratio modo mixto.

En esta gráfica se observa la evolución de ambos frentes de grieta. La línea verde representa el frente de grieta del centro de la probeta, el cual se propaga hacia el ala izquierda, y la línea morada el frente de grieta del ala derecha. Estos se comparan con la línea negra ($G_{equiv,c}$), que indica el valor crítico de energía necesario para que ocurra la fractura y la tolerancia que se ha introducido en Abaqus (+10%), representada por la línea discontinua negra.

En ambos casos (ala derecha e izquierda), los puntos iniciales se encuentran por debajo de la línea crítica ($G_{equiv,c}$) lo que indica que las grietas aún no alcanzan la energía

necesaria para propagarse. En el ala izquierda, la curva G_{equiv} frente la ratio modo mixto, presenta un aumento rápido, indicando un inicio acelerado en la acumulación de energía de fractura. La curva muestra cómo la grieta en el ala izquierda empieza a progresar cuando G_{equiv} alcanza un valor de 0.42 N/mm y el ratio de modo mixto es 0.2. Esto ocurre en el punto donde la curva cruza la línea negra que representa $G_{equiv,c}$. En cambio, en el ala derecha, G_{equiv} aumenta de manera más progresiva, lo que refleja un proceso de acumulación gradual de energía de fractura. Esta curva se va acercando a la $G_{equiv,c}$, pero no llega a alcanzarla, por lo que no se produce propagación de grieta hacia el ala derecha.

7 CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El auge de los materiales compuestos, en sectores como la aeronáutica, junto con la necesidad de tratar de evitar y prevenir sus fallos con la aparición de grietas o defectos, me ha llevado a la realización de este trabajo. Este proyecto se centra en el estudio a fractura de una probeta de viga curva fabricada con fibra de carbono y resina epoxi, en el que se presenta una nueva configuración de ensayo de propagación de grietas, siguiendo la normativa ASTM D6415. Para ello, se ha introducido un teflón de 15 mm descentrado representando una grieta preexistente para ver cómo ésta se propaga. Se llevaron a cabo dos ensayos experimentales con una máquina universal de ensayos, aplicando un desplazamiento de 5mm sobre la probeta, y simulaciones numéricas utilizando la Técnica de Cierre Virtual de Grieta (VCCT) en el software de elementos finitos Abaqus 2024, sometiendo las probetas a ensayos de flexión en cuatro puntos.

Para la realización del trabajo y el cumplimiento de los objetivos, se ha estudiado el manejo de la herramienta de simulación avanzada Abaqus 2024 para el análisis del modelo numérico, así como se ha obtenido conocimientos de técnicas de monitorización estructural de ensayos, como la correlación digital de imágenes. Tras el postprocesado de los resultados obtenidos, tanto numéricos como experimentales, se ha validado la estrategia de modelización desarrollada, mediante la comparativa entre los resultados de ambas técnicas. La curva fuerza-desplazamiento sin teflón presenta unos resultados muy satisfactorios, reflejando un estado puramente elástico en las probetas y confirmando tanto la homogeneidad del material como la ausencia de efectos secundarios significativos. En cuanto a la probeta con teflón de 15 mm descentrado, las curvas fuerza-desplazamiento y longitud de grieta-desplazamiento, muestran también un alto grado de semejanza. Por tanto, podemos confirmar de los resultados obtenidos, que el modelo desarrollado permite analizar con precisión el comportamiento real de la estructura y, de los ensayos en el laboratorio, la validación de las predicciones numéricas obtenidas mediante la simulación, que reproducen de manera satisfactoria la propagación de grieta del modelo bajo el caso de carga estudiado. Este nivel de precisión se ha logrado gracias al estudio y análisis de la mejor modelización, teniendo en cuenta la fuerza aplicada, la configuración de ensayo y la utilización de un teflón a modo de grieta preexistente.

El desarrollo de este trabajo ha sido una experiencia enriquecedora que me ha permitido adquirir valiosas enseñanzas y crecer tanto a nivel personal como profesional, cumpliendo los objetivos propuestos. En especial, destaco el aprendizaje avanzado en el uso del software Abaqus 2024 para la realización de simulaciones de elementos finitos, pudiendo implementar técnicas avanzadas como el uso de par de contacto o el método VCCT. También he tenido la oportunidad de participar en ensayos experimentales en el laboratorio, aprendiendo cómo se adquieren y analizan los datos obtenidos, donde he desarrollado habilidades para poder configurar y ejecutar dichas pruebas conforme a una normativa. Además, he presenciado y comprendido el proceso de fabricación de probetas de material compuesto, entendiendo la metodología a seguir. Por lo que considero superados los objetivos y expectativas planteadas al iniciar este trabajo.

La realización de este trabajo ha llevado a plantear posibles trabajos futuros, con el objetivo de ampliar y profundizar en el estudio de la propagación de grietas en materiales compuestos. Se propone extender el estudio al análisis de fatiga en estos materiales. Este enfoque permitiría evaluar el comportamiento del material bajo cargas cíclicas, esencial en ámbitos como la aeronáutica. Los ensayos experimentales a largo plazo en este ámbito permitirían obtener un conocimiento más detallado sobre la durabilidad y la resistencia de estos materiales. Asimismo, se plantea el uso de nuevas localizaciones y longitudes de teflón, cambiar la orientación de las fibras del material o modificar la configuración del ensayo para posibles futuros trabajos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. enlace, Facebook, X, Pinterest, C. electrónico, y O. aplicaciones, «La Revolución de la Tecnología de Materiales Compuestos en Aviones». Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rumboaeronautico.com/2024/08/la-revolucion-de-la-tecnologia-de.html>
- [2] D. R. Angulo, «Análisis del comportamiento a tracción interlaminar de laminados de carbono», 2016.
- [3] L. S. A. Maya y L. V. Useche, «Falla de los materiales compuestos laminados», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 25, 2004.
- [4] G. R. Irwin, «Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys», 1956.
- [5] A. Griffith, «The phenomena of rupture and flow in solids», 1997.
- [6] Naciones Unidas, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [7] ASTM international, «D6415/D6415M -Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite».
- [8] J. L. A. Bilbao, «Mecánica de fractura», *Serv. Editor. Univ. País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatearen Argit. Zerb. EBooks*, ene. 2002, Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/116809272/Mec%C3%A1nica_de_fractura
- [9] *FUNDAMENTOS DE CIENCIA DE MATERIALES*. Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mlaz.webs.ull.es/Pages/tema%203.htm>
- [10] «Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 4, pp. 439-449, ene. 1996, doi: 10.1016/0266-3538(96)00005-X.
- [11] «Tasa de liberación de energía ASTM D5528 | ASTM D7905 | ASTM D6671», Tasa de liberación de energía ASTM D5528 | ASTM D7905 | ASTM D6671. Accedido: 22 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/composites/tasas-de-liberacion-de-energia-g/>
- [12] L. Pérez Casado, «Evaluación numérica del efecto de las sobrecargas en el crecimiento de grieta a fatiga», *Trab. Fin Grado*, oct. 2017, Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/18099>
- [13] Unknown, «MATERIALES DE INGENIERIA: MATERIALES COMPUESTOS, FIBRA DE VIDRIO Y FIBRA DE CARBONO», MATERIALES DE INGENIERIA. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://materialesdeingenieria2013.blogspot.com/2013/05/materiales-compuestos-fibra-de-vidrio-y.html>
- [14] M. P. Castro, «EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAMINADOS DE MATERIAL COMPUESTO CON UN CONCENTRADOR DE TENSIONES SOMETIDOS A CARGAS DE COMPRESIÓN», Trabajo Fin de Grado, Universidad Carlos III Madrid.
- [15] vestaliablog, «¿Qué es la fibra de carbono y para qué sirve?», Vestalia. Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://vestalia.es/actualidad/que-es-la-fibra-de-carbono-y-para-que-sirve/>

- [16] Metal Actual, «Fibra De Carbono. Presente Y Futuro De Un Material Revolucionario (1)», dic. 2023. Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/fibra-de-carbono.-presente-y-futuro-de-un-material-revolucionario-1>
- [17] «VIC-2D Digital Image Correlation», Correlated Solutions Digital Image Correlation. Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-2d>
- [18] «Crack Opening Displacement (COD) gauges». Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.instron.com/es-es/products/testing-accessories/extensometers/crack-opening-displacement-cod-gauges>
- [19] «02 - Capítulo 2. El metodo de elementos finitos - PFC: Análisis del efecto de la tensión fuera del - Studocu». Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-autonoma-juan-misael-saracho/obras-hidraulicas/02-capitulo-2-el-metodo-de-elementos-finitos/63394516>
- [20] «ABAQUS documentation collection 2024».
- [21] M. Montemurro, M. I. Izzi, J. El Yagoubi, y D. Fanteria, «Least-weight composite plates with unconventional stacking sequences: Design, analysis and experiments», *J. Compos. Mater.*, vol. 53, ene. 2019, doi: 10.1177/0021998318824783.
- [22] Hexply_M21/34%/UD194/IMA-12K, «Hoja de datos de prepegs | Hexcel». Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>

ANEXOS

ANEXO A. Tablas de resultados del análisis numérico

Desplazamiento	Frodillo1	Frodillo2	Fcomp	Fcomp/w
0	0	0	0	0
0.1	9.68265	7.63816	17.32081	0.6928324
0.2	23.8384	18.6433	42.4817	1.699268
0.35	43.9159	34.203	78.1189	3.124756
0.575	83.6551	66.4223	150.0774	6.003096
0.9125	141.571	109.849	251.42	10.0568
1.41875	236.783	185.3	422.083	16.88332
1.48523	249.853	194.749	444.602	17.78408
1.57998	262.882	207.706	470.588	18.82352
1.598	258.991	206.275	465.266	18.61064
1.62504	258.511	204.666	463.177	18.52708
1.66559	263.542	205.38	468.922	18.75688
1.72642	271.456	208.787	480.243	19.20972
1.81767	284.191	215.144	499.335	19.9734
1.87775	287.081	231.316	518.397	20.73588
1.96788	313.894	243.085	556.979	22.27916
2.02573	324.463	247.286	571.749	22.86996
2.11251	339.304	255.897	595.201	23.80804
2.16907	347.622	259.022	606.644	24.26576
2.25391	360.222	265.853	626.075	25.043
2.31109	365.409	270.224	635.633	25.42532
2.39687	376.401	276.317	652.718	26.10872
2.52553	389.514	302.543	692.057	27.68228
2.60709	414.743	313.801	728.544	29.14176
2.72361	435.12	328.26	763.38	30.5352
2.80026	445.136	336.4	781.536	31.26144
2.91523	461.074	349.43	810.504	32.42016
3.08768	485.382	368.788	854.17	34.1668
3.19778	503.634	381.817	885.451	35.41804
3.36293	546.829	426.079	972.908	38.91632
3.39487	544.978	430.199	975.177	39.00708
3.4165	540.038	433	973.038	38.92152
3.44894	537.25	437.753	975.003	39.00012
3.49759	537.513	444.739	982.252	39.29008
3.57058	539.973	454.702	994.675	39.787
3.68006	532.517	459.553	992.07	39.6828
3.75336	535.409	471.389	1006.798	40.27192
3.86332	542.671	488.617	1031.288	41.25152
3.93665	542.735	500.485	1043.22	41.7288
4.04664	546.574	517.384	1063.958	42.55832
4.11783	580.569	550.176	1130.745	45.2298
4.16604	583.8	548.214	1132.014	45.28056
4.23834	593.024	547.354	1140.378	45.61512
4.2875	595.962	537.532	1133.494	45.33976
4.36126	590.313	557.297	1147.61	45.9044
4.47188	596.966	554.368	1151.334	46.05336
4.63782	592.242	593.282	1185.524	47.42096
4.88673	604.598	605.782	1210.38	48.4152
5.26009	623.028	624.376	1247.404	49.89616

Tabla A 1. Valores Teflón 15mm descentrado fuerza-desplazamiento Abaqus.

Desplazamiento	Frodillo1	Frodillo2	Fcomp	Fcomp/w
0	0	0	0	0
0.1	10.8439	10.8624	21.7063	0.868252
0.2	26.6108	26.6782	53.289	2.13156
0.35	48.8628	48.9943	97.8571	3.914284
0.575	91.6119	91.88	183.4919	7.339676
0.9125	153.161	153.604	306.765	12.2706
1.41875	250.644	251.372	502.016	20.08064
2.17812	399.423	399.043	798.466	31.93864
3.31719	660.18	660.543	1320.723	52.82892
3.74434	779.77	780.423	1560.193	62.40772
4.38506	917.823	918.818	1836.641	73.46564
4.62533	1019.58	1020.81	2040.39	81.6156
4.98574	1114.15	1115.6	2229.75	89.19
5.52635	1216.06	1217.51	2433.57	97.3428

Tabla A 2. Valores Sin Teflón fuerza-desplazamiento Abaqus.

Teflon15Descentrada	AlaIzquierda	AlaDerecha	Probeta total
Desplazamiento	Longitud de grieta (ai)	Longitud de grieta(ad)	Longitud de grieta(at)
0	0	15	15
0.1	0	15	15
0.2	0	15	15
0.35	0	15	15
0.575	0	15	15
0.9125	0	15	15
1.41875	0	15	15
1.48523	0	15	15
1.57998	0	15	15
1.598	0.463157	15	15.463157
1.62504	0.926916	15	15.926916
1.66559	1.390626	15	16.390626
1.72642	1.854276	15	16.854276
1.81767	2.317856	15	17.317856
1.87775	2.781386	15	17.781386
1.96788	3.244816	15	18.244816
2.02573	3.708186	15	18.708186
2.11251	4.171476	15	19.171476
2.16907	4.634706	15	19.634706
2.25391	5.097866	15	20.097866
2.31109	5.560966	15	20.560966
2.39687	6.024006	15	21.024006
2.52553	6.486956	15	21.486956
2.60709	6.949826	15	21.949826
2.72361	7.412586	15	22.412586
2.80026	7.875296	15	22.875296
2.91523	8.337906	15	23.337906
3.08768	8.800396	15	23.800396
3.19778	8.800336	15	23.800336
3.36293	9.262626	15	24.262626
3.39487	9.760196	15	24.760196
3.4165	10.257696	15	25.257696
3.44894	10.755296	15	25.755296
3.49759	11.252796	15	26.252796
3.57058	11.750296	15	26.750296
3.68006	12.247596	15	27.247596
3.75336	12.744996	15	27.744996
3.86332	13.242296	15	28.242296
3.93665	13.739596	15	28.739596
4.04664	14.236796	15	29.236796
4.11783	14.733996	15.49453	30.228526
4.16604	15.231196	16.100508	31.331704
4.23834	15.728296	16.839028	32.567324
4.2875	16.334196	17.739138	34.073334
4.36126	17.072496	17.739068	34.811564
4.47188	17.972396	18.835958	36.808354
4.63782	19.068996	18.835758	37.904754
4.88673	20.405496	20.172158	40.577654
5.26009	22.033996	21.800678	43.834674

Tabla A 3. Valores propagación de grieta Abaqus.

Teflon15Descentrada		Alalzquierda			
Desplazamiento	Modol	Modoll	Gequiv	GequivC	Ratio modo mixto
0	0	0	0	0	0
0.1	0.0006445	0.0001618	0.0008063	0.4445075	0.200638507
0.2	0.0038503	0.0009695	0.0048198	0.4447397	0.201148339
0.35	0.0129011	0.0032588	0.0161599	0.4449724	0.201657688
0.575	0.0439315	0.0111154	0.0550469	0.4450952	0.201925994
0.9125	0.120272	0.030753	0.151025	0.4458785	0.203628538
1.41875	0.306324	0.0790406	0.3853646	0.4465639	0.205106022
1.48523	0.338189	0.0874655	0.4256545	0.4467404	0.20548473
1.57998	0.389599	0.100136	0.489735	0.4462681	0.204469764
1.598	0.375252	0.110384	0.485636	0.4574855	0.227297812
1.62504	0.363914	0.122184	0.486098	0.4706606	0.251356722
1.66559	0.356351	0.135693	0.492044	0.4854587	0.275774118
1.72642	0.355457	0.152744	0.508201	0.501956	0.300558244
1.81767	0.363769	0.1757	0.539469	0.5202112	0.325690633
1.87775	0.360663	0.193474	0.554137	0.538639	0.349144706
1.96788	0.378289	0.225925	0.604214	0.5595658	0.373915533
2.02573	0.375541	0.248995	0.624536	0.5820035	0.398687986
2.11251	0.382546	0.280559	0.663105	0.6055955	0.423098906
2.16907	0.37381	0.302415	0.676225	0.6303465	0.447210618
2.25391	0.373687	0.332662	0.706349	0.6561363	0.470959823
2.31109	0.361992	0.353176	0.715168	0.6823061	0.493836413
2.39687	0.357295	0.382529	0.739824	0.7102012	0.517054056
2.52553	0.363134	0.424521	0.787655	0.737767	0.538968203
2.60709	0.359963	0.462118	0.822081	0.7682134	0.562131955
2.72361	0.362313	0.516067	0.87838	0.8031334	0.587521346
2.80026	0.342614	0.550363	0.892977	0.8447126	0.616323825
2.91523	0.32105	0.600342	0.921392	0.8984269	0.651559814
3.08768	0.314793	0.672464	0.987257	0.9459515	0.681143816
3.19778	0.314793	0.719188	1.033981	0.9699015	0.695552433
3.36293	0.303201	0.813088	1.116289	1.0264457	0.728384854
3.39487	0.290129	0.82881	1.118939	1.0483813	0.74071062
3.4165	0.294303	0.842708	1.137011	1.0491898	0.741160816
3.44894	0.282898	0.846875	1.129773	1.0644369	0.749597486
3.49759	0.270546	0.858671	1.129217	1.084248	0.760412746
3.57058	0.262057	0.881763	1.14382	1.1037304	0.770893148
3.68006	0.262045	0.934217	1.196262	1.122683	0.780946816
3.75336	0.254043	0.957599	1.211642	1.1406078	0.790331633
3.86332	0.25125	0.998157	1.249407	1.1571786	0.7989046
3.93665	0.243141	1.01563	1.258771	1.1726896	0.806842547
4.04664	0.239475	1.04837	1.287845	1.1869125	0.814049827
4.11783	0.229991	1.07659	1.306581	1.2067164	0.823974939
4.16604	0.216191	1.08643	1.302621	1.2270447	0.834033844
4.23834	0.21769	1.13506	1.35275	1.237332	0.839075956
4.2875	0.199923	1.13765	1.337573	1.2609498	0.850533018
4.36126	0.190573	1.15435	1.344923	1.2771565	0.858301925
4.47188	0.173247	1.17652	1.349767	1.3053565	0.871646736
4.63782	0.166263	1.21775	1.384013	1.3229592	0.879868903
4.88673	0.151668	1.27248	1.424148	1.3525303	0.893502642
5.26009	0.138373	1.35061	1.488983	1.3824294	0.907068785

Tabla A 4. Valores mecánica de fractura Ala Izquierda Abaqus.

ANEXO B. Implementación modelado de grieta con VCCT en Abaqus (Interactions)

En el módulo “interactions” se establecen las interacciones entre las regiones del modelo. Para definir la grieta se han seguido los siguientes pasos para aplicar el modelo VCCT:

En primer lugar, el modelado VCCT basado en superficies se aplica utilizando pares de contacto, por lo que hay que crear una propiedad de interacción de contacto (incluyendo las propiedades necesarias para el contacto VCCT). Las probetas (“probeta_inf”, “probeta_sup”) creadas anteriormente se utilizarán como superficies principal y secundaria. En este caso, la llamaremos “IntProp_VCCT”

1. En el árbol de modelo, haz doble-click en **Interaction Properties** y elige como tipo **Contact** para crear el contacto entre las probetas. Haz clic en **Continue**:
 - a. Define una propiedad de contacto sin fricción (**Mechanical**→**Tangential Behavior**) ya que consideramos que no hay rozamiento.

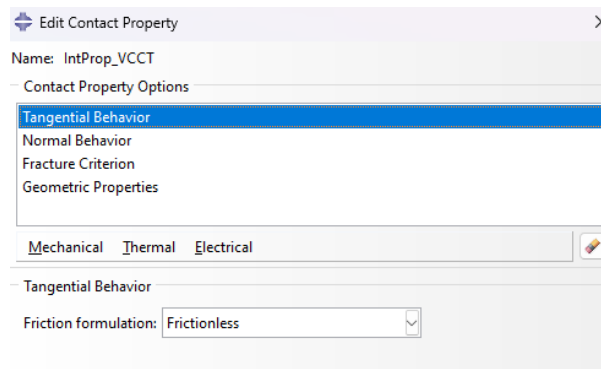


Figura 52. Tangential Behavior.

- b. Seleccionamos **Mechanical**→**Normal Behavior** y definimos el contacto como “*Hard Contact*”, es decir, que el programa detecte un choque entre ambas partes cuando éstas entren en contacto.

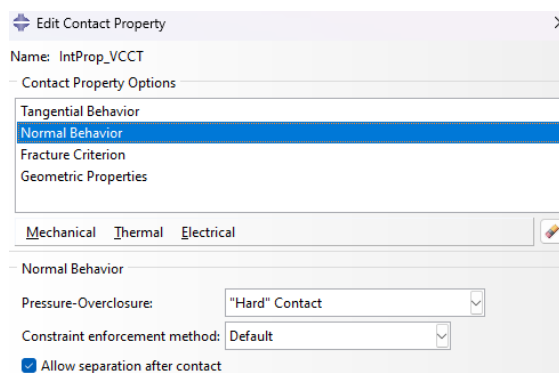


Figura 53. Normal Behavior .

- c. Seleccionamos **Mechanical**→**Fracture Criterion** para modelar la propagación de grieta, como podemos ver en la Figura 54.
 - i. Seleccionamos tipo VCCT.
 - ii. Seleccionamos BK como comportamiento de modo mixto.

- iii. Aplicamos una tolerancia (Tolerance) de 0.1, que es más conservadora que la recomendada por Abaqus en este análisis de 0.2.
- iv. Añadimos los valores de tenacidad a la fractura para los diferentes modos de fractura. (Modo I=0.4, Modo II y III=1.6 y exponente $n=2.051$)

Fracture Criterion

Type: VCCT

Direction of crack growth relative to local 1-direction: Maximum tangential stress

Note: Crack growth direction is applicable only for enriched region in Abaqus/Standard

Mixed mode behavior: BK

Tolerance: 0.1

Viscosity: 0

☐ Specify tolerance for unstable crack propagation:

☒ Default ☐ Specify value:

Benzeggagh-Kenane

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Critical energy release rate			Exponent n
Mode I	Mode II	Mode III	
0.4	1.6	1.6	2.051

Figura 54. Fracture Criterion.

- d. Especificamos el espesor (*out-of-plane thickness*) como 25mm correspondiendo con el espesor de la probeta (**Mechanical**→ **Geometric Properties**)

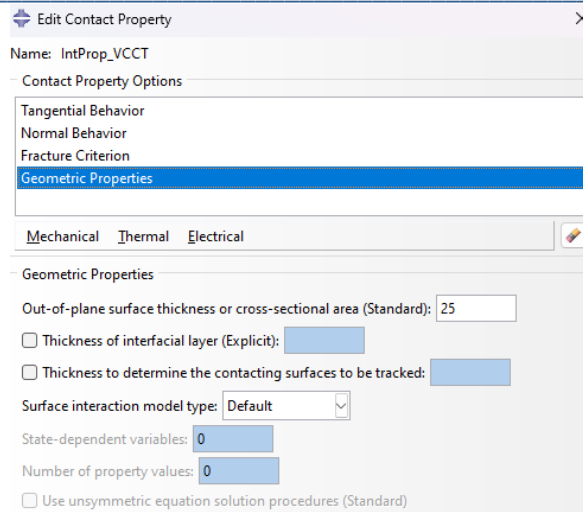


Figura 55. Geometric Properties.

Una vez configuradas las propiedades necesarias, procedemos a crear la interacción.

2. Expandimos en el Árbol del Modelo, **Step Inicial** → **Interaction** y se llama “*Contacto_Probetas*”.
 - a. Seleccionamos **Surface-to-surface contact** para crear el contacto entre las superficies.
 - b. A continuación, hay que seleccionar las superficies de contacto. Asignaremos “probeta_sup” como la superficie principal ya que es sobre la que se aplica la carga, y “probeta_inf” como la superficie secundaria.
 - c. Dentro del cuadro de dialogo (ver Figura 56) clicamos en **Small sliding**, ya que las superficies en contacto se desplazan ligeramente entre sí, es decir, las deformaciones relativas son pequeñas en comparación con las dimensiones de contacto.
 - d. **Node-to-surface**
 - e. Finalmente, en la sección **Bonding**, hay que seleccionar la superficie de contacto. Como se han realizado diferentes casos, en este paso es donde se cambia de un teflón a otro. En la Figura 56, se observa que ponemos el teflón de 15mm descentrado (*S_p15descentrada_inf*)

Nota: Resto de parámetros por defecto.

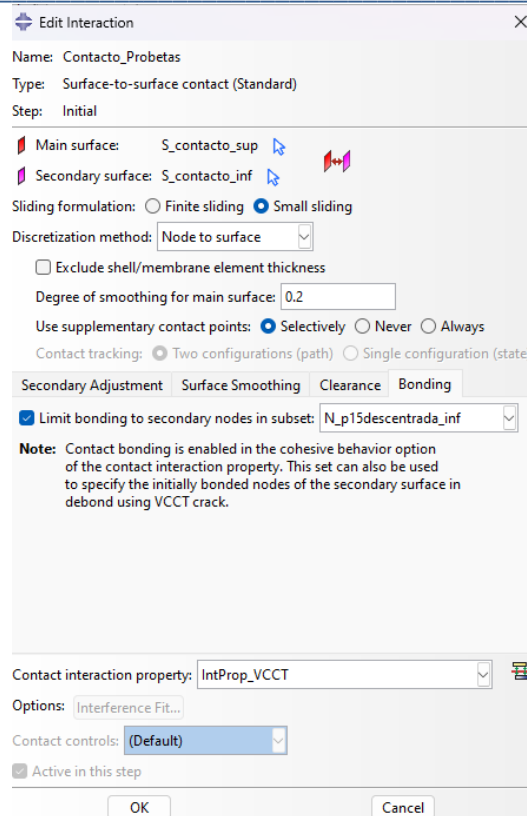


Figura 56. Interacción entre las superficies de contacto.

Finalmente, definimos y creamos la grieta.

3. Desde el menú principal, seleccionamos **Special** → **Crack** → **Create**
 - a. Seleccionamos tipo **Debond using VCCT**, ya que utilizamos el modelo VCCT
 - b. Seleccionamos **Step Initial** y la interacción de contacto que hemos creado "Contacto_Probeta"

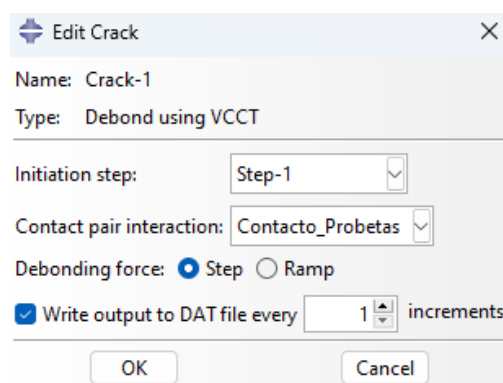


Figura 57. Creación de la grieta.

Por otro lado, también hay que realizar el contacto y las interacciones entre las probetas y rodillos, de la misma manera que en el caso de las probetas. Se ha modelado cada rodillo individualmente, los rodillos superiores en contacto con la "probeta_sup" y los rodillos inferiores con la "probeta_inf". Como los rodillos son los que aplican la carga, se consideran los rodillos como superficies principales y las probetas como superficies secundarias.