



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DELAMINACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO REFORZADO

Alumno: Pablo José Rabaza Jiménez

Tutor: Prof. D. Juan Antonio Almazán Lázaro

Tutor: Prof. D. Luis Antonio Felipe Sesé

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio 2024

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanas, por su paciencia y apoyo en estos años de carrera.

A mis tutores D. Juan Antonio Almazán y D. Luis Felipe Sesé por dedicar su tiempo a este proyecto y aportarme todos los conocimientos necesarios para su realización.

También agradecer el apoyo técnico y humano del Centro de Instrumentación CientíficoTécnica (CICT) de los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Jaén (UJA, MICINN, Junta de Andalucía, FEDER).

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	3
2	Objetivos	8
3	Fundamentos teóricos	9
3.1	Materiales compuestos	9
3.1.1	Concepto	9
3.1.2	Refuerzo	10
3.1.3	Matriz	17
3.1.4	Unión Fibra-Matriz	22
3.2	Procesos de fabricación materiales compuestos	23
3.2.1	Manual	24
3.2.2	Vacío	24
3.2.3	Infusión por vacío	25
3.3	Tipos de fallos de materiales compuestos	25
3.3.1	Agrietamiento de la matriz	25
3.3.2	Fractura de fibras	26
3.3.3	Delaminación	27
3.3.4	Desalineación de fibras	28
3.3.5	Micropandeo de las fibras	29
3.4	Refuerzos tridimensionales en materiales compuestos	30
3.4.1	Stitching	30
3.4.2	Weaving	32
3.4.3	Braiding	34
3.4.4	Knitting	36
3.4.5	Bridging	38
3.5	Propagación de grieta y delaminación	39
3.6	Tasa de liberación de energía	40

4	Metodología y Fabricación.....	42
4.1	Metodología de ensayo.....	42
4.2	Materiales y herramientas.....	46
4.2.1	Fibra y resina.....	46
4.2.2	Herramientas.....	47
4.2.3	Componentes de la fabricación.....	49
4.2.4	Elementos adicionales.....	53
4.3	Equipamiento.....	54
4.3.1	Bomba de vacío.....	54
4.3.2	Cortadora por chorro de agua.....	55
4.3.3	Máquina de ensayo universal industrial.....	56
4.3.4	Cámara industrial digital.....	57
4.3.5	Microscopio digital.....	57
4.4	Fabricación.....	58
5	Resultados.....	76
5.1	Dimensiones de las probetas.....	76
5.2	Secuencia del ensayo de delaminación.....	78
5.3	Análisis gráfico de los resultados.....	79
5.4	Análisis microscópico de la estructura del material.....	88
5.5	Ensayo a tracción hilos.....	91
6	Conclusiones.....	93
7	Propuestas de estudios futuros.....	94
8	Anexo I: Gráficas individuales de cada probeta.....	95
9	Referencias Bibliográficas.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de materiales de un Boeing 787 [3]	3
Figura 2. Opus caementicium usado para unir grandes piedras en el interior del coliseo [2] 3	
Figura 3. Supermarine Spitfire, avión de la Segunda Guerra Mundial con partes hechas de fibra de vidrio	4
Figura 4. Módulo de la estación espacial internacional con piezas y revestimientos de fibra de carbono.	5
Figura 5. Probeta de Yute.	6
Figura 6. Pontón lateral de un coche de Fórmula 1 de fibra de carbono tras un choque.....	6
Figura 7. Representación gráfica de la composición de un material compuesto [7].	9
Figura 8. Comparación de las características específicas de diferentes fibras. [5]	10
Figura 9. Disposición de fibras. [8]	11
Figura 10. Microfotografía de fibra de vidrio. [9].....	12
Figura 11. Tejido unidireccional (izquierda), MAT de hilos cortados (centro), roving (derecha)	14
Figura 12. Fibra de carbono proveniente de PAN.....	14
Figura 13. Roving y tejido de carbono	15
Figura 14. Tipos de láminas. [5].....	16
Figura 15. Esquema de material compuesto reforzado con partículas	17
Figura 16. Diagrama σ - ϵ de la resina poliéster [8].	19
Figura 17. Diagrama σ - ϵ de la resina epoxi [8].	20
Figura 18. Proceso de curado de resina [8].	22
Figura 19. Esquema de los materiales compuestos [13].....	22
Figura 20. Tipos de unión refuerzo-matriz [11]	23
Figura 21. Proceso de fabricación manual de materiales compuestos. [22].....	24
Figura 22. Proceso de fabricación por vacío de materiales compuestos [23].....	24
Figura 23. Proceso de fabricación de infusión por vacío de materiales compuestos [24].	25
Figura 24. Ejemplos de grietas por fatiga en los bordes libres de las probetas [26].	26
Figura 25. Fractura de fibras en materiales compuestos [27].	26
Figura 26. Delaminación de un material en un ensayo de fractura interlaminar [28].	27
Figura 27. Desalineación del material en el proceso de preimpregnado [34].....	28
Figura 28. Orientación de las fibras en ondas/arrugas, pliegues, ondulaciones y desalineaciones [34].	29
Figura 29. Micropandeo de fibras tras un ensayo a compresión [36].....	29
Figura 30. Esquema de patrón de cosido [37].	30
Figura 31. Variantes de puntada [8].	31
Figura 32. Diferentes disposiciones del stitching [8].	31
Figura 33. Cosido de una lámina de fibra de carbono.....	32
Figura 34. Telar tradicional [8].....	33

Figura 35. Diversos patrones en el tejido de materiales compuestos [8].	33
Figura 36. Configuraciones más comunes de tejidos tridimensionales [8].	34
Figura 37. Estructuras tridimensionales de fibra de vidrio [39].	34
Figura 38. Esquema trenzado 2D [42].	35
Figura 39. Estructuras obtenibles mediante braiding [8].	35
Figura 40. Esquema braiding con guía móvil [8].	36
Figura 41. Braiding con guía móvil [43].	36
Figura 42. Tejido de punto (a) y tejido de urdimbre (b) [8].	37
Figura 43. Proceso de tejido [8].	37
Figura 44. Piezas obtenidas mediante knitting [8].	37
Figura 45. Representación esquemática de bridging en un ensayo de delaminación [44].	38
Figura 46. Comparación entre un material sin presencia de bridging y otro con él [47].	38
Figura 47. Modo I [48].	39
Figura 48. Modo II [48].	39
Figura 49. Modo III [48].	40
Figura 50. Incremento de longitud da de la grieta [49].	40
Figura 51. Configuración escogida para el material.	42
Figura 52. Probetas de doble viga en voladizo [4].	43
Figura 53. Dimensiones bisagras de piano [50].	44
Figura 54. a) Probeta con una grieta. b) Probeta con dos grietas.	45
Figura 55. Rollos de fibra de vidrio unidireccional (izquierda) y tipo MAT (derecha).	46
Figura 56. Resina poliéster y catalizador.	46
Figura 57. Tijeras.	47
Figura 58. Aguja e hilo.	47
Figura 59. Báscula.	48
Figura 60. Adhesivo Araldite extra fuerte.	48
Figura 61. Tubo de polietileno.	49
Figura 62. Conectores de vacío.	49
Figura 63. Masilla de sellado.	50
Figura 64. Bolsa de vacío.	50
Figura 65. Film sangrador.	51
Figura 66. Canal de velocidad.	51
Figura 67. Tejido peel-ply.	52
Figura 68. Cera sólida.	52
Figura 69. Film separador.	53
Figura 70. Bisagras de piano.	53
Figura 71. Bomba de vacío.	54
Figura 72. Especificaciones técnicas de la bomba de vacío.	54
Figura 73. Cortadora TCI Cutting BP-C 1515.	55
Figura 74. Máquina de ensayo universal Instron 5967.	56

Figura 75. Esquema máquina de ensayo [55].	56
Figura 76. Cámara AVT Mako U-130B.	57
Figura 77. Microscopio digital PCE-MM200.	57
Figura 78. Corte láminas.	58
Figura 79. Láminas de fibra de vidrio.	58
Figura 80. Esquema del material con una grieta (izquierda) y dos grietas (derecha).	59
Figura 81. Disposición final del laminado.	59
Figura 82. Esquema cosido material con una grieta.	60
Figura 83. Esquema cosido material con dos grietas.	60
Figura 84. Sistema de iluminación usado en el cosido.	61
Figura 85. Visualización del material tras la instalación del sistema lumínico.	61
Figura 86. Proceso de cosido.	62
Figura 87. Resultado de una pieza tras el cosido.	62
Figura 88. Disposición del laminado en la fabricación.	63
Figura 89. Disposición final del laminado previo a la colocación de la bolsa de vacío.	64
Figura 90. Colocación de la bolsa de vacío tras la aplicación de vacío [13].	64
Figura 91. Comienzo de colocación de la bolsa de vacío.	65
Figura 92. Pliegues en la bolsa de vacío.	65
Figura 93. Sellado de la incisión realizada con los conectores.	66
Figura 94. Bolsa preparada previo a la aplicación de vacío.	66
Figura 95. Prueba de vacío para verificar un correcto sellado.	67
Figura 96. Esquema del proceso de infusión por vacío.	67
Figura 97. Preparación de la mezcla de resina y catalizador.	68
Figura 98. Piezas solidificadas tras 24 horas.	69
Figura 99. Eliminación del film sangrador (izquierda) y peel-ply (derecha).	69
Figura 100. Laminado terminado.	70
Figura 101. Esquema de las probetas con una grieta con sus respectivos códigos.	70
Figura 102. Esquema de las probetas con dos grietas con sus respectivos códigos.	71
Figura 103. Proceso de corte de las láminas.	71
Figura 104. Adhesivos escogidos para la prueba.	72
Figura 105. Ensayo de prueba de los adhesivos.	72
Figura 106. Probetas a ensayar obtenidas tras el corte.	73
Figura 107. Probetas preparadas para el pintado.	73
Figura 108. Probetas tras el pintado.	74
Figura 109. Pegado de las bisagras.	74
Figura 110. Marcas realizadas a las probetas para monitorizar el avance de grieta.	75
Figura 111. Probetas preparadas para el ensayo.	75
Figura 112. Puntos donde se han tomado los datos.	76
Figura 113. Secuencia del ensayo de delaminación. δ simboliza el desplazamiento de apertura de grieta.	79

Figura 114. Poro en la estructura interna de una de las probetas.	88
Figura 115. Poro en la superficie de una de las probetas.	88
Figura 116. Negativo de las cuerdas de sujeción de las fibras.	89
Figura 117. Cuerdas de sujeción de las fibras.	89
Figura 118. Grieta inicial en la probeta.	90
Figura 119. Hilo seccionado tras el ensayo.	90
Figura 120. Final de grieta.	90
Figura 121. Probeta con diez hilos impregnados en resina.	91

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultados de fuerza frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).....	80
Gráfica 2. Resultados de fuerza frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).....	81
Gráfica 3. Resultados de longitud de grieta frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).....	82
Gráfica 4. Resultados de longitud de grieta frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).....	83
Gráfica 5. Resultados de tasa de liberación de energía por deformación frente a longitud de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).....	84
Gráfica 6. Resultados de tasa de liberación de energía por deformación frente a longitud de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).....	85
Gráfica 7. Representación gráfica de la energía total liberada por deformación.....	87
Gráfica 8. Resultados individuales de la probeta G1U1	87
Gráfica 9. Fuerza-Desplazamiento de apertura ensayo de los hilos.....	91
Gráfica 10. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G1UN.	95
Gráfica 11. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G1SN.	96
Gráfica 12. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G2UN.	97
Gráfica 13. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G2SN.	98
Gráfica 14. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G1UN....	99
Gráfica 15. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G1SN. .	100
Gráfica 16. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G2UN..	101
Gráfica 17. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G2SN. .	102

Resumen

La importancia actual de los materiales compuestos no puede subestimarse, ya que se han convertido en componentes clave en diversas industrias debido a sus capacidades, como su alta resistencia, bajo peso y versatilidad. Estos materiales están revolucionando sectores como la aeronáutica, la automoción y la construcción, ofreciendo soluciones avanzadas que antes eran impensables.

El objeto de este proyecto es evaluar la resistencia a la delaminación de materiales compuestos de fibra de vidrio reforzados con resina poliéster, analizando el efecto de añadir un refuerzo tridimensional conocido como stitching, un método que consiste en la inserción de hilos a través de las capas de material para mejorar la cohesión entre ellas y aumentar su resistencia a delaminación. Se han llevado a cabo pruebas en probetas configuradas con una y dos grietas, tanto con stitching como sin stitching.

Para la fabricación del material, el método escogido ha sido la técnica de infusión por vacío, y, para el ensayo mecánico de delaminación, la norma ASTM-D5528 Standard Test Method For Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. La configuración laminar escogida consta de seis láminas interiores de tejido unidireccional y dos capas externas de tejido tipo MAT para otorgar al material una mejor consistencia y acabado. El stitching se ha realizado manualmente, empleando hilo de poliéster para garantizar la homogeneidad del refuerzo entre las diferentes probetas.

Los resultados muestran que el stitching incrementa la energía liberada en las probetas con una grieta, indicando una mejora en la resistencia del material. Sin embargo, esta mejora introduce una mayor variabilidad en los resultados, sugiriendo la necesidad de un mayor control en su aplicación. En contraste, para las probetas con dos grietas, el stitching no ofrece un incremento notable en la energía liberada en comparación con las probetas que no poseen refuerzo, pero sí otorga una menor variabilidad en los resultados. Esto sugiere que la presencia de múltiples grietas podría ocultar el efecto del stitching, limitando su efectividad, con los niveles de densidad de stitching utilizados en este estudio.

Abstract

The current importance of composite materials cannot be underestimated, as they have become key components in various industries due to their capabilities, such as high strength, low weight, and versatility. These materials are revolutionizing sectors such as aerospace, automotive, and construction, offering advanced solutions that were previously unthinkable.

The objective of this project is to evaluate the delamination resistance of fiberglass composites reinforced with polyester resin, analyzing the effect of adding a three-

dimensional reinforcement known as stitching, a method that involves inserting threads through the layers of material to improve cohesion between them and increase their delamination resistance. Tests have been conducted on specimens configured with one and two cracks, both with stitching and without stitching.

For the material fabrication, the chosen method was the vacuum infusion technique, and for the mechanical delamination test, the ASTM-D5528 Standard Test Method For Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites was followed. The chosen laminate configuration consists of six inner layers of unidirectional fabric and two outer layers of MAT fabric to provide the material with better consistency and finish. The stitching was performed manually, using polyester thread to ensure the homogeneity of the reinforcement among the different specimens.

The results show that stitching increases the energy released in the specimens with one crack, indicating an improvement in the material's resistance. However, this improvement introduces greater variability in the results, suggesting the need for better control in its application. In contrast, for the specimens with two cracks, stitching does not offer a notable increase in the energy released compared to the specimens without reinforcement, but it does provide less variability in the results. This suggests that the presence of multiple cracks might obscure the effect of stitching, complicating the stress distribution and limiting its effectiveness with the stitching density levels used in this study.

1 INTRODUCCIÓN

Pese a la creencia de que los materiales compuestos son componentes de reciente descubrimiento y uso, lo cierto es que llevan utilizándose desde hace miles de años. Cuando se habla de un material compuesto, lo primero en lo que se piensa puede ser la fibra de carbono, muy conocida en el ámbito deportivo o en la fibra de vidrio que se puede encontrar en barcos y aviones, como muestra la Figura 1; sin embargo, no se consideran otros materiales ampliamente usados en la antigüedad como puede ser la mezcla de barro y paja en el Antiguo Egipto [1], [2].

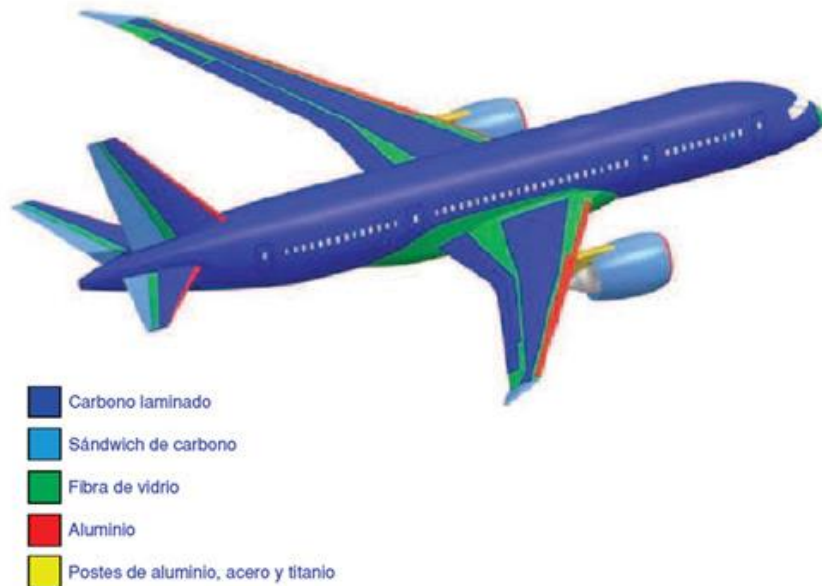


Figura 1. Distribución de materiales de un Boeing 787 [3].

Otros ejemplos poco conocidos y muy similares a los utilizados en la actualidad son el *opus caementicium* (Figura 2) [2], una forma de hormigón utilizada en la antigua Roma que combinaba piedra triturada, arena, cal y agua, logrando estructuras duraderas como el Coliseo Romano; en la construcción de la Gran Muralla China o los templos mayas y aztecas se usaba otro reconocido adhesivo como es el mortero de cal, una mezcla de cal, arena y agua, y más recientemente el uso del cuero endurecido, un cuero al que se le aplicaban aceites, resinas y extractos de plantas para reforzarlo y que sirviese como armadura.



Figura 2. *Opus caementicium* usado para unir grandes piedras en el interior del coliseo [2].

Sin embargo, no fue hasta el siglo XX, con las nuevas tecnologías de fabricación y los avances en la química, que se comenzaron a fabricar estos materiales de la manera en la que se conocen hoy en día. Owens Corning creó y patentó la fibra de vidrio que se conoce actualmente en 1935 [2], con el objetivo de conseguir un aislante térmico superior y más duradero al utilizado en esa época en el sector de la construcción. Sin embargo, fue con el estallido de la Segunda Guerra Mundial en 1939 cuando se reconoció el potencial de la fibra para aplicaciones industriales, especialmente en la industria naval y aeronáutica (Figura 3). La necesidad de encontrar nuevos materiales, los cuales se pudieran producir en masa y con bajos costos, y contrastados los buenos resultados de la fibra de vidrio, se empezó a invertir más en su investigación.



Figura 3. Supermarine Spitfire, avión de la Segunda Guerra Mundial con partes hechas de fibra de vidrio.

Otro momento clave en la historia de los materiales compuestos fue el inicio de la era espacial en 1957, con el lanzamiento del primer satélite artificial Sputnik 1 por la Unión Soviética. Este hito no solo desencadenó una carrera espacial entre las potencias mundiales, sino que estimuló al avance del desarrollo de estos materiales ya que la necesidad de enviar objetos al espacio y mantenerlos operativos en condiciones extremas impulsó la búsqueda de materiales con características más específicas y complejas. Todo esto derivó en la creación de la conocida fibra de carbono (Figura 4) en la década de los sesenta, pensada para cumplir todas las condiciones extremas a los que se ven sometidos los objetos en el espacio como la radiación solar y los cambios bruscos de temperatura.

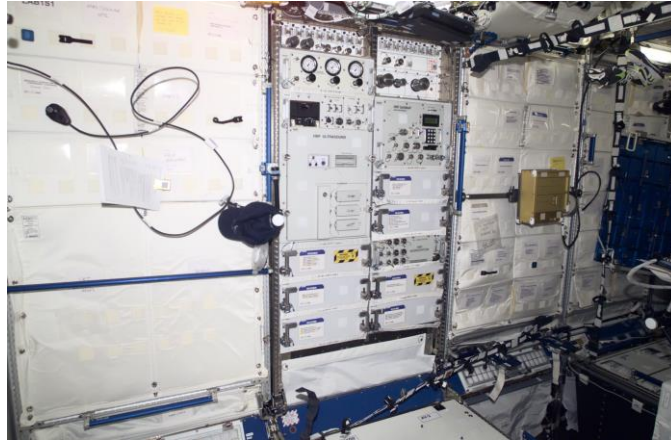


Figura 4. Módulo de la estación espacial internacional con piezas y revestimientos de fibra de carbono.

No solo evolucionaron los materiales, con ellos también lo hicieron los métodos de fabricación. A lo largo de la historia, el método habitual de fabricación ha sido de manera manual, mezclando los materiales con herramientas o con las propias manos. Sin embargo, a partir de la década de los 40 se introdujo la técnica de fabricación por vacío y más adelante, en la década de los 60, la infusión por vacío. Estas nuevas técnicas estaban orientadas a lograr la automatización del proceso y a un mayor aprovechamiento del material para conseguir reducir aún más los costos. Sin embargo, a pesar de las ventajas de los materiales compuestos, el desconocimiento acerca de su comportamiento mecánico y la variabilidad de sus propiedades debido a procesos de fabricación con baja repetibilidad pueden ser problemáticos. Esta incertidumbre a menudo exige el uso de mayores coeficientes de seguridad y cantidades adicionales de material, lo que puede mitigar los beneficios de eficiencia y reducción de peso que estos materiales prometen.

Actualmente, el objetivo principal de las investigaciones sigue centrándose en la reducción de costos en la fabricación y producción, si bien en la época actual, enfocada en la sostenibilidad, la industria de los materiales compuestos también está buscando alternativas de origen orgánico, como el yute (Figura 5), que mantengan o mejoren las características de las materias inorgánicas.



Figura 5. Probeta de Yute.

También se está trabajando en la mejora del reciclaje de estos materiales, los cuales presentan un gran desafío ya que este proceso requiere de altos costes debido a la dificultad de separar los componentes de manera eficiente. Otro objetivo es el conseguir reutilizar piezas rotas o dañadas. Por ejemplo, cuando ocurre un daño o accidente en un coche de Fórmula 1 como se muestra en la Figura 6, normalmente esas piezas son desechadas y se fabrican nuevas; sin embargo, existen estudios centrados en la reparación de este tipo de daños en los que se intenta añadir más material y conseguir que la pieza pueda volver a ser reutilizada sin perder sus propiedades ni eficacia en su función.

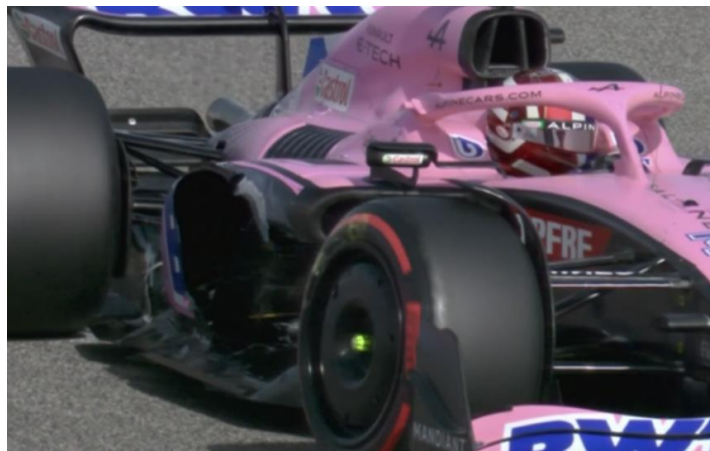


Figura 6. Pontón lateral de un coche de Fórmula 1 de fibra de carbono tras un choque.

Es crucial mejorar las propiedades de los materiales compuestos, concretamente sus propiedades a la delaminación. La delaminación es un problema crítico, ya que puede comprometer la integridad estructural de los componentes. Un ejemplo notable de un accidente asociado a un fallo por delaminación es el incidente del vuelo 243 de Aloha Airlines en 1988, donde una sección del fuselaje del avión se desprendió debido a la fatiga y delaminación de los materiales compuestos, resultando en la pérdida de una vida y varios heridos. Este y otros incidentes han impulsado un interés significativo en la industria para mejorar la resistencia a la delaminación de los materiales compuestos. Diversos métodos,

como la inclusión de refuerzos tridimensionales como el stitching, están siendo investigados y desarrollados para aumentar la resistencia a la delaminación y garantizar la seguridad y eficacia de estos materiales avanzados.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es evaluar, siguiendo la norma ASTM-D5528 [4] específica para este caso, la resistencia de un material compuesto a la delaminación debida a una o dos grietas en el interior de su estructura y el efecto que tiene añadir un refuerzo tridimensional como es el stitching.

Para alcanzar este objetivo y realizar un estudio, se han establecido otros objetivos secundarios:

- Fabricación de probetas compuestas de fibra de vidrio y resina poliéster. Se realizarán cuatro configuraciones diferentes que se explicarán más adelante.
- Análisis microscópico del acabado de material.
- Realización de un ensayo de delaminación en una máquina de ensayo universal según normativa para analizar el proceso de propagación de grieta.
- Cuantificar las propiedades mecánicas de los hilos de refuerzo por stitching mediante la realización de ensayos de tracción.

Llevar a cabo un seguimiento del crecimiento de la grieta mediante la toma de imágenes con una cámara durante el ensayo.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Materiales compuestos

En este apartado se presentarán conceptos fundamentales sobre los materiales compuestos, incluida su composición, tipos de matrices comerciales, varios mecanismos de unión entre la fibra y la matriz, diferentes métodos de fabricación de materiales compuestos fibrados que se encuentran en el mercado, fallos que pueden surgir a la hora de ponerlos en uso y métodos para reforzarlos.

3.1.1 Concepto

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes, de forma que las propiedades del material final sean superiores que las de los componentes por separado [5].

En el caso del material compuesto de este estudio, se compone de dos elementos principales: refuerzo y matriz (Figura 7). El material compuesto está reforzado por una fase discontinua, que aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y es esencial para obtener las propiedades mecánicas principales. La matriz se compone de una fase continua cuya función principal es distribuir los esfuerzos mecánicos que se generan en el material, la resistencia ambiental y térmica del compuesto y mantenerlo conectado a la fase discontinua [5],[6].

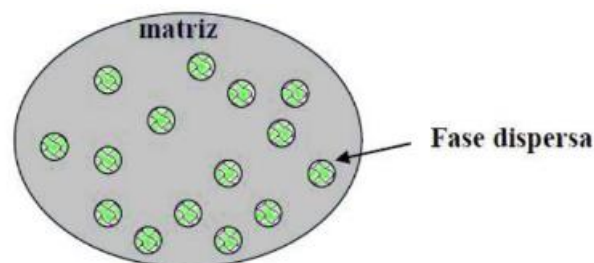


Figura 7. Representación gráfica de la composición de un material compuesto [7].

Según la aplicación a la que esté destinada el material se necesitará un tipo específico de materia prima, por lo que no todas las propiedades y características serán de utilidad. En general, algunas de las propiedades que se buscan en este tipo de materiales son:

- Resistencia mecánica
- Ligereza
- Durabilidad
- Conductividad
- Conductividad térmica
- Resistencias a altas temperaturas

- Resistencia química
- Fatiga

Sin embargo, según las características que se deseen alcanzar, la fabricación puede presentar varias desventajas:

- Costo de producción
- Dificultad para reparaciones
- Variabilidad en propiedades
- Susceptibilidad a daños por impacto
- Complicaciones en la unión entre materiales
- Limitaciones en algunas aplicaciones a alta temperatura
- Riesgos de salud en la fabricación de ciertos tipos

3.1.2 Refuerzo

Los materiales compuestos se clasifican según el tipo de refuerzo que posean: fibras, laminares o de partículas [7].

3.1.2.1 Fibras

Las fibras son el elemento reforzante por excelencia, y son el refuerzo elegido para este estudio. Las fibras dotan al material resistencia mecánica, rigidez y dureza, además de incrementar notablemente su resistencia a tracción y elevar el módulo específico (Figura 8) [5].

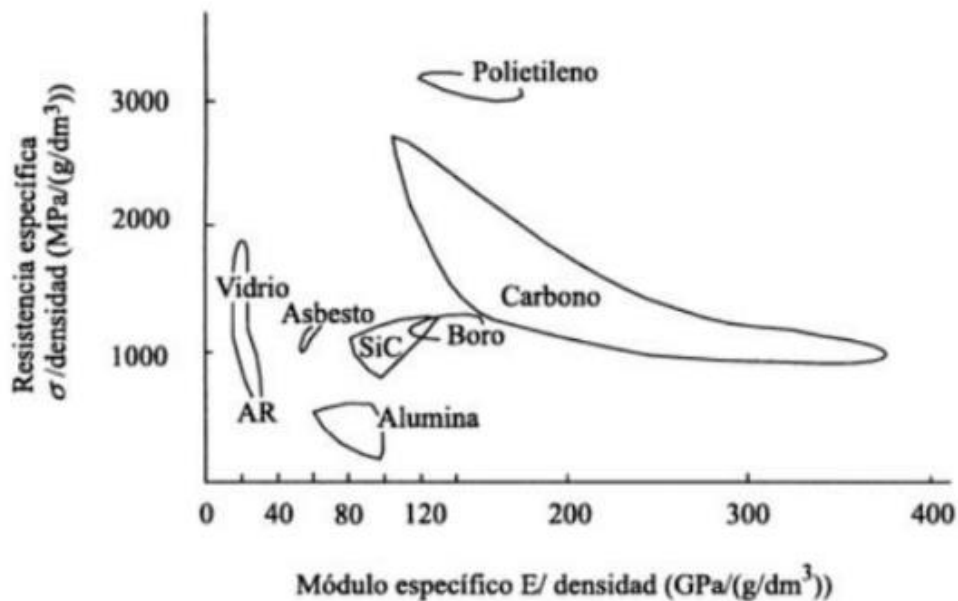


Figura 8. Comparación de las características específicas de diferentes fibras [5].

Los tipos de fibras utilizados como refuerzos se pueden clasificar según se aprecia en la Tabla 1, y se pueden disponer de diferentes maneras, como se muestra en la Figura 9. En esta figura se muestran ejemplos de refuerzos en forma de partículas, en forma de fibra larga orientada y en forma de fibra corta.

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, Polietileno

Tabla 1. Clasificación de fibras según su origen [5].

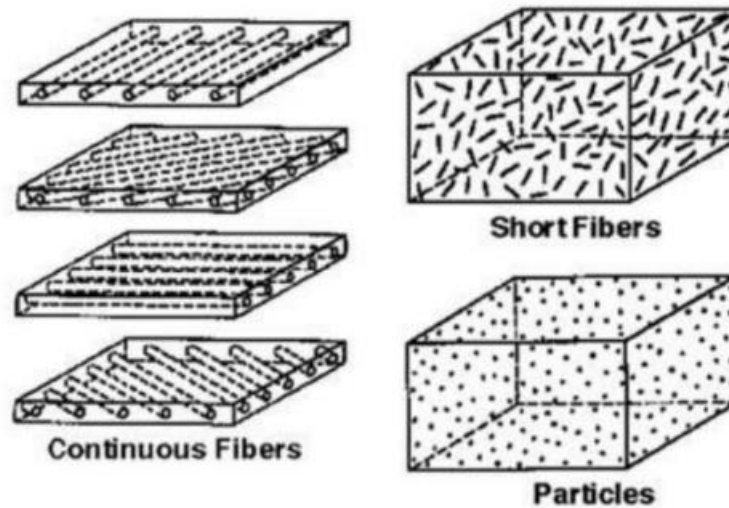


Figura 9. Disposición de fibras [8].

En la actualidad, las fibras más utilizadas en el ámbito de la industria son la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

La fibra de vidrio se trata del material más utilizado actualmente en la fabricación de composites, con un diámetro aproximado de 12 μm (Figura 10). Esto se debe a sus buenas características mecánicas, unidas a la gran disponibilidad de la materia prima y su bajo precio. El uso de la fibra de vidrio se remonta a la época de los egipcios, los cuales la utilizaban en los vasos y ánforas que se depositaban en las tumbas de los faraones. Fueron las fibras utilizadas en los primeros estudios ingenieriles, y su producción continua se consiguió en 1938 en Estados Unidos [5].

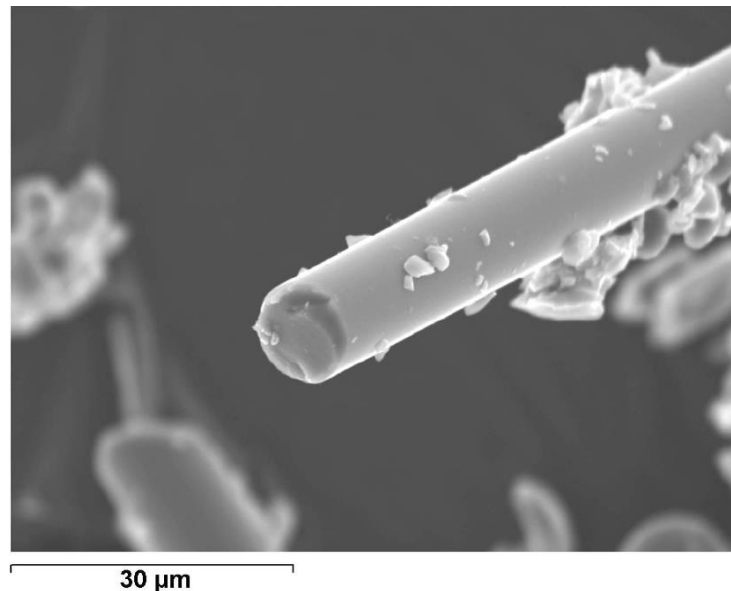


Figura 10. Microfotografía de fibra de vidrio [9].

Entre sus principales características se puede destacar su adherencia fibra-matriz, estabilidad dimensional, imputrescibilidad, resistencia mecánica, débil conductividad térmica, características eléctricas, compatibilidad con materias orgánicas, incombustibilidad, excesiva flexibilidad y bajo coste. La fibra de vidrio se divide en diferentes tipos, atendiendo a sus diferentes composiciones [5]:

- Vidrio E (Eléctrico): representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado y tiene buenas propiedades eléctricas. Su módulo de elasticidad se encuentra alrededor de 72 GPa, y su resistencia a la tracción es aproximadamente 3,4 MPa.
- Vidrio A (Alto contenido en álcali): tiene un módulo más bajo que el vidrio E, alrededor de 69 GPa, una gran resistencia química y menos resistencia mecánica, con una resistencia a la tracción de aproximadamente 3 GPa.
- Vidrio AR (Álcali resistente): es el único tipo que puede combinarse con hormigón y cemento, teniendo un módulo de elasticidad de alrededor de 70 GPa y una resistencia a la tracción de 3,1 GPa.
- Vidrio C (Químico): se sitúa entre el vidrio A y E y se utiliza en las capas superiores de estructuras anticorrosión debido a su alta resistencia química. Su módulo de elasticidad es de aproximadamente 71 GPa y una resistencia a la tracción de 3,2 GPa.
- Vidrio R ó S (Resistencia): utilizado en aplicaciones de elevadas características mecánicas (aeronáutica) debido a su muy superior resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, con valores alrededor de 86 GPa y 4,6 GPa respectivamente.

- Vidrio D (Dieléctrico): utilizado en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación, ventanas electromagnéticas y radares por sus altas propiedades dieléctricas y sus muy débiles pérdidas eléctricas.
- Vidrio B (Boro): excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad, con un módulo de elasticidad de aproximadamente 60 GPa y una resistencia a la tracción de 2,8 GPa.
- Vidrio ERC (Eléctrico y resistente químico): con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- Vidrio X: con base de Li_2O por su transparencia a rayos X.

En la Tabla 2, se pueden observar las diferentes propiedades de algunos de los tipos de la fibra de vidrio, siendo la nomenclatura:

- σ_f^* : tensión de rotura de la fibra
- E_f : módulo de Young de la fibra
- ε_f^* : deformación de rotura de la fibra
- ρ : densidad del material
- \emptyset : diámetro de fibra

Parámetro	Unidades	Vidrio-E	Vidrio-R/S	Vidrio-C
σ_f^*	GPa	3.45	4.50	3.10
E_f	GPa	72.50	86.50	71.00
ε_f^*	%	3.30-4.80	4.20-5.40	3.50
ρ	g/cm^3	2.60	2.50	2.45
σ_f^* / ρ	$(\text{GPa}\cdot\text{cm}^3)/\text{g}$	1.30	1.75	1.30
E_f / ρ	$(\text{GPa}\cdot\text{cm}^3)/\text{g}$	28.00	34.00	29.00
\emptyset	μm	3-25	3-25	3-25
Coef. dilat. tér. lin.	$10^{-6}/\text{K}$	5.00	4.00	7.20

Tabla 2. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio [8].

En cuanto a las diferentes disposiciones de la fibra de vidrio, se pueden encontrar las siguientes presentaciones [5]:

- MAT: fieltros de hilos cortados a una longitud determinada y aglomerados entre sí mediante un ligante químico.
- Roving: ensamblados sin torsión que se pueden presentar de dos maneras; en hilo de filamento, teniendo roving directo, o en hilo de vidrio, siendo este roving indirecto, utilizado para la fabricación de láminas traslúcidas.
- Tejido: se organiza de tal manera que tiene más hilos en un sentido que en otro, lo que mejora las propiedades mecánicas de uno de ellos. Su presentación principal es equilibrada, orientada o unidireccional.
- Hilos cortados: dispuestos como fibra molida o complejos MAT-Tejido.

- Varios: otras disposiciones.

En este estudio se utilizará fibra de vidrio en forma de tejido unidireccional y en forma de MAT de hilos cortados (Figura 11).

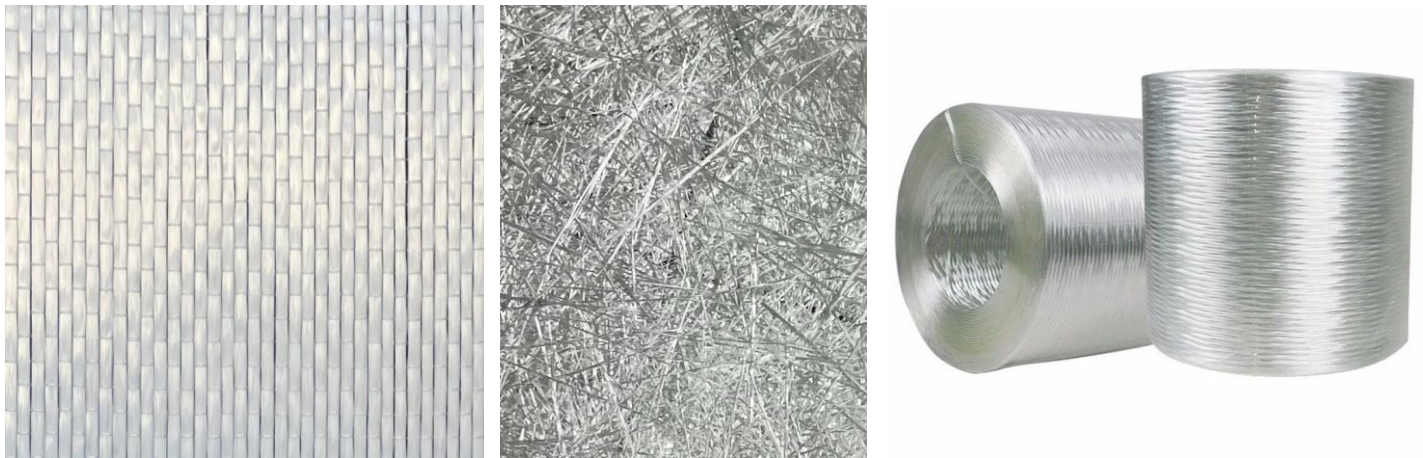


Figura 11. Tejido unidireccional (izquierda), MAT de hilos cortados (centro), roving (derecha).

La fibra de carbono, por otro lado, es probablemente el refuerzo más conocido de todo el mundo ya que es utilizado no solo en el ámbito de la industria, sino que es un material frecuente en material deportivo, transporte terrestre o marina. Fueron utilizadas por Edison en el siglo XIX como filamentos para bombillas. Estas fibras se producen a través de un proceso de pirólisis de polímeros orgánicos, como el poliacrilonitrilo (PAN) (Figura 12) o rayón.

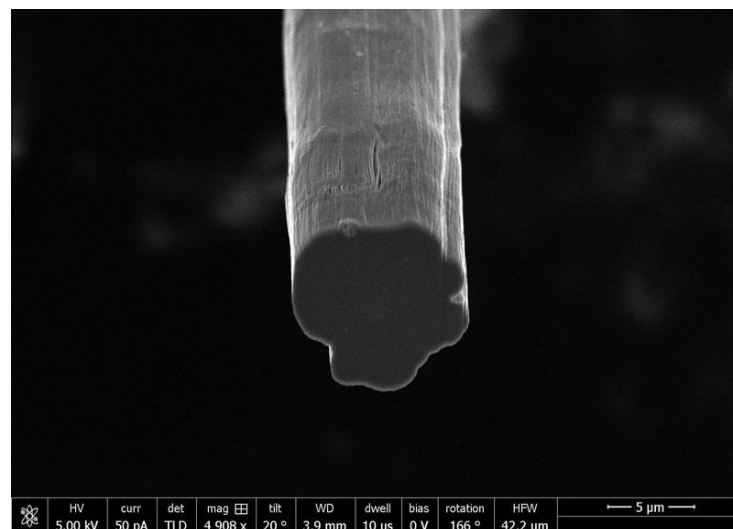


Figura 12. Fibra de carbono proveniente de PAN.

El proceso de fabricación de esta fibra implica la eliminación de átomos de hidrógeno y otros elementos no carbono a altas temperaturas. Las fibras de carbono se estiran y estabilizan a temperaturas que rondan los 200-300°C antes de ser sometidas a la carbonización a unos 1000°C en nitrógeno, donde el contenido en carbono se incrementa significativamente. Existe la posibilidad de someterlo a otro tratamiento en el que alcanza una temperatura de 3000°C para obtener módulos más elevados [10]. Poseen una excepcional resistencia mecánica, lo cual hace que sean muy fuertes en relación con su peso. Tienen una alta rigidez y resistencia a la tracción, lo que las hace ideales para aplicaciones en las que la resistencia y ligereza son fundamentales. También son muy resistentes a la corrosión y pueden soportar condiciones climáticas adversas. En cuanto a su costo, sí es cierto que es más elevado en comparación a otros compuestos, pero actualmente están bajando drásticamente debido a la alta demanda que tienen por su amplia gama de uso [5]. Este material está disponible en diferentes formatos: mechas, roving y tejidos (Figura 13).



Figura 13. Roving y tejido de carbono.

3.1.2.2 Laminado

En el proceso de fabricación de un material compuesto, el paso más importante es el laminado ya que las características requeridas para la estructura o componente final se conseguirán con la disposición específica que tenga cada una de las láminas que lo componen. El laminado se trata en esencia de la disposición de varias capas o láminas de material compuesto, cada una de las cuales está hecha de fibras impregnadas con una matriz. Los tres tipos de láminas más frecuentes son: lámina unidireccional, lámina tipo tejido y lámina tipo mat, de las cuales se puede observar su distribución en la Figura 14.

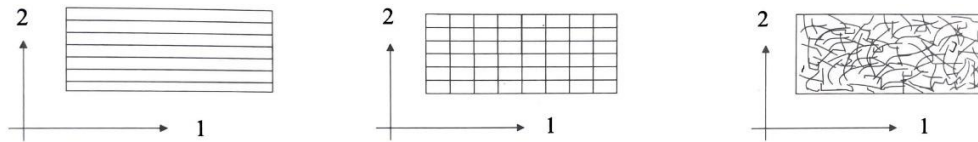


Figura 14. Tipos de láminas [5].

La disposición unidireccional es una de las más comunes. Todas las fibras de una capa se encuentran orientadas en la misma dirección, mejorando la resistencia de las fibras y haciéndolas ideales para aplicaciones que requieren altas cargas en una dirección específica. Por ejemplo, las alas de avión resisten fuerzas de tracción y compresión que actúan a lo largo del eje de la estructura, por lo que para su fabricación se usan láminas unidireccionales ya que sus propiedades son las que mejor se adaptan a lo requerido. [5], [11], [12], [13].

Por otro lado, la disposición tipo tejido implica capas de fibras entrelazadas entre sí, asemejándose a un tejido de tela, dándole al material resistencia en múltiples direcciones y haciéndolo útil en aplicaciones en las que las cargas se distribuyen uniformemente. El tejido hace que la estructura sea más flexible y resistente a los impactos, lo que es útil en aplicaciones como partes de automóviles y equipos deportivos [5], [11], [13].

La disposición tipo MAT (Figura 11) implica una distribución aleatoria de las fibras en una capa, permitiendo la creación de un material compuesto con resistencia isotrópica, que significa que tiene características comparables en todas las direcciones. En ciertas aplicaciones marinas o en la construcción de cascos de embarcaciones donde las cargas varían en diferentes direcciones, es importante tener una resistencia uniforme a lo largo de todo el material y esta disposición de fibras es particularmente útil para estos casos [12], [13].

En todos estos casos, las láminas se forman al unir numerosas fibras con una matriz, que con frecuencia es resina. Para satisfacer los requisitos de resistencia y rigidez del componente final, se planifica cuidadosamente la cantidad, orientación y disposición de estas láminas. La ventaja principal de estas disposiciones es la capacidad de adaptar las propiedades mecánicas del material compuesto a las necesidades específicas de la aplicación, lo que lo convierte en un recurso valioso en una variedad de industrias, desde la aeroespacial hasta la construcción y la automoción.

3.1.2.3 Partículas

Los materiales compuestos reforzados con partículas son una clase de materiales avanzados que se distinguen por combinar una matriz, generalmente polimérica o metálica, con partículas sólidas dispersas en su interior. Dependiendo de la aplicación, estas

partículas fortalecen las propiedades del material y pueden mejorar su resistencia, rigidez y conductividad, entre otras características.

Debido a sus propiedades mejoradas, estos compuestos se utilizan en una amplia gama de sectores. La agregación de partículas sólidas, como cerámica, metal o polímeros, a la matriz permite cambiar las características del material según la aplicación. Las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas del material compuesto se mejoran cuando las partículas se dispersan uniformemente en la matriz.

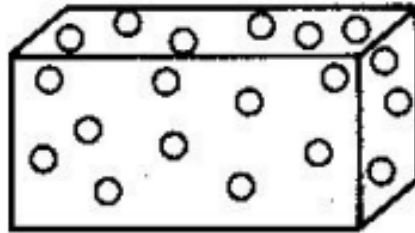


Figura 15. Esquema de material compuesto reforzado con partículas.

Estos materiales tienen una gran ventaja porque pueden combinar las ventajas de varios materiales en una sola estructura. Por ejemplo, los materiales compuestos reforzados con partículas pueden proporcionar una alta resistencia y rigidez en aplicaciones aeroespaciales, lo que es esencial para la construcción de componentes ligeros y robustos. Además, son conocidos por su resistencia al desgaste y su capacidad para soportar cargas elevadas, lo que es beneficioso para aplicaciones como rodamientos y componentes de maquinaria [14]–[16].

3.1.3 Matriz

En materiales compuestos, las matrices son un componente esencial ya que permiten la unión de las fibras o refuerzos además de proporcionar resistencia al material (Figura 7). La matriz hace que las fibras se mantengan en su lugar y transmite las cargas aplicadas a través de la estructura compuesta. Aparte de estas funciones, también protegen a las fibras de factores externos como la humedad y la corrosión. También puede afectar las propiedades mecánicas y térmicas del material compuesto, lo que hace que su correcta elección sea crucial según las características que requieran el producto final.

3.1.3.1 Tipos de matrices

Existen dos tipos de matrices, las inorgánicas y las orgánicas, como se muestra en la Tabla 3.

INORGÁNICAS	CEMENTO, GEOPOLÍMEROS, YESO MATRICES CERÁMICAS MATRICES METÁLICAS	
	TERMOESTABLES	EPOXI, VINILÉSTER, POLIÉSTER, FENÓLICA, ESTERES CIANATO, BISMALÉIMIDAS, POLIIMIDAS, POLIETERAMIDA
ORGÁNICAS	TERMOPLÁSTICAS	POLICLORURO DE VINILO (PVC) COPOLÍMEROS DE ESTIRENO (ABS,SAN), POLIETILENO (PE), POLIPROPILENO (PP), POLICARBONATO (PC), POLIMETACRILATO DE METILO (PMMA), ACETATO, POLIESTIRENO (PS), POLIOXIMETILENO (POM), PBT, POLIETERIMIDA, PET, NYLON, POLIAMIDA, PEEK, PEKK, PAI,

Tabla 3. Clasificación de diferentes matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos [5].

Las de tipo orgánicas son las que actualmente se les está dando un mayor uso, ya que ofrecen mejores características y es más fácil su reciclaje, especialmente las termoplásticas. La elección entre matrices termoplásticas y termoestables depende de las aplicaciones específicas, teniendo ambos tipos sus pros y sus contras. Sin embargo, en muchas aplicaciones modernas, las matrices termoplásticas están ganando popularidad debido a su capacidad de reciclaje y su proceso de fabricación más eficiente. La resistencia requerida, las condiciones de servicio y las especificaciones de costos del proyecto pueden afectar la elección de la matriz [1], [5], [17], [18].

Los polímeros que se endurecen irreversiblemente cuando se someten a calor y presión durante el proceso de fabricación se conocen como matrices termoestables, que son el tipo de matriz escogida para este estudio. Cuando se han curado, no se ablandan ni se funden cuando se recalientan. Estos materiales tienen una excelente resistencia a altas temperaturas y estabilidad dimensional. Las resinas epoxi, viniléster y poliéster son el tipo de matrices termoestables más comunes en la fabricación de materiales compuestos. Se utilizan ampliamente en aplicaciones que requieren alta resistencia química y térmica, como componentes aeroespaciales y la creación de composites avanzados [5], [18].

Sin embargo, las matrices termoplásticas son polímeros que pueden ablandarse y endurecerse repetidamente cuando se calientan y enfrían. Esto mejora su procesabilidad y reciclabilidad. El polietileno, el polipropileno y el nailon son algunos ejemplos de matrices termoplásticas. Se utilizan en aplicaciones donde la facilidad de moldeo y la capacidad de reparación son cruciales, como en aplicaciones de la industria manufacturera y componentes de automoción [5], [18].

A continuación, se hablará con más detalle de los tres tipos de matrices termoestables más utilizadas en el sector de la industria.

Poliéster

Las resinas de poliéster se utilizan con frecuencia como matrices en la fabricación de materiales compuestos debido a sus múltiples beneficios. Las opciones son atractivas para proyectos de diversas escalas debido a su bajo costo. Estas resinas también son excepcionalmente resistentes a la corrosión, lo que las hace ideales para aplicaciones en entornos extremos. Desde el punto de vista mecánico, las matrices de poliéster ofrecen una buena tenacidad (Figura 16) y resistencia al impacto, lo que las hace adecuadas para situaciones donde se requiere cierta flexibilidad y absorción de energía, además de ser resistentes a la tracción y torsión. Ante sus buenas características y el costo de su adquisición, este tipo de resina será la que se utilice en la fabricación del material en este estudio.

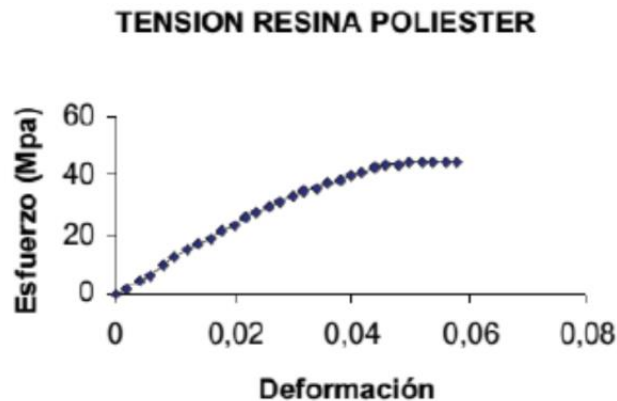


Figura 16. Diagrama σ - ϵ de la resina poliéster [8].

Sin embargo, es fundamental tener en cuenta sus restricciones. Las resinas de poliéster pueden ser menos resistentes que las matrices de epoxi, a pesar de su resistencia. Además, la contracción durante el proceso de curado puede afectar la precisión dimensional de las piezas, lo que debe tenerse en cuenta en aplicaciones que requieran tolerancias ajustadas. En resumen, aunque las resinas de poliéster ofrecen ventajas económicas y mecánicas específicas, es importante evaluar cuidadosamente sus características para cumplir con los requisitos del proyecto [5], [19].

Epoxi

Debido a su resistencia y versatilidad, las matrices de epoxi se utilizan ampliamente en una gran variedad de aplicaciones. El proceso de fabricación implica la mezcla de resinas y endurecedores para producir una sustancia viscosa que se vierte en moldes para dar formas particulares. Su excepcional tenacidad (Figura 17), durabilidad, alta resistencia

química y capacidad para adherirse a una amplia gama de superficies son algunos de sus beneficios. Las matrices de epoxi también son conocidas por su excelente resistencia a la humedad y al impacto, lo que garantiza resultados duraderos y sólidos.

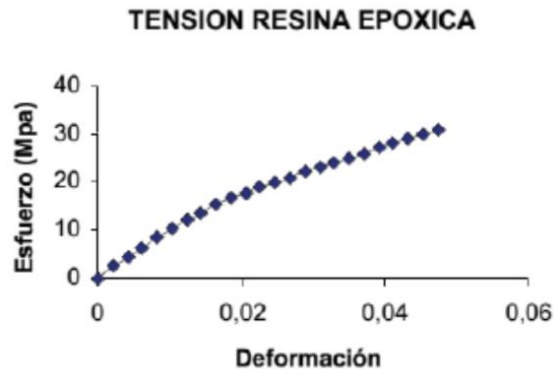


Figura 17. Diagrama σ - ϵ de la resina epoxi [8].

Sin embargo, es crucial considerar algunos aspectos negativos. Dado que las burbujas de aire pueden afectar la calidad final, la aplicación de matrices de epoxi con frecuencia requiere procesos minuciosos. Además, algunos usuarios pueden experimentar sensibilidad a los productos químicos presentes en los materiales de epoxi, lo que requiere precaución al manipular el material. Gracias a su capacidad para producir productos resistentes y de alta calidad, las matrices de epoxi siguen siendo una opción popular a pesar de estos posibles inconvenientes [5], [18], [20].

Viniléster

Las resinas de viniléster se utilizan ampliamente en la fabricación de matrices debido a sus múltiples beneficios, particularmente en términos de sus características mecánicas. Su resistencia química y mecánica es significativamente superior a la de las resinas de poliéster, aunque su costo es un poco más alto. Desde un punto de vista mecánico, las matrices de viniléster son más resistentes al impacto que las resinas de poliéster, lo cual las hace perfectas para aplicaciones de altas prestaciones. Para curar este tipo de resinas, se necesita de calor o dejarlas a temperatura ambiente por un tiempo prolongado.

A pesar de las notables ventajas de las resinas de viniléster, hay algunas cosas que deben considerarse. Aunque tienen una resistencia química superior a la de las resinas de poliéster, su resistencia química puede ser menor que la de las matrices de epoxi, lo que las hace menos adecuadas para entornos altamente corrosivos. En proyectos que requieren tolerancias precisas, también debe considerarse la contracción durante el curado, aunque menos marcada que en las resinas de poliéster [5], [21].

3.1.3.2 *Catalizadores y aceleradores*

Los catalizadores y aceleradores son sustancias químicas que aceleran la reacción de curado de la matriz, reduciendo el tiempo de reacción química de la sustancia. Los catalizadores suelen usarse en casos en los que sea necesario un control minucioso del proceso de curado, garantizando la correcta penetración de la matriz en la fibra y asegurando una mayor resistencia en el producto final, como es en el caso de la resina epoxi.

Por otro lado, los aceleradores se utilizan comúnmente en las resinas poliéster, ya que estas resinas suelen estar destinadas a labores más estéticas que funcionales y la penetración completa de la matriz no es de vital importancia. Es por ello que se recurre a los aceleradores, con el fin de reducir al máximo el tiempo de curado y permitir que este se pueda realizar a temperatura ambiente, evitando así el uso de sistemas de calefacción adicionales.

3.1.3.3 *Proceso de curado*

El tiempo de curado de una matriz es variable según lo que se esté buscando. El tamaño de la pieza, las condiciones de curado o el tipo de resina, son factores a tener en cuenta en este proceso. Con la aplicación de fuentes de calor externas, se puede acortar el tiempo de polimerización, pero debe extremarse la precaución ya que un mal uso de esta fuente puede hacer que se acumulen burbujas o incluso que se detenga el proceso.

Según Miravete [10], la temperatura de curado de la resina poliéster no debe ser superior a los 35°C o 40°C, aunque si el molde permite la disipación del calor, este rango puede aumentar hasta los 50°C o 60°C.

Como se muestra en la Figura 18, existen diferentes etapas en el proceso de curado de la resina:

- Tiempo de gel: tiempo que tarda en alcanzar la mezcla el punto de gel.
- Punto de gel: punto en el que empieza la solidificación de la resina y adquiere una consistencia viscosa, impidiendo la fluidez y su procesado.
- Tiempo de reactividad: tiempo en el que se produce la solidificación completa del material, aumentado la temperatura.
- Tiempo de polimerización: tiempo completo del proceso, desde la mezcla de materiales hasta la solidificación de los mismos.
- Pico exotérmico: temperatura máxima alcanzada en el proceso. Tras este punto, solo queda esperar al enfriamiento del material.

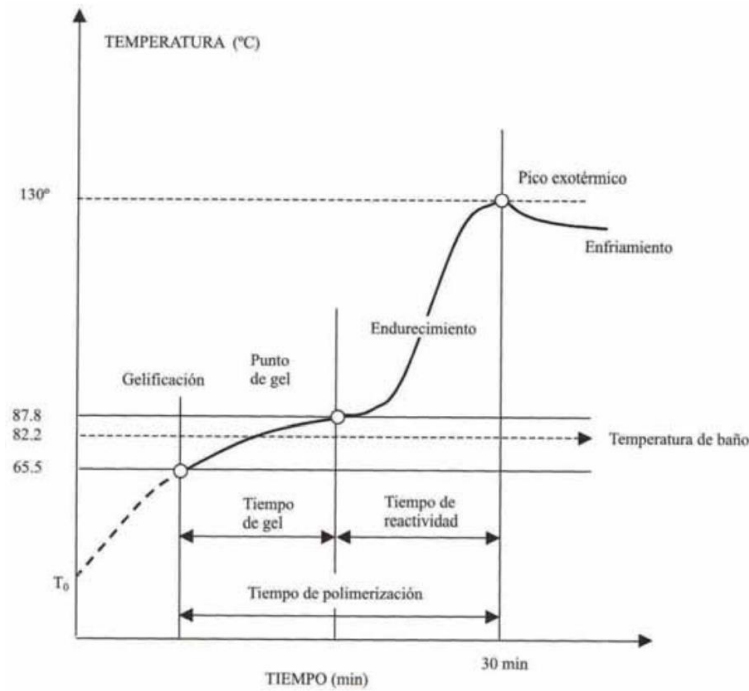


Figura 18. Proceso de curado de resina [8].

3.1.4 Unión Fibra-Matriz

En la fabricación de materiales compuestos, es crucial que la fibra se una fuertemente a la matriz para transmitir su resistencia y rigidez. La resistencia de la interfase también influye en el comportamiento a fractura. Sin esta unión, el compuesto solo mostraría resistencia a la tracción y no en la dirección AA' mostrada en la Figura 19.

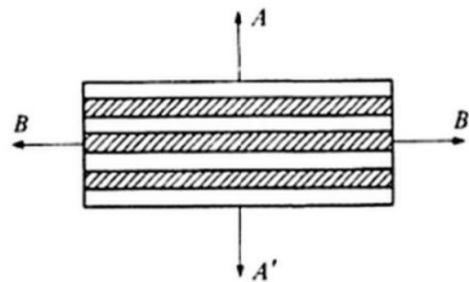


Figura 19. Esquema de los materiales compuestos [13].

Previo al resultado final, la matriz se encuentra en estado líquido para que se impregne bien al refuerzo y se consiga una buena unión. Cuando se habla de que un refuerzo tiene una buena impregnabilidad significa que la matriz fluirá perfectamente por la superficie del refuerzo, desplazando todo el aire para obtener una unión sin desperfectos.

Existen diferentes tipos de unión entre matriz y refuerzo, presentados en la Figura 20 [7], [11].

- a) Unión mecánica: La unión resulta de las rugosidades entre ambas superficies. A mayor rugosidad, más fuerte es la unión que se produce. Este tipo de unión funciona bien para esfuerzos cortantes, pero no para esfuerzos de tracción.
- b) Unión electrostática: La unión es provocada por las cargas eléctricas que poseen las superficies que interaccionan.
- c) Unión química: Se produce cuando los grupos químicos de la superficie del refuerzo son compatibles con los grupos químicos de la matriz. El número de uniones por unidad de área determina la resistencia de la unión.
- d) Unión mediante interdifusión: En este tipo de unión, las cadenas poliméricas se difunden entre la superficie del refuerzo y la matriz. La resistencia de esta unión depende del número de entrelazamientos entre cadenas. Cuando se agregan disolventes o plastificantes, la resistencia aumenta.

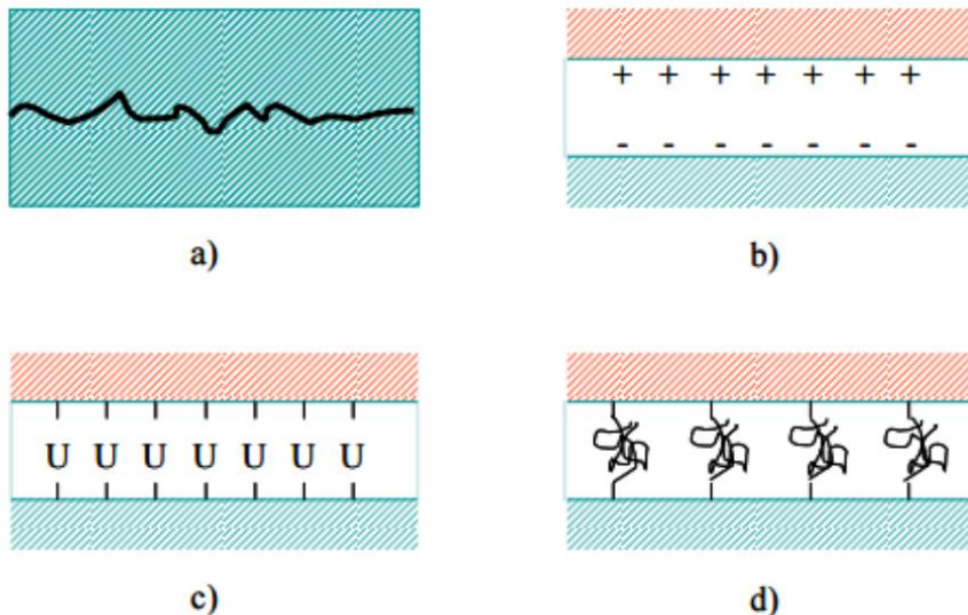


Figura 20. Tipos de unión refuerzo-matriz [11].

3.2 Procesos de fabricación materiales compuestos

En este apartado se hablará de los métodos más utilizados para la fabricación de los materiales compuestos, aunque existen otros procesos como RTM o autoclave, que por su complejidad, quedan fuera de los objetivos de este documento.

La elección del método de fabricación es crucial, ya que de ello depende la calidad del producto, la eficiencia del proceso y la optimización de recursos. El tipo de pieza que se desee fabricar determina si se requiere un proceso específico, ya que hay que tener en cuenta las propiedades del material como la resistencia o flexibilidad. Otro factor importante

es la complejidad del método a utilizar. Procesos como la infusión son ideales para piezas complejas, mientras que para formas más básicas otros métodos pueden ser más eficientes.

3.2.1 Manual

Este método implica la aplicación de capas de refuerzo y resina sobre un molde abierto. Las distintas láminas de material se disponen de forma manual sobre el molde y se aplica la resina sobre cada una manualmente (Figura 21), siendo pulverizada o mediante un rodillo, el cuál ayuda a eliminar gran parte de las inclusiones de aire. Las resinas más comunes en estos procesos son las poliéster por su bajo costo y facilidad de uso, y las epoxis que pese a ser más caras muestran mejores propiedades [13].

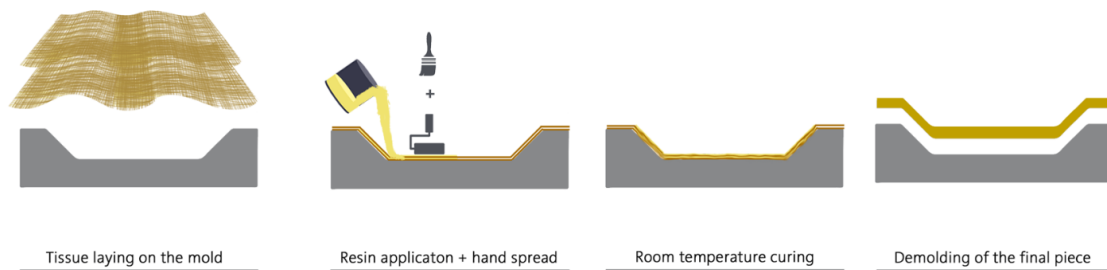


Figura 21. Proceso de fabricado manual de materiales compuestos [22].

3.2.2 Vacío

En este proceso (Figura 22), se apilan varias láminas de refuerzo y se impregnan en resina. Posteriormente, se sella el conjunto y se extrae el aire mediante vacío, asegurándose de que las láminas queden bien impregnadas y sin inclusiones de aire [11], [13].

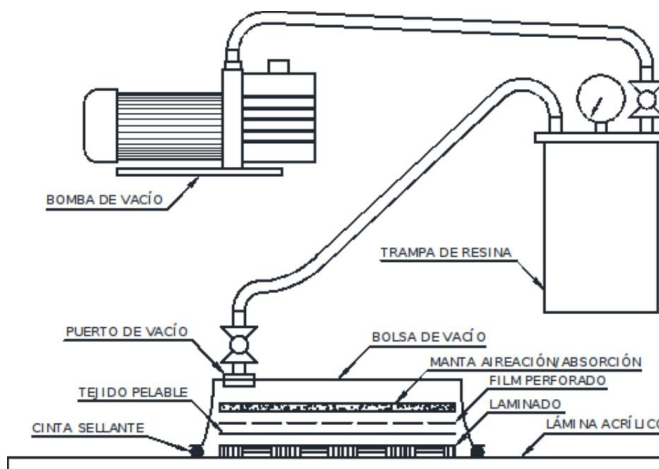


Figura 22. Proceso de fabricado por vacío de materiales compuestos [23].

Este método es mejor que el manual, ya que la presión que se ejerce sobre el material nos permite eliminar el exceso de resina y obtener un material más ligero y con mejores propiedades [11].

3.2.3 Infusión por vacío

Es un proceso mejorado del anterior caso. Se disponen las láminas secas en el interior de una bolsa hermética, a la cual se conecta por un lado la bomba de vacío y por otro lado un recipiente con resina (Figura 23). Al aplicar el vacío, la resina avanza a través de las láminas de refuerzo evitando la inclusión de aire e impregnando el material de manera uniforme.

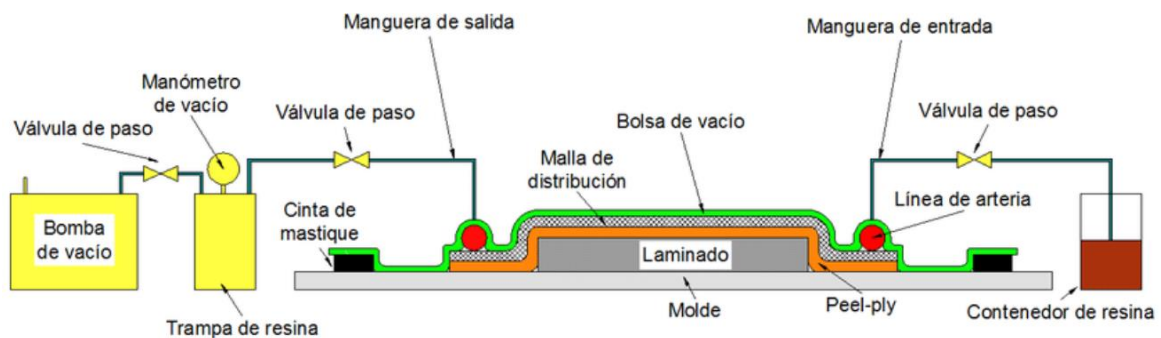


Figura 23. Proceso de fabricación de infusión por vacío de materiales compuestos [24].

3.3 Tipos de fallos de materiales compuestos

En este apartado se hablará de los diferentes fallos que pueden aparecer en un material compuesto, pero debido a la gran variedad de tipos se comentarán únicamente aquellos que pueden surgir en este proyecto.

3.3.1 Agrietamiento de la matriz

El agrietamiento de la matriz es probablemente el tipo de daño más serio que se puede desarrollar en un material compuesto. Reduce las propiedades mecánicas y conduce a otro tipo de daños que pueden resultar fatales para la estructura. El precursor de este fallo es el desprendimiento de fibras o láminas en capas fuera del eje de la matriz. Cuando el material está sometido a una carga de fatiga, la matriz se despega uniéndose las fibras contiguas y formando una grieta macroscópica visible a simple vista (Figura 24) [25].

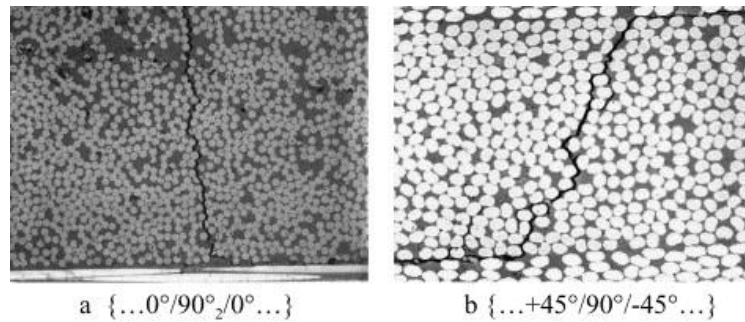


Figura 24. Ejemplos de grietas por fatiga en los bordes libres de las probetas [26].

3.3.2 Fractura de fibras

La fractura de la fibra del material compuesto es un problema frecuente que puede afectar negativamente las características mecánicas y el rendimiento de estos materiales. Cuando la resistencia y la durabilidad son cruciales, los materiales compuestos se emplean con frecuencia en aplicaciones de alto rendimiento, como turbinas eólicas, equipamiento deportivo y aeroespacial. La resistencia de estos materiales puede verse comprometida por la fractura de la fibra, lo que podría provocar fallas y efectos potencialmente peligrosos.

En los materiales compuestos, las fibras normalmente soportan la carga y su rotura puede afectar significativamente la resistencia y rigidez del material. La fractura de la fibra en los materiales compuestos (Figura 25) puede ser causada por diversos factores, que incluyen fallas de fabricación, diseño deficiente y deterioro ambiental a causa de la fatiga o el impacto.

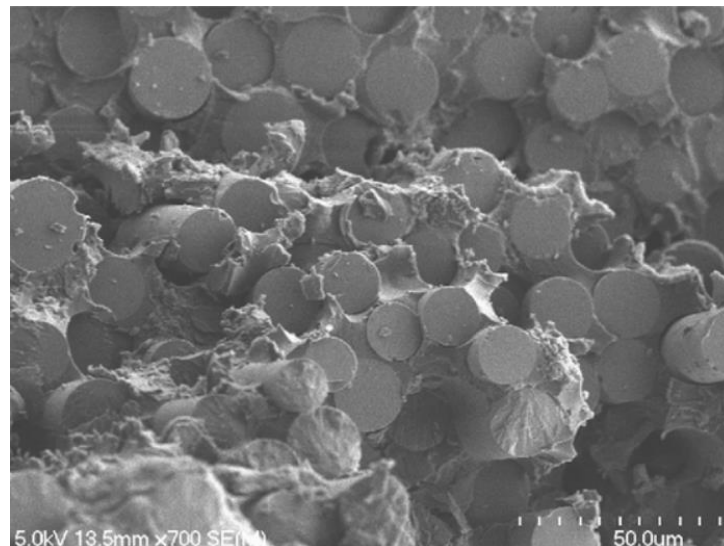


Figura 25. Fractura de fibras en materiales compuestos [27].

Una de las causas más frecuentes de rotura de fibras es el diseño inadecuado del producto. Esto puede ocurrir si las fibras no están correctamente alineadas o si se coloca

una carga inesperada sobre el material compuesto. Bajo tensión mecánica, las fibras pueden romperse y las fisuras resultantes pueden extenderse por todo el material hasta que falla por completo.

Los defectos de fabricación son otro motivo frecuente de rotura de fibras en materiales compuestos. Durante el proceso de producción del material, las fibras pueden desalinearse o pueden aparecer fallas en la matriz del material, lo cual puede degradar el material y aumentar su fragilidad.

Las condiciones ambientales también pueden contribuir a la fractura de fibras. Por ejemplo, las fibras pueden deteriorarse por la exposición a temperaturas extremas o condiciones corrosivas, lo que aumenta su propensión a fracturarse. Otro elemento ambiental que puede conducir a la fractura de fibras en materiales compuestos es la fatiga. La carga repetida a lo largo del tiempo puede provocar la fatiga de la fibra y finalmente la rotura.

Es muy importante analizar cuidadosamente los procedimientos de diseño y fabricación para evitar la fractura de fibras. Deben elegirse las fibras y los materiales de matriz correctos, las fibras deben alinearse adecuadamente y el material compuesto debe estar libre de fallas. Además, es crucial vigilar el entorno al que estará expuesto el material compuesto y tomar precauciones para protegerlo de los elementos que podrían causar la fractura de la fibra.

3.3.3 *Delaminación*

Cuando se habla de la delaminación en materiales compuestos se refiere a la separación o desprendimiento de capas individuales dentro de la estructura del material como se muestra en la Figura 26. Como se ha comentado en apartados anteriores, los materiales compuestos están formados por una serie de láminas apiladas unidas mediante una matriz normalmente de resina. Esta unión puede verse comprometida o deteriorada por varios motivos, los cuales pueden provocar la aparición de este defecto.

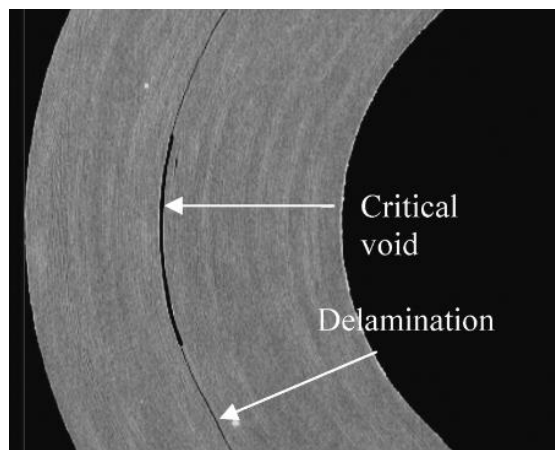


Figura 26. Delaminación de un material en un ensayo de fractura interlaminar [28].

El desprendimiento de láminas en puede ocurrir por varias razones, incluida la mala adherencia entre las capas, la alta concentración de tensión en la interfaz entre las láminas y el daño por impacto. La mala adherencia entre las capas puede ocurrir cuando la unión entre las láminas es débil o cuando hay ausencia de una capa adhesiva. Esto puede llevar a que éstas se separen y provoquen que toda la estructura falle [29]–[33].

Otro caso se da cuando la tensión dentro del material se concentra en la interfaz entre las láminas, lo que hace que se separen. Esto puede suceder debido a un diseño inadecuado, donde el material no está adecuadamente soportado o cuando las fibras dentro del material no están correctamente alineadas [29]–[33].

El daño por impacto [34] es otro factor que puede conducir al desprendimiento de láminas en materiales compuestos. Cuando el material se somete a una carga de impacto, las fibras dentro del material pueden dañarse y las láminas pueden separarse. Esto puede ocurrir durante el transporte, la instalación o el funcionamiento del material compuesto [29]–[33].

3.3.4 Desalineación de fibras

La desalineación de fibras es un problema que puede afectar significativamente al rendimiento y propiedades del material. Para que un material alcance sus especificaciones y cumpla con su función prevista, todas las fibras deben estar adecuadamente alineadas siempre y cuando se trate de un material unidireccional [34].

Normalmente este defecto surge en el proceso de fabricación, ya sea a la hora de la colocación del laminado o en el proceso de impregnación y curado del material. Como se ha mencionado con anterioridad, cuando las prestaciones del material son exclusivamente en una dirección es necesario colocar el laminado con la mayor precisión posible para evitar el defecto. También puede surgir si la matriz no impregna por igual las fibras o si en el proceso de curado no se controla la presión y temperatura del laminado como se muestra en la Figura 27 [34].

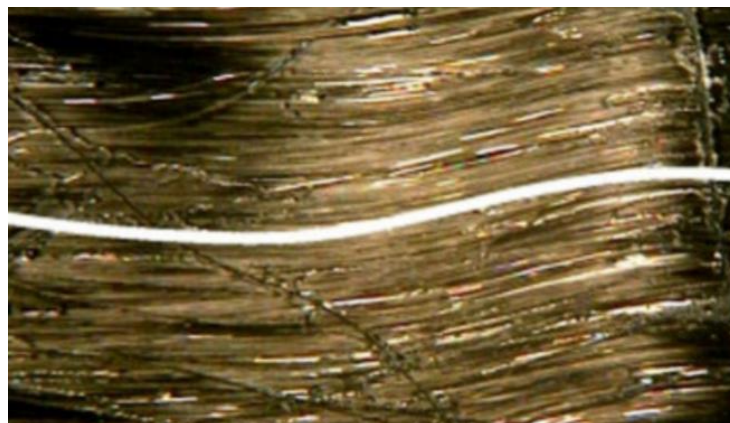


Figura 27. Desalineación del material en el proceso de preimpregnado [34].

La desalineación reduce la eficacia de las fibras a la hora de soportar cargas, afectando negativamente a la capacidad del material para resistir tensiones y deformaciones. Este defecto puede derivar en arrugas, pliegues y ondulaciones en las fibras (Figura 28), los cuales pueden derivar en una falla catastrófica del material [34].

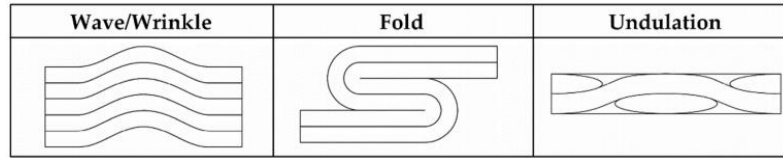


Figura 28. Orientación de las fibras en ondas/arrugas, pliegues, ondulaciones y desalineaciones [34].

Para evitar la desalineación, es imprescindible seguir algunos pasos ya mencionados como la colocación precisa del laminado, conseguir una impregnabilidad equitativa en todas las fibras, la cual se puede conseguir con una velocidad lenta y constante a la hora de impregnar el material y, por último, controlando que la presión y la temperatura durante el proceso de curado se mantengan sin fluctuaciones significativas.

3.3.5 Micropandeo de las fibras

El micropandeo se produce por la torcedura o arrugas de las fibras que componen el material, causado por la compresión a la que es sometida (Figura 29). Puede afectar significativamente a la resistencia y estabilidad de la estructura, además de resultar en una pérdida de rigidez, aumentando el riesgo de falla. También puede provocar la rotura de fibras si el esfuerzo al que es sometido el material se mantiene o aumenta con el tiempo [34], [35].

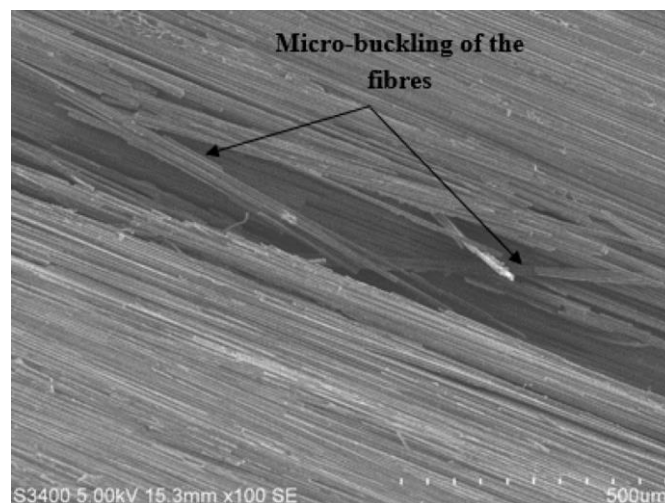


Figura 29. Micropandeo de fibras tras un ensayo a compresión [36].

El micropandeo se puede controlar a través de diversos ensayos, como pueden ser las pruebas de compresión o análisis a microscopio. Estos procesos pueden detectar y prevenir fallas producidas por este impacto.

3.4 Refuerzos tridimensionales en materiales compuestos

3.4.1 *Stitching*

El stitching es un método utilizado para reforzar materiales compuestos. El proceso consiste en insertar un hilo continuo a través de las capas de materiales compuestos y unirlos, creando una unión fuerte y duradera. Normalmente, el material elegido para este método es el nylon pero puede variar dependiendo de la función que vaya a realizar el material.

A menudo se prefiere el stitching a los dispositivos de fijación tradicionales, como pernos y tornillos, porque proporciona una distribución más uniforme de la tensión y reduce el potencial de concentraciones de tensión. Esto conduce a una mayor resistencia y durabilidad en general, lo que hace que el stitching sea una opción popular para aplicaciones de alto rendimiento.

Para poder reforzar el material con este método, es importante analizar y determinar que se cumplan las siguientes condiciones [8]:

- El hilo elegido debe de ser resistente y capaz de mantener la tensión de cosido. Se puede conseguir la tensión deseada dependiendo del patrón escogido (Figura 30 y Figura 31) para coser, que normalmente va en función de la máquina escogida para realizar el proceso.
- La máquina debe tener la suficiente potencia para realizar el cosido a lo largo de todo el material, además de tener una aguja capaz de penetrar el material.

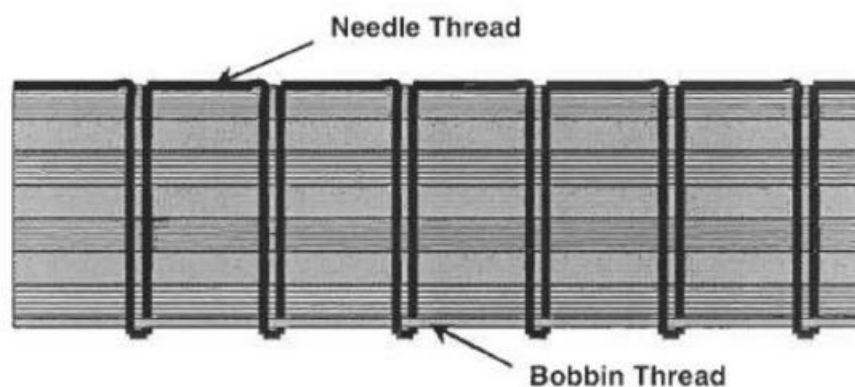


Figura 30. Esquema de patrón de cosido [37].

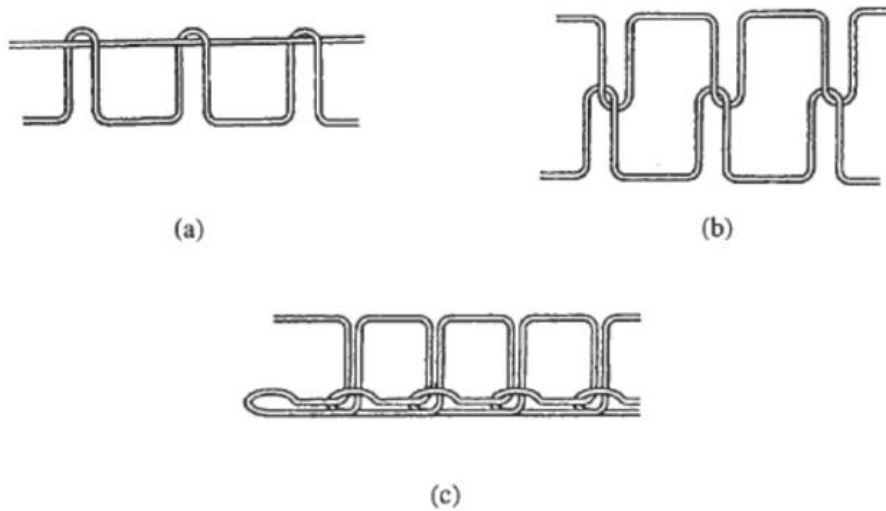


Figura 31. Variantes de puntada [8].

Uno de los beneficios de este método es que permite un control más preciso sobre la orientación de las fibras en el material compuesto, lo que puede tener un impacto significativo en su resistencia y rigidez. Esto se debe a que el hilo utilizado para coser se puede colocar en direcciones específicas para optimizar las propiedades del material compuesto, como se aprecia en la Figura 32 [8].

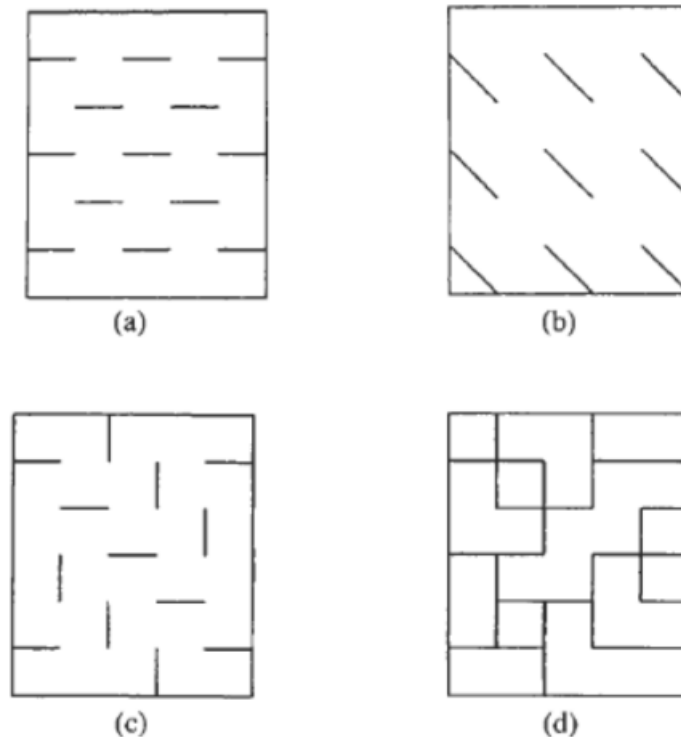


Figura 32. Diferentes disposiciones del stitching [8].

Es un método relativamente económico y fácil de implementar para unir materiales compuestos, lo que lo hace accesible a una amplia gama de industrias y aplicaciones.

También es versátil, ya que se puede usar en una variedad de materiales compuestos, incluidos compuestos de fibra de carbono (Figura 33), fibra de vidrio y fibra de aramida. Además, presenta la gran ventaja de adaptarse a diferentes tamaños de material, lo que permite su aplicación a una amplia variedad de piezas para diferentes aplicaciones [8].



Figura 33. Cosido de una lámina de fibra de carbono.

3.4.2 Weaving

Este método es conocido debido a su uso en la industria textil, aunque también es usado en la fabricación de materiales compuestos. Se trata de un tejido tridimensional obtenido de la combinación de varios tejidos bidimensionales. A continuación, se mostrarán los diferentes tejidos que se utilizan en la industria.

3.4.2.1 Tejido tradicional

Este tipo de tejido se crea en un telar tradicional (Figura 34) mediante la unión de dos conjuntos de hilos, que pueden ser paralelos o urdimbres, y de trama. Los hilos paralelos provienen de una fuente, que puede ser de hilo único, grupo de hilos únicos o filetas [8].

Después de aplicar tensión, los hilos de urdimbre se colocan en el telar y son afectados por un mecanismo de elevación (mecánico o electrónico) que crea un espacio llamado cobertizo en el que se insertan los hilos de trama con un ángulo de 90°. La secuencia del mecanismo de elevación para hilos paralelos y el ángulo de inserción de los hilos de trama determina el patrón de tela que se crea (Figura 35) [8].

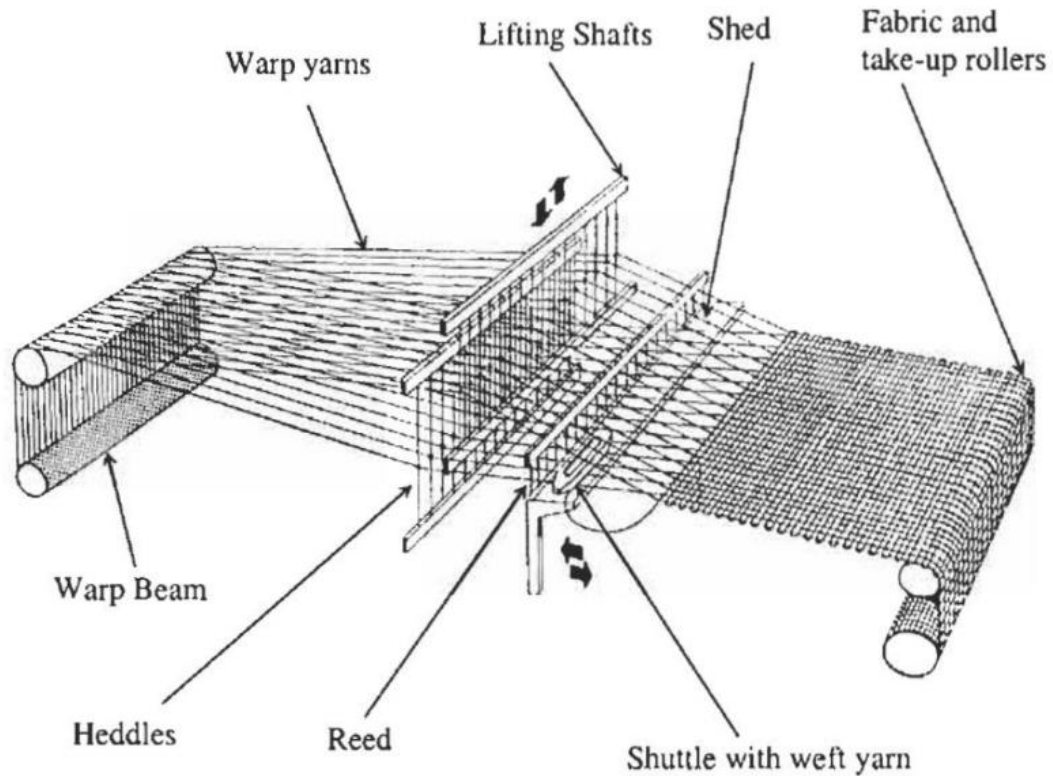


Figura 34. Telar tradicional [8].

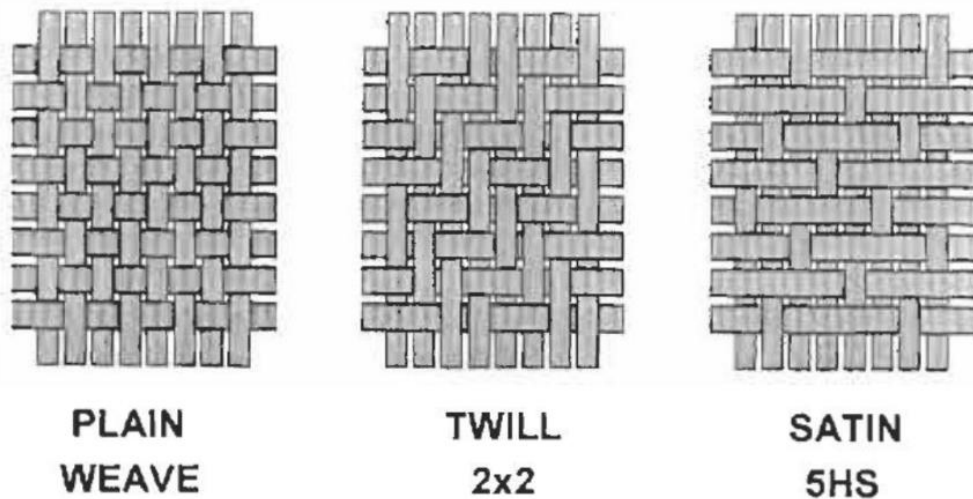


Figura 35. Diversos patrones en el tejido de materiales compuestos [8].

3.4.2.2 Tejido tridimensional ortogonal

Este tejido se caracteriza por tener una estructura tridimensional completa al conectar hilos en tres direcciones principales: longitudinal (0°), transversal (90°) y zonal ($\pm 45^\circ$). Esta disposición de fibras, permite aumentar la rigidez y resistencia de los tejidos en comparación con los tejidos bidimensionales [8], [38].

Este método permite la formación de estructuras más complejas (Figura 36) y la reducción de desperdicio del material, ya que la disposición de fibras permite al material adaptarse a formas y geometrías más complejas, maximizando la eficiencia tanto en la producción como en el uso de material y permitiendo el control de las propiedades anisotrópicas del material compuesto (Figura 37) [8], [38].

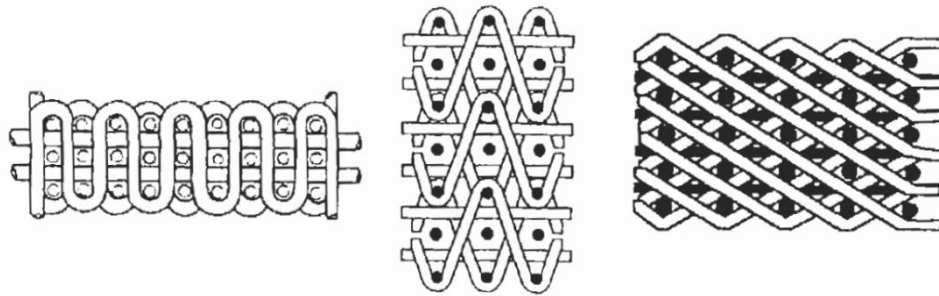


Figura 36. Configuraciones más comunes de tejidos tridimensionales [8].



Figura 37. Estructuras tridimensionales de fibra de vidrio [39].

3.4.3 Braiding

El braiding o trenzado es un método de fabricación que combina fibras o hilos para crear estructuras tridimensionales. Este método es ampliamente utilizado en industrias como la aeroespacial, automotriz y deportiva, ya que ofrece ventajas significativas en términos de resistencia, rigidez y eficiencia en el uso de materiales [8], [40].

El trenzado se caracteriza por la orientación controlada de las fibras, lo que permite una distribución uniforme de la rigidez y la resistencia en todas las direcciones. Además, su estructura interconectada mejora la resistencia a la delaminación y la adaptabilidad a formas complejas, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren componentes ligeros pero resistentes [40], [41], [42]. Principalmente, se pueden encontrar dos tipos de braiding, el 2D y el 3D [8].

La formación de la tela trenzada en dos dimensiones implica la contrarrotación de conjuntos de soportes de hilo alrededor de un marco circular como se puede observar en la Figura 38.

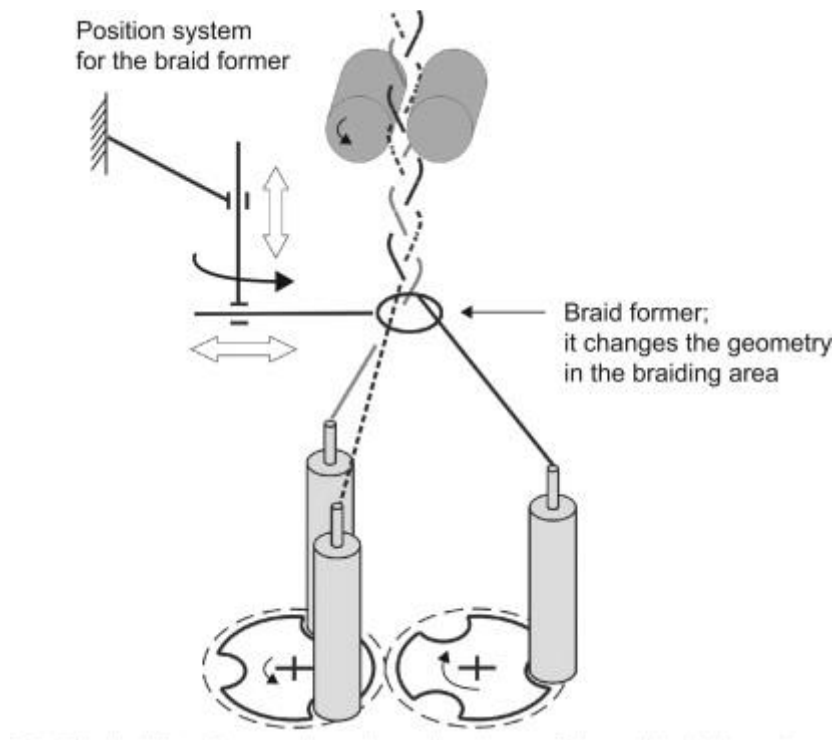


Figura 38. Esquema trenzado 2D [42].

Como se muestra en la Figura 39, el trenzado 3D permite la creación de estructuras complejas y funcionales, lo que lo convierte en una técnica ingenieril más interesante. Por lo general, el trenzado 3D se logra agregando tela a un molde móvil, como se ilustra en la Figura 39, con algunas de las posibles geometrías a fabricar y la Figura 40.

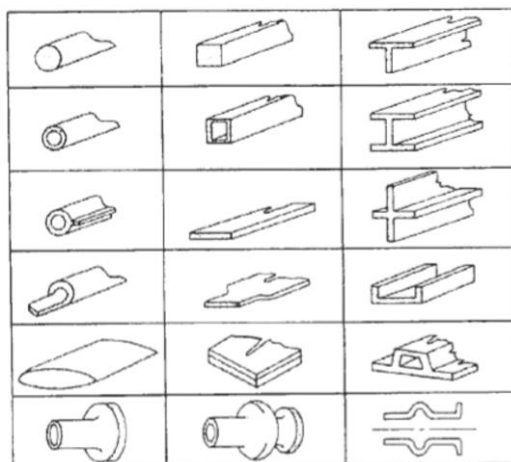


Figura 39. Estructuras obtenibles mediante braiding [8].

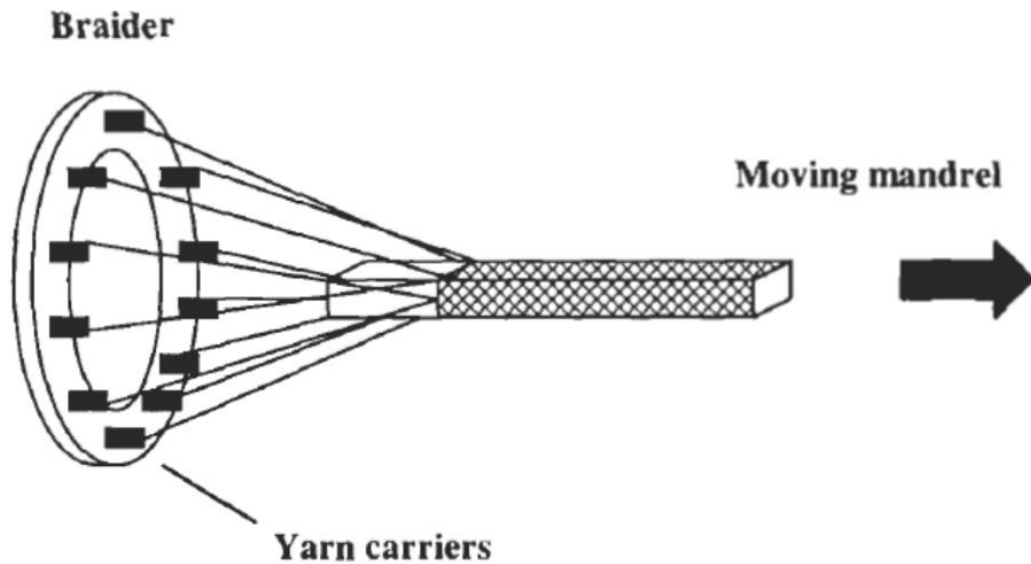


Figura 40. Esquema braiding con guía móvil [8].

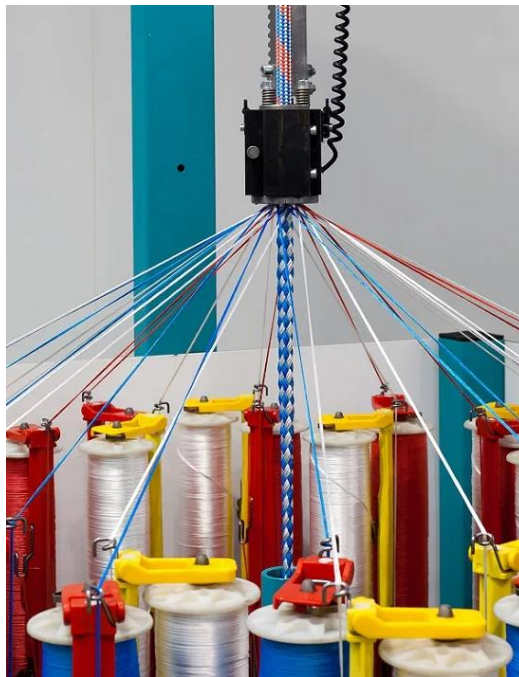


Figura 41. Braiding con guía móvil [43].

3.4.4 Knitting

El knitting o tejido de punto es la técnica menos utilizada de las que se han comentado. No es común encontrar piezas fabricadas mediante este método ya que se trata de una técnica que puede parecer poco útil para la fabricación de materiales compuestos.

Tradicionalmente se pueden obtener dos tipos de tejidos, el tejido de punto y el tejido de urdimbre (Figura 42). Ambos tejidos se pueden realizar en un telar tradicional, siguiendo el proceso mostrado en la Figura 43.

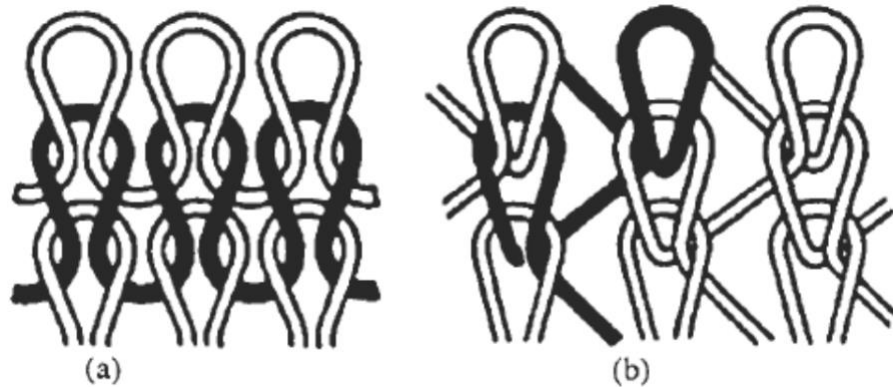


Figura 42. Tejido de punto (a) y tejido de urdimbre (b) [8].

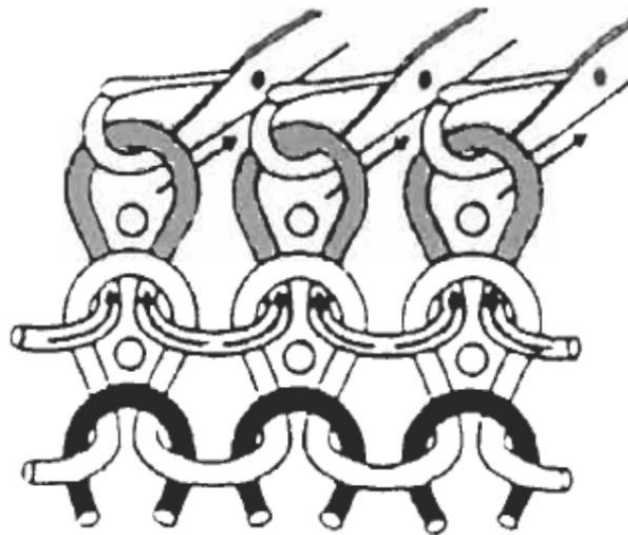


Figura 43. Proceso de tejido [8].

Al igual que con las técnicas anteriores, existe la posibilidad de realizar estructuras tridimensionales con este método como se muestra en la Figura 44.

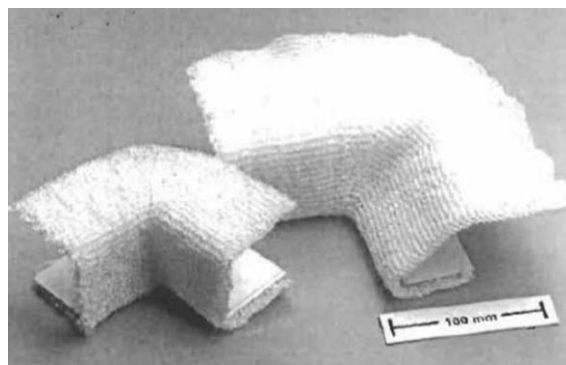


Figura 44. Piezas obtenidas mediante knitting [8].

3.4.5 Bridging

El bridging es un fenómeno que se presenta en ensayos de delaminación, en el cual las fibras o materiales adicionales resisten la propagación de la delaminación en materiales compuestos (Figura 45). Ocurre cuando las fibras en la interfaz de la delaminación se mezclan y redistribuyen las cargas aplicadas actuando como puentes que evitan la propagación del daño, brindando al material una mayor durabilidad y resistencia [44]–[47].

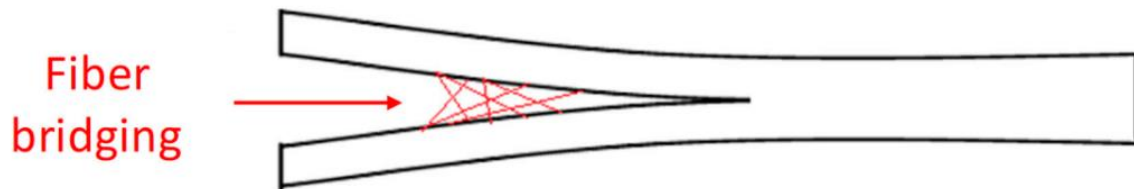


Figura 45. Representación esquemática de bridging en un ensayo de delaminación [44].

Este efecto mejora la tenacidad de los materiales al redistribuir las cargas aplicadas, evitando el fallo del material en caso de producirse alguna grieta (Figura 46) pero también puede resultar desventajoso ya que puede complicar el proceso de diseño y fabricación. La adición de fibras puede requerir ajustes en la fabricación y aumentar los costes de producción. Además, su efectividad puede verse comprometida dependiendo de la distribución y orientación de las fibras, lo cual aumenta la dificultad en el proceso de diseño [44]–[47].



Delamination without bridging



Delamination with bridging

Figura 46. Comparación entre un material sin presencia de bridging y otro con él [47].

Para conseguir este fenómeno de manera efectiva en un material, se emplean diversas estrategias en el diseño. En primer lugar, la selección de fibras resistentes a la delaminación es crucial. Estas fibras actúan como puntos de anclaje en la interfaz de la delaminación, formando los puentes necesarios para resistir la propagación del daño. También hay que tener en cuenta la compatibilidad entre las fibras y la matriz para garantizar una buena adhesión y la formación exitosa de puentes de bridging [44]–[47].

Otra consideración importante es la orientación y distribución de cargas a la que va a estar sometidas el material. Para maximizar la eficacia del bridging hay que tener en cuenta la dirección de carga principal y las áreas propensas a sufrir una delaminación. Experimentos y análisis detallados y apoyados por modelos de mecánica de fractura son cruciales para comprender y optimizar estos aspectos del diseño [44]–[47].

3.5 Propagación de grieta y delaminación

En este proyecto se estudiará el crecimiento de grieta utilizando la mecánica de fractura elástica lineal, asumiendo que se trata con materiales con un comportamiento principalmente lineal hasta la rotura. La parte frontal de la grieta puede ser sometida a tres modos de carga principales o a combinaciones de ellos, dependiendo de las diferentes condiciones de carga [48].

Se puede usar un sistema de ejes coordenados cartesianos, de tal forma que el frente de grieta esté alineado con el eje z . Además, consideramos un estado idealizado en el que las deformaciones y tensiones que actúen en las cercanías del extremo de la grieta puedan expresarse únicamente en función de las coordenadas x e y [48].

En la Figura 47, la grieta es sometida al Modo I, también conocido como modo de apertura, donde las tensiones y deformaciones en el plano son simétricas al eje x . La realización de este proyecto se centrará en este modo.

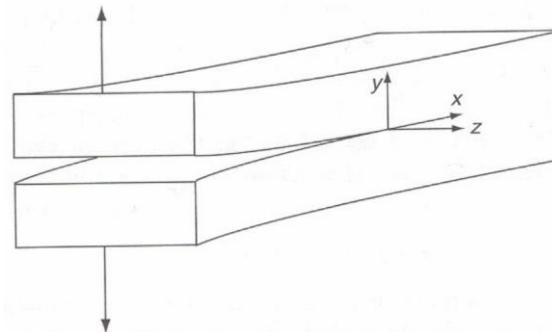


Figura 47. Modo I [48].

En la Figura 48, la grieta está sometida al Modo II, conocido como modo de cortadura o deslizamiento en el plano, donde las deformaciones y tensiones son antisimétricas con respecto al eje x .

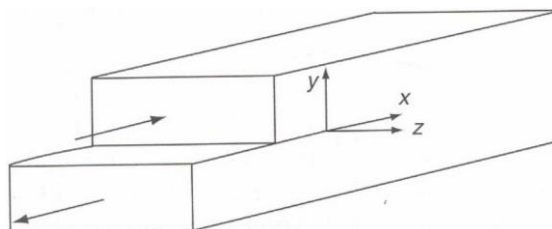


Figura 48. Modo II [48].

Por último, en la Figura 49, la grieta se encuentra sometida al Modo III, de cortadura antiplanar, donde las deformaciones y tensiones que se encuentran fuera del plano son antisimétricas respecto al eje x .

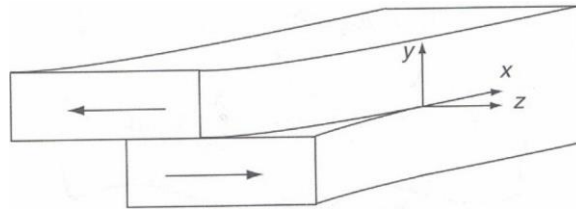


Figura 49. Modo III [48].

3.6 Tasa de liberación de energía

En 1956, Irwin propone una solución a los conceptos de mecánica de fractura establecidos con anterioridad que eran aplicables exclusivamente a materiales que cumplieran la Ley de Hooke, define el concepto de tasa de liberación de energía G . La define como la medida de la energía disponible para la propagación de un incremento de grieta da (Figura 50) [49].

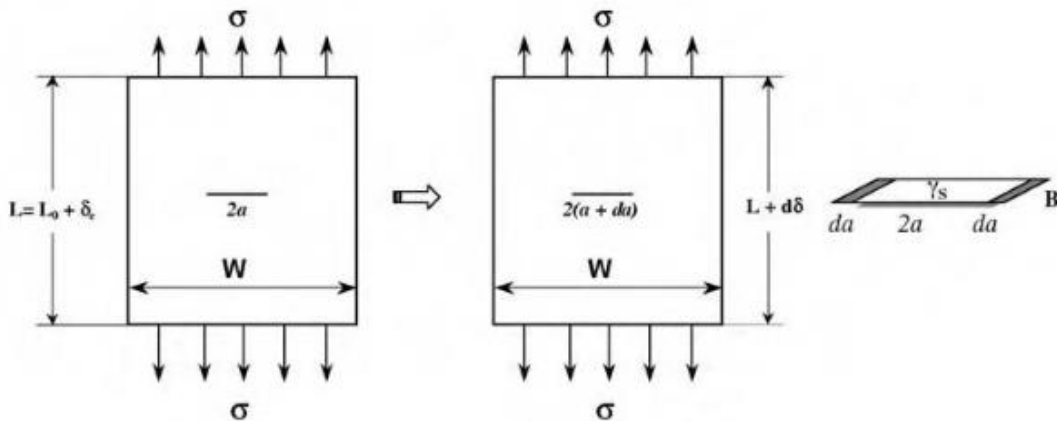


Figura 50. Incremento de longitud da de la grieta [49].

Cuando el incremento de longitud de grieta es sometido a una carga constante, se mantiene una tensión constante. El trabajo proporcionado al sistema se convierte en un aumento de energía elástica U_E y en energía absorbida durante la propagación U_R . La energía que se suministra al sistema sigue la ecuación:

$$dU = P \cdot d\delta \quad (1)$$

Donde P es la carga constante a la que está siendo sometida y $d\delta$ la variación infinitesimal de la deformación. En cuanto a la parte que se transforma en energía elástica, viene dada por la siguiente expresión:

$$dU_E = \frac{1}{2} P \cdot d\delta \quad (2)$$

Por lo que la energía consumida en la propagación queda:

$$dU_R = dU - dU_E = P \cdot d\delta - \frac{1}{2} P \cdot d\delta = \frac{1}{2} P \cdot d\delta \quad (3)$$

La tasa de liberación de energía viene dada por la expresión:

$$G = \frac{dU_R}{dA} = \frac{1}{b} \frac{dU_R}{da} \quad (4)$$

Al aumentar la longitud de grieta a , la energía potencial elástica del sistema U_E disminuye. Por lo tanto, la energía liberada es negativa con respecto a la energía potencial:

$$G = -\frac{1}{b} \frac{dU_E}{da} \quad (5)$$

En este proyecto, se hará uso de una ecuación derivada de esta que se muestra en el apartado 12.1.1 de la norma:

$$G = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (6)$$

4 METODOLOGIA Y FABRICACIÓN

En este apartado se llevará a cabo una explicación acerca de los materiales y configuración elegidos para este proyecto, además del equipamiento utilizado y el proceso de fabricación de la pieza.

En este estudio se empleará la norma ASTM-D5528, Standart Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites [4] para llevar a cabo el análisis. Esta norma se basa en el Modo I (Figura 47) de la mecánica de la fractura elástica lineal, que se centra en la fractura interlaminar de materiales compuestos reforzados con fibra utilizando la muestra de viga en doble voladizo (DCB).

4.1 Metodología de ensayo

Tras la consulta de varios estudios realizados, [7], [8], [11], [13], se ha definido que las probetas fabricadas consten de una estructura formada por seis capas interiores de tejido tipo unidireccional (Figura 11) con una orientación de fibra de 0° como dictamina la norma ASTM-D5528 [4]. Previo al inicio de la fabricación, al analizar el tipo de ensayo que se le iban a realizar a las probetas, se identificó la aparición de flexión, por lo que se decidió incluir dos capas externas de tipo MAT (Figura 11), una superior y otra inferior como se muestra en la Figura 51, y aumentar la inercia de la pieza. Estas capas extra también le dan consistencia a la pieza, facilitando el corte y mejorando el acabado. Escogido el número de capas y comprobado que el espesor se encuentre dentro del rango de 3 a 5 mm especificado en el apartado 8.4 de la norma [4], se ha determinado que la configuración elegida será la que se fabrique. Además, se ha optado por realizar una puntada cada 4 cm² con un hilo de poliéster para el stitching, evitando grandes concentradores de tensión en aquellas zonas donde se encontrasen los hilos. Ambas decisiones han sido adoptadas para concentrarse exclusivamente en el comportamiento de las probetas a la delaminación.

MAT
0°
0°
0°
GRIETA
0°
0°
0°
MAT

Figura 51. Configuración escogida para el material.

Se ha determinado realizar cuatro configuraciones diferentes de probetas:

- I. Probeta con una grieta.
- II. Probeta con una grieta reforzada con stitching.
- III. Probeta con dos grietas.
- IV. Probeta con dos grietas reforzada con stitching.

La selección de estas configuraciones, permite realizar un análisis del efecto que tiene la incorporación de stitching en el material y también evaluar el impacto que tiene la aparición de varios defectos en el interior de la estructura.

Tras la decisión de las configuraciones de las probetas, se procede a su diseño y selección de dimensiones. La norma proporciona una muestra del resultado final de la probeta (Figura 52), junto con la simbología que identifica cada una de las dimensiones de los elementos que la componen (Tabla 4).

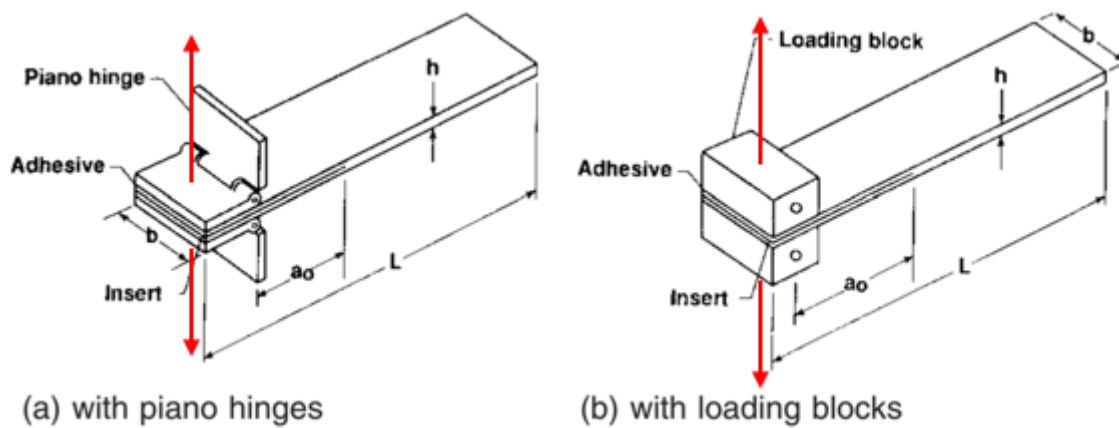


Figura 52. Probetas de doble viga en voladizo [4].

Símbolo	Significado
L	Longitud de la probeta
b	Ancho de la probeta
h	Espesor de la probeta
a_0	Longitud inicial de grieta

Tabla 4. Significado simbología.

Según se especifica en el apartado 8.3.1 de la norma [4], las probetas deben tener una longitud de al menos 125 mm y un ancho de entre 20 y 25 mm. Tras comprobar las dimensiones de la máquina de ensayo, se ha decidido que las dimensiones finales sean de 185x20 mm. La norma [4] menciona que el ensayo puede realizarse mediante el uso de bisagras de piano o bloques de carga (Figura 52), y según se elija, la longitud de grieta total deberá tener una distancia. Este estudio se realizará mediante unas bisagras de piano de la marca RS cuyas dimensiones se muestran en la Figura 53 [50].

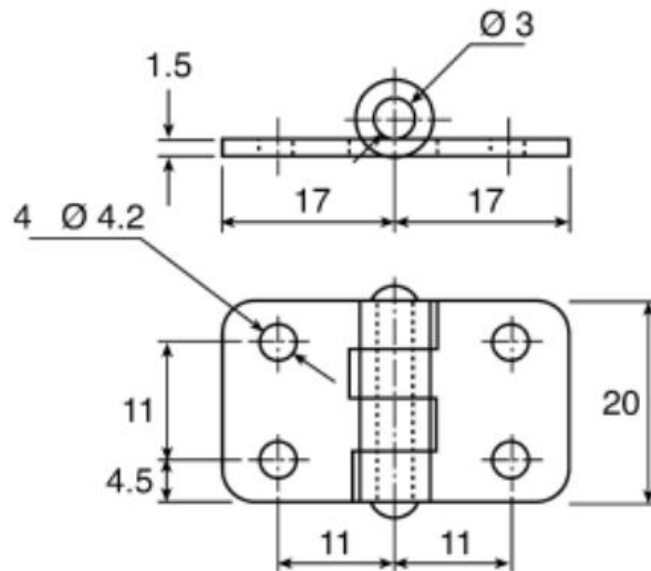


Figura 53. Dimensiones bisagras de piano [50].

En el apartado 8.3.2 se indica que la grieta debe tener una longitud inicial de 50 mm más la longitud adicional requerida para unir las bisagras. La superficie que está en contacto con el material es de 17x20 mm, por lo que la longitud de grieta total debe ser de 67 mm.

Como se ha mencionado con anterioridad, otra configuración incluye una segunda grieta. Esta disposición no está incluida en la norma, pero va a ser realizada para ver el efecto que tiene en la propagación de la grieta principal. Al no mencionar nada y tras analizar las dimensiones escogidas hasta el momento para las probetas, se ha decidido que la segunda grieta estará a 20 mm del final de la grieta principal y tendrá una longitud de 5 mm.

Determinadas todas las dimensiones necesarias para proceder a la fabricación del material, las variantes finales se presentan en la Figura 54.

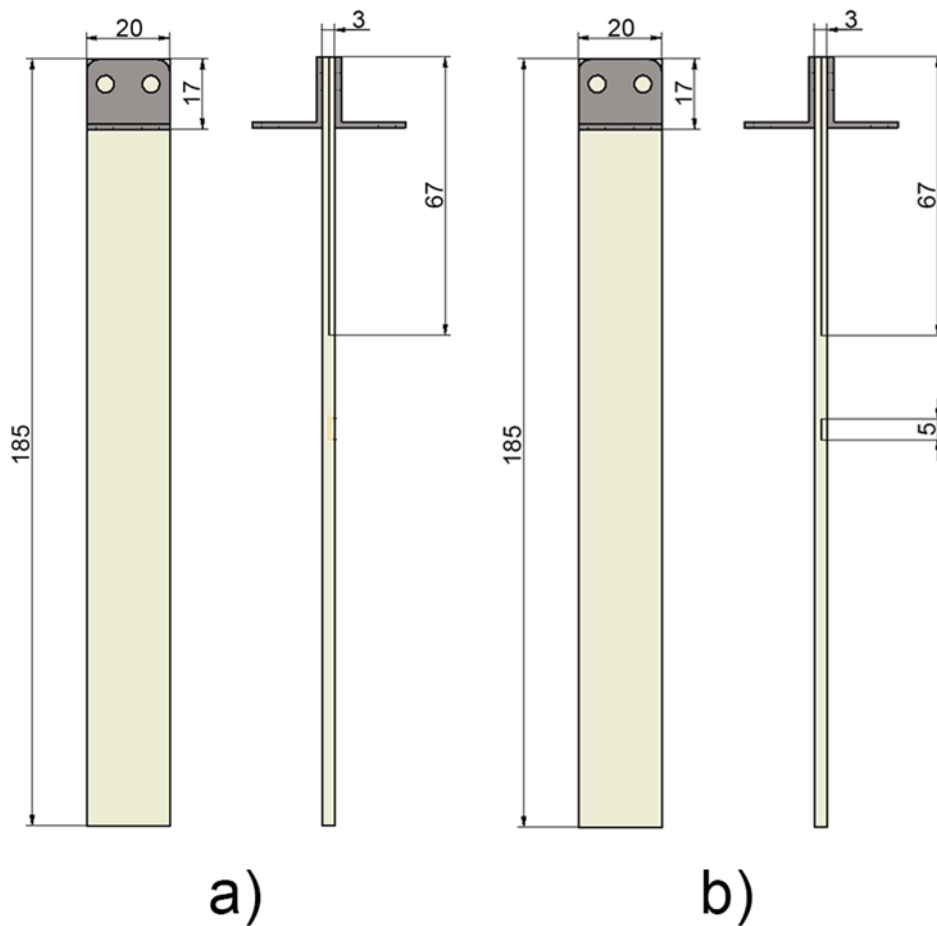


Figura 54. a) Probeta con una grieta. b) Probeta con dos grietas.

Previo al inicio del ensayo, es importante conocer las condiciones que deben cumplirse. En el apartado 11.8.1 de la norma [4] se especifica que la velocidad de apertura debe situarse en un rango entre 1 y 5 mm/min. Esta velocidad debe ser constante hasta el final de la delaminación del material. Además de estas especificaciones, la máquina de ensayo (apartado 4.3.3) requiere ciertos parámetros de seguridad, como el desplazamiento máximo y la fuerza máxima.

Tras analizar las especificaciones de la norma y la máquina, se determinaron las siguientes condiciones de trabajo:

- Velocidad de apertura de 5 mm/min.
- Desplazamiento máximo de 120 mm.
- Fuerza máxima de seguridad de 5 kN.

Para controlar el avance de grieta, se realizarán marcas cada 2 milímetros a las probetas y mediante la toma de imágenes se obtendrán los resultados.

También se realizará un ensayo a tracción de una probeta formada por diez hilos impregnados en resina. Esto es necesario para ver la resistencia que opone el hilo al material.

4.2 Materiales y herramientas

Los materiales y herramientas con las que se ha llevado a cabo la fabricación del material son:

4.2.1 Fibra y resina

Fibra de vidrio

Tejido de tipo unidireccional unido a base de ligante en polvo, suministrado por Castro Composites en forma de rollo y con un gramaje de 300 g/m². Tejido tipo MAT de 300 g/m² con ensimaje de ligante polvo, suministrado en forma de rollo por TF3P Composites con referencia MAT EMU 300 – 1 [51].

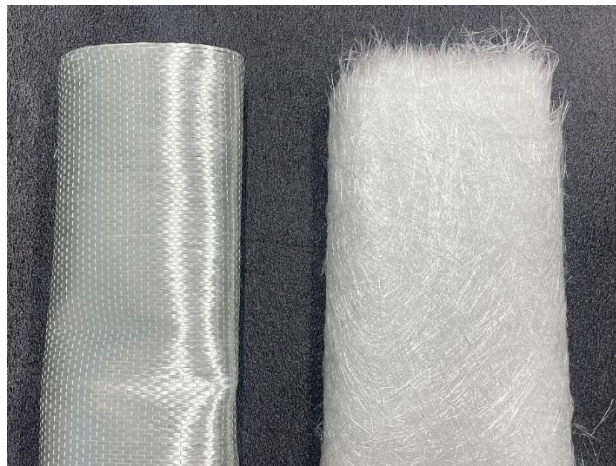


Figura 55. Rollos de fibra de vidrio unidireccional (izquierda) y tipo MAT (derecha).

Resina y catalizador

Resina de poliéster IN-5RPP para infusión por vacío suministrada por TF3P [52]. Incluye un catalizador que se añade a la resina con una proporción del 2% en peso, es decir que cada 100 gramos de resina de poliéster, se agregan 2 gramos de catalizador.



Figura 56. Resina poliéster y catalizador.

4.2.2 Herramientas

Tijeras

Tijeras especiales para el corte de fibra de vidrio de la marca Airtech [53]. Disponen de un movimiento conocido como “cantiléver”, el cual reduce entre un 50-70 % el esfuerzo necesario para cortar la fibra.



Figura 57. Tijeras.

Aguja e hilo

Hilo 100% de poliéster SABA C de 500 metros y aguja de acero inoxidable para cosido de telas de grandes dimensiones.



Figura 58. Aguja e hilo.

Báscula

Báscula digital con una precisión de 0,01 gramo.



Figura 59. Báscula.

Adhesivo

Adhesivo epoxi de dos componentes, una resina y un endurecedor, del proveedor Araldite. Resiste temperaturas desde -30°C a 80°C , gran parte de disolventes orgánicos e inorgánicos, vibraciones y golpes.



Figura 60. Adhesivo Araldite extra fuerte.

4.2.3 Componentes de la fabricación

Tubo

Tubo de polietileno de baja densidad con pared anti-colapso, de diámetro exterior de 12 mm e interior de 10 mm suministrado por TF3P [52].



Figura 61. Tubo de polietileno.

Conectores de vacío

Conectores de vacío en forma de "L" y "T" de polietileno con un diámetro exterior de 12 mm.



Figura 62. Conectores de vacío.

Masilla de sellado

Masilla Airseal 2T de la marca Airtech [53] y distribuida por TF3P [52], diseñada para aplicaciones a temperatura ambiente y en hornos a temperatura moderada. Con unas dimensiones de 3,2 mm x 12 mm x 15,24 mm, esta masilla puede utilizarse con seguridad hasta 150°C cuando se sellan bolsas entre sí.



Figura 63. Masilla de sellado.

Bolsa de vacío

Bolsa para vacío e infusión Wrightlon 7400 para uso a baja y alta temperatura suministrado en formato tubular por TF3P [52]. La bolsa está fabricada con material nylon de color verde translúcido, posee una elongación del 400% y su temperatura máxima de uso alcanza los 204 °C.



Figura 64. Bolsa de vacío.

Film sangrador

Es una malla de distribución tejida de resina, diseñada para procesos de vacío e infusión con resinas de poliéster, viniléster y epoxi suministrado por Castro Composites [51]. Incorpora un film desmoldeante perforado P0 de 800 micrones de diámetro, adherido a una malla tejida con un adhesivo neutro y soluble en resina que no afecta al flujo durante el proceso. El conjunto posee un gramaje de 139 g/m², un espesor de 1110 micrones y su temperatura máxima de servicio asciende a los 100 °C.



Figura 65. Film sangrador.

Canal de velocidad

Canal plano para infusión de resinas termoestables y generación de vacío Diadrain 50 mm x 5 m lineales suministrado por Castro Composites [51], compuesto por una malla plástica de alta resistencia a compresión recubierta de un velo superficial de protección cuya máxima temperatura de servicio es de aproximadamente 80°C. Es un conducto que facilita el flujo de la resina a través del laminado de fibras, ayudando a distribuirla de manera uniforme.



Figura 66. Canal de velocidad.

Tejido peel-ply

El tejido peel-ply o tejido pelable permiten el paso de la resina a su través, por lo que pueden usarse como sustitutos de los films sangradores. En este caso se usarán como capas externas que le darán a la pieza una textura rugosa y homogénea en su superficie, permitiendo un mejor procesado exterior en la aplicación de adhesivos.



Figura 67. Tejido peel-ply.

Cera

La cera sólida es necesaria para que el material no se quede pegado a la superficie tras el proceso de infusión. Hay que tener cuidado a la hora de su aplicación, ya que si entra en contacto con la masilla selladora puede afectar a la estanqueidad de la bolsa.



Figura 68. Cera sólida.

Film separador

El film separador elaborado con polietileno, permite la creación controlada de defectos en el material manteniendo las capas correctamente separadas en el proceso de infusión. Se coloca en el centro del material como se muestra en la Figura 51, permitiendo que la resina penetre en las capas y manteniendo la superficie de contacto entre ellas separadas, generando así la grieta.



Figura 69. Film separador.

4.2.4 Elementos adicionales

Bisagras

Bisagras de piano de giro libre HINGE 40447 ZL realizadas con acero recubierto de zinc, suministradas por RS [50], y de acuerdo a las especificaciones de la norma de ensayo. Las dimensiones se muestran en la Figura 53.



Figura 70. Bisagras de piano.

4.3 Equipamiento

Equipamiento que ha sido utilizado tanto en el proceso de fabricación como en el ensayo del material:

4.3.1 Bomba de vacío

Bomba de vacío de gas de paletas rotativas monoetapa estándar BACOENG BA-1 [54], de alta eficiencia y bajo nivel de ruido. Equipada con una resistente carcasa de aleación de aluminio que le otorga de gran resistencia y durabilidad, un motor de accionamiento directo que permite un arranque sencillo, un ventilador de enfriamiento interno y una mirilla que facilita el control del nivel de aceite. Incluye una trampa de resina, un manómetro de vacío, una manguera con conector, una tapa de silicona y aceite para la bomba de vacío.



Figura 71. Bomba de vacío.

Voltaje	CA 110V/60 Hz
Velocidad de bombeo	3,6 CFM
Vacío máximo	0,8 Pa
Velocidad de rotación	1720 rpm
Capacidad de aceite	250 ml
Potencia	1/4 HP
Válvula de entrada	1/4" SAE

Figura 72. Especificaciones técnicas de la bomba de vacío.

4.3.2 Cortadora por chorro de agua

Cortadora por chorro de agua abrasivo TCI Cutting BP-C 1515, con capacidad de procesar diversos materiales como polímeros termoestables y termoplásticos, metales férricos y no férricos, maderas o cerámicas. Posee un sistema de movimiento de 5 ejes que permite mecanizar superficies planas o con ligeras variaciones de altura con dimensiones de hasta 1200 x 1200 x 180 mm, alcanzando una alta velocidad de avance de hasta 42 m/min.



Figura 73. Cortadora TCI Cutting BP-C 1515.

4.3.3 Máquina de ensayo universal industrial

Máquina de ensayo universal Instron 5967 con capacidad de 30 kN [55].



Figura 74. Máquina de ensayo universal Instron 5967.

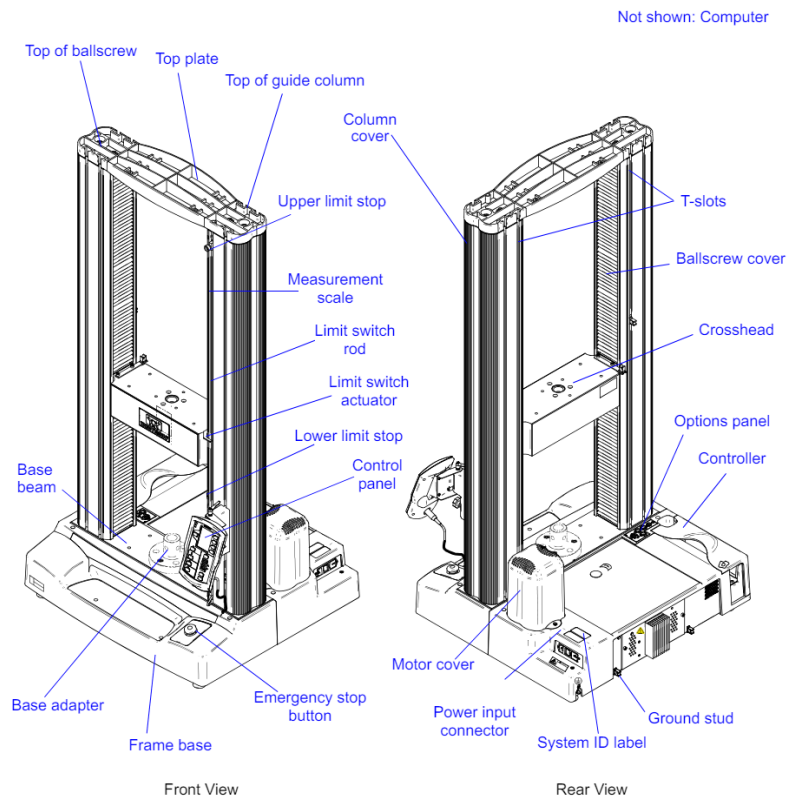


Figura 75. Esquema máquina de ensayo [55].

4.3.4 Cámara industrial digital

Cámara AVT Mako U-130B · ½ format · C-Mount · 1280 x 1024 · 168 fps máximos · Monocromo [56]. La distancia focal de la lente empleada en el ensayo fue la de 35 mm.



Figura 76. Cámara AVT Mako U-130B.

4.3.5 Microscopio digital

Microscopio portátil digital PCE-MM200 que ofrece un aumento de hasta 200 veces el tamaño real. Lleva integrada iluminación LED ajustable para una correcta visualización y cuenta con función de captura de imágenes y vídeo.



Figura 77. Microscopio digital PCE-MM200.

4.4 Fabricación

Todo el proceso de fabricación del material requiere el uso de protección, el cual incluye bata, guantes, mascarilla y gafas protectoras.

Se comienza con el corte de las láminas de fibra de vidrio. Para ello, se marcan las dimensiones de las láminas y con las tijeras se cortan doce láminas de fibra de vidrio unidireccional y cuatro láminas tipo MAT.



Figura 78. Corte láminas.

Tras cortar las láminas y para evitar el movimiento de las fibras, se fijan los extremos con cinta de carroceros.

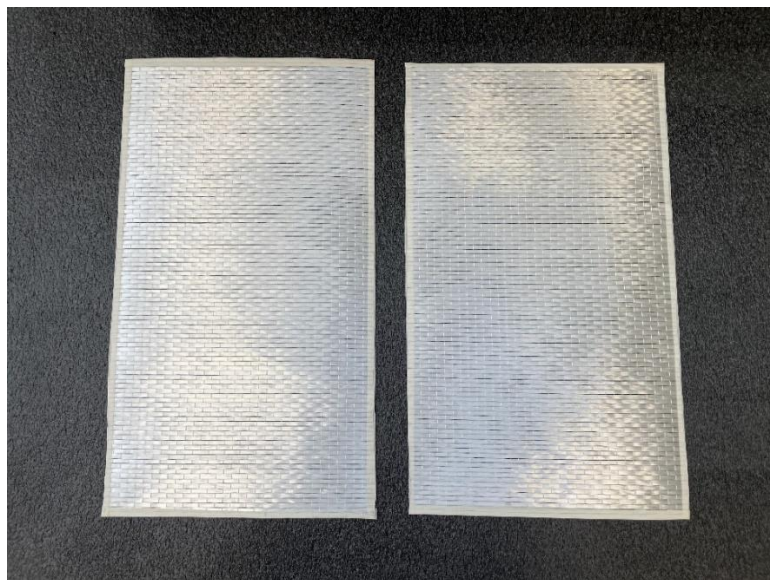


Figura 79. Láminas de fibra de vidrio.

Al tratarse de cuatro configuraciones diferentes con dos modelos de grietas y para aprovechar el máximo material, se van a fabricar dos piezas. Una pieza tendrá una grieta, la otra tendrá dos grietas y, en ambos, casos la mitad de la pieza estará cosida. De esta manera, de cada pieza de material se obtendrán dos configuraciones.

Para tener una orientación respecto a la ubicación de los defectos y evitar algún fallo en la colocación del laminado, en la capa superior se ha dibujado un esquema como se muestra en la Figura 80, siendo la franja roja la superficie que tiene el defecto.

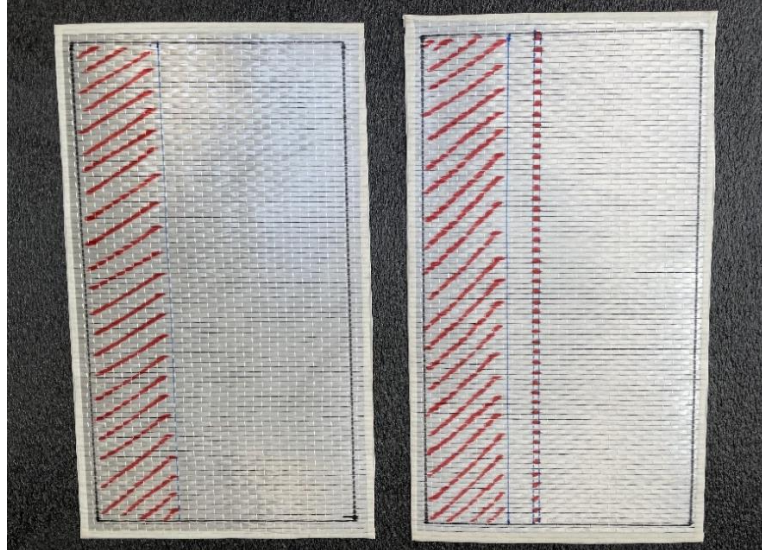


Figura 80. Esquema del material con una grieta (izquierda) y dos grietas (derecha).

Aprovechando la cinta de carroceros, se ha realizado una marca en el centro del laminado como se muestra en la Figura 81 para así poder alinear correctamente todas las láminas y delimitar la superficie de cosido, ya que este solo se le realizará a la mitad del material.



Figura 81. Disposición final del laminado.

Con todas las láminas preparadas, se procede al cosido de las piezas. Al ser un hilo de poliéster el elegido, y ante el mal funcionamiento de la máquina de coser a la que se tiene acceso, se ha tomado la decisión de realizar el cosido manualmente.

Para simplificar el proceso de cosido, se ha elaborado un esquema en un folio (Figura 82 y Figura 83) donde se indican la posición de cada probeta y las puntadas del cosido. Con el fin de evitar grandes concentradores de tensión en las zonas donde se encuentra el hilo, se elige realizar una puntada cada 4 cm².

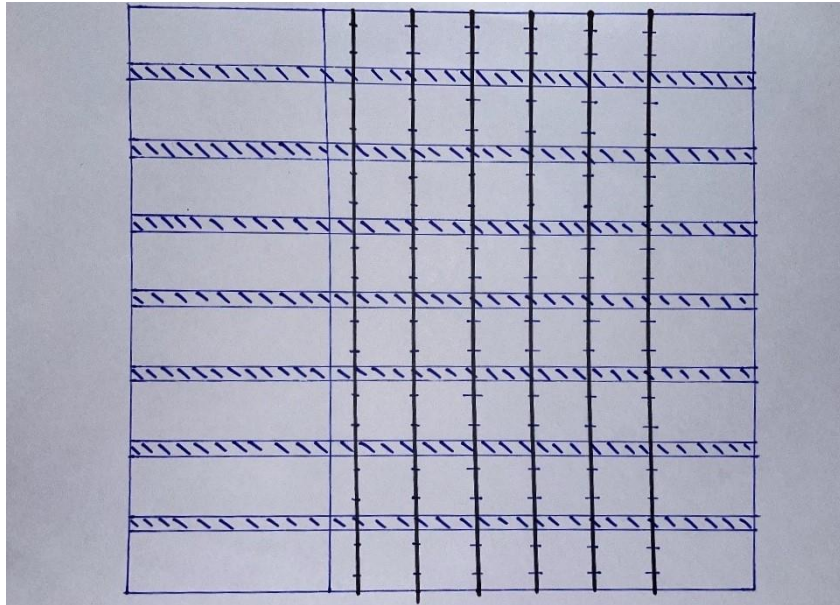


Figura 82. Esquema cosido material con una grieta.

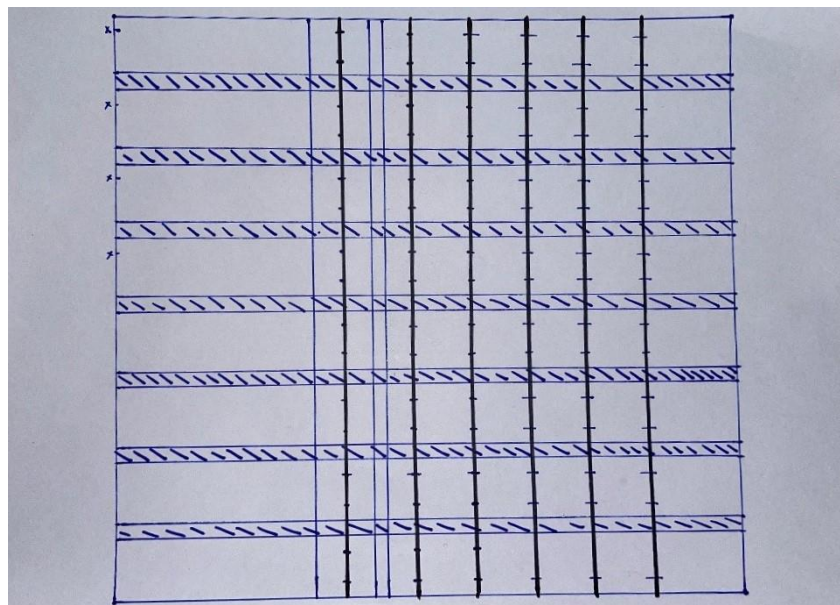


Figura 83. Esquema cosido material con dos grietas.

Debido a la poca visibilidad a la hora de coser, se coloca un sistema de iluminación en la parte inferior de la mesa (Figura 84), alumbrando la pieza y permitiendo realizar cada puntada con la mayor precisión posible.



Figura 84. Sistema de iluminación usado en el cosido.

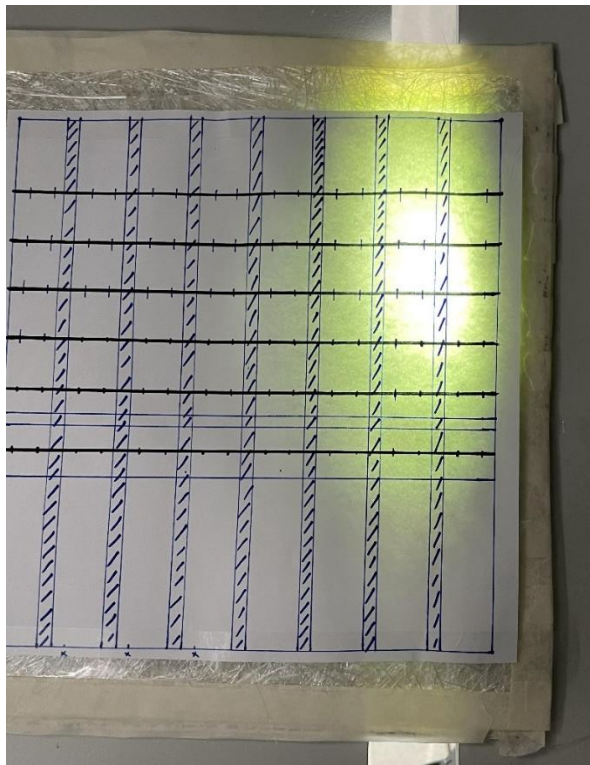


Figura 85. Visualización del material tras la instalación del sistema lumínico.

En el caso del material con dos grietas, se coloca la más pequeña antes de iniciar el proceso. Esto se debe a que entre las dos grietas hay que coser varios puntos, dificultando la inserción posterior de dicha grieta

Con todo el equipo y material preparado, comienza el proceso de cosido. En este proceso hay que tener cuidado con la penetración de la aguja en el material, debiendo ser esta lo más perpendicular posible para conseguir un resultado óptimo.

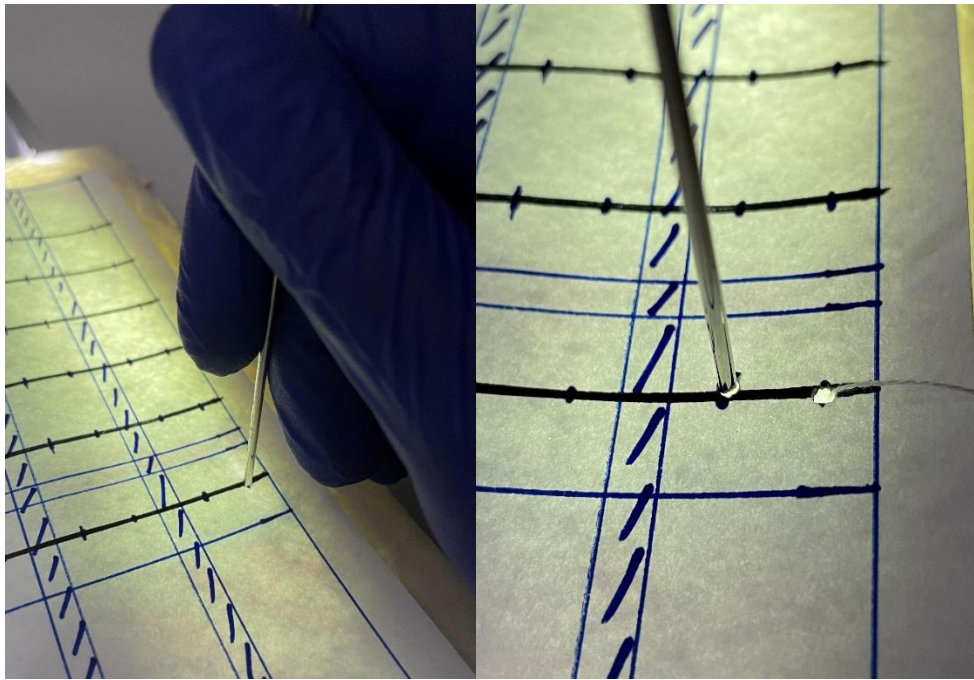


Figura 86. Proceso de cosido.

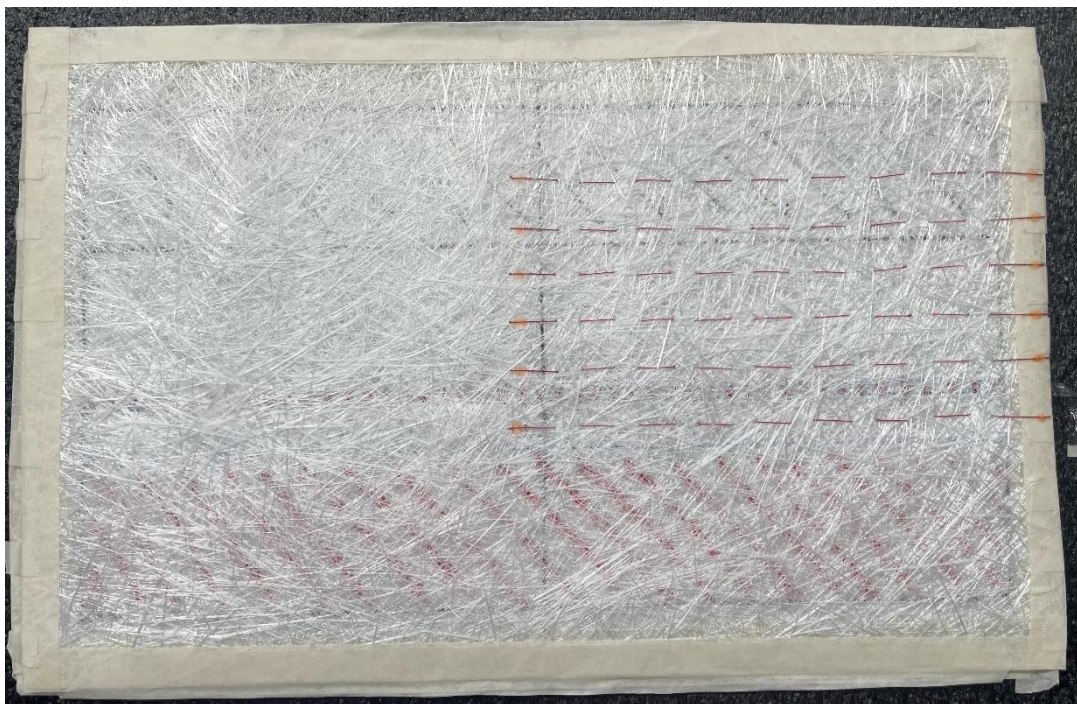


Figura 87. Resultado de una pieza tras el cosido.

Tras el cosido de ambas piezas, el siguiente paso es infundir la resina en el material. En este caso se ha escogido la realización de este proceso mediante el método de infusión por vacío, comentado con anterioridad en el apartado 3.2.3.

Previo a comenzar con este proceso, se procede a cortar una lámina de film sangrador (Figura 65) y dos láminas de tejido peel-ply (Figura 67) del mismo tamaño del material, y el film separador (Figura 69) necesario para la grieta principal. Tras estos pasos,

conviene presentar todos los componentes del laminado sobre la superficie de trabajo como se muestra en la Figura 88 para comprobar que estén preparados todos los materiales necesarios y asegurar su correcta disposición en la fabricación.



Figura 88. Disposición del laminado en la fabricación.

Para dar inicio al proceso de infusión por vacío, se procede a la preparación de la mesa de trabajo, que comienza con la aplicación de la masilla selladora (Figura 63) y de la cera sólida (Figura 68). Teniendo en cuenta las dimensiones de ambos materiales, se delimita la superficie necesaria de trabajo con la masilla y se aplica la cera con cuidado de no superponerla, ya que puede provocar un mal sellado de la bolsa. También deben cortarse dos fragmentos del canal de velocidad (Figura 66), para la entrada y salida de resina, y se les coloca en el centro un conector en forma de “T”.

Con todos los materiales preparados y la mesa de trabajo lista, se coloca todo en la posición requerida (Figura 89) y se procede a la preparación de la bolsa de vacío.

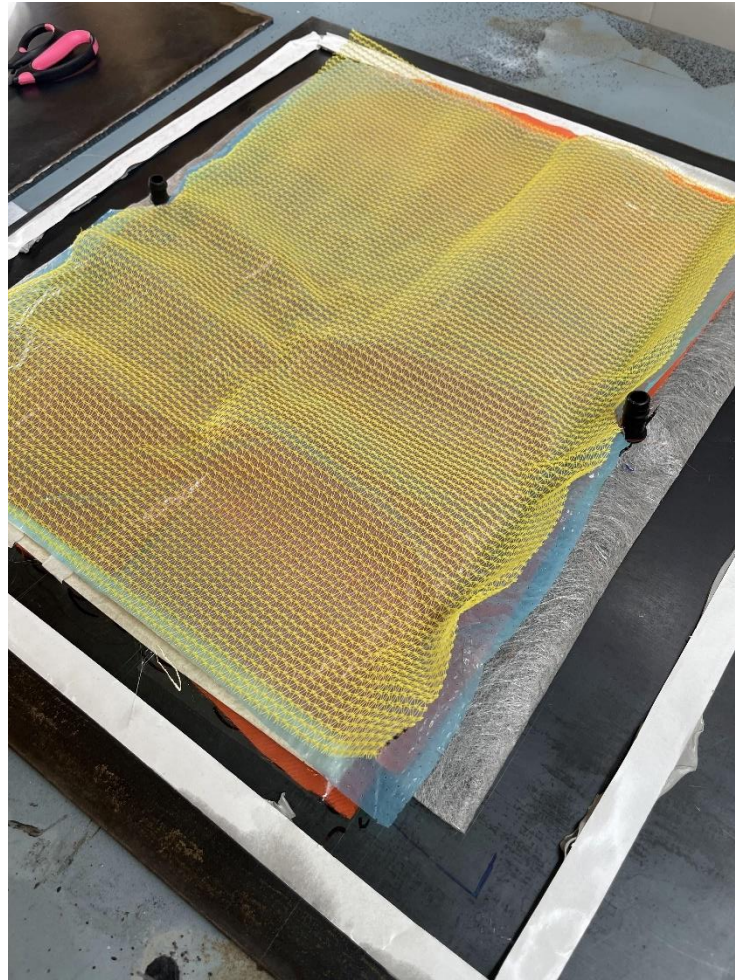


Figura 89. Disposición final del laminado previo a la colocación de la bolsa de vacío.

La bolsa de vacío es el elemento más importante en este método de fabricación. Su función es la de sellar todo el laminado, por lo que una mala colocación puede afectar al proceso derivando en un mal acabado de la pieza.

A la hora de aplicar el vacío, es importante que la bolsa se adecúe a las irregularidades del material como se muestra en la Figura 90, para evitar tensiones y posibles problemas en el proceso de infusión. Por esta razón, se recomienda que la bolsa tenga un 30% más de superficie que la delimitada por la masilla selladora.

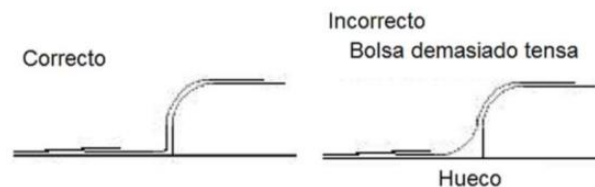


Figura 90. Colocación de la bolsa de vacío tras la aplicación de vacío [13].

Para que la bolsa cierre correctamente, se comienza adhiriéndola por sus esquinas a la masilla (Figura 91).

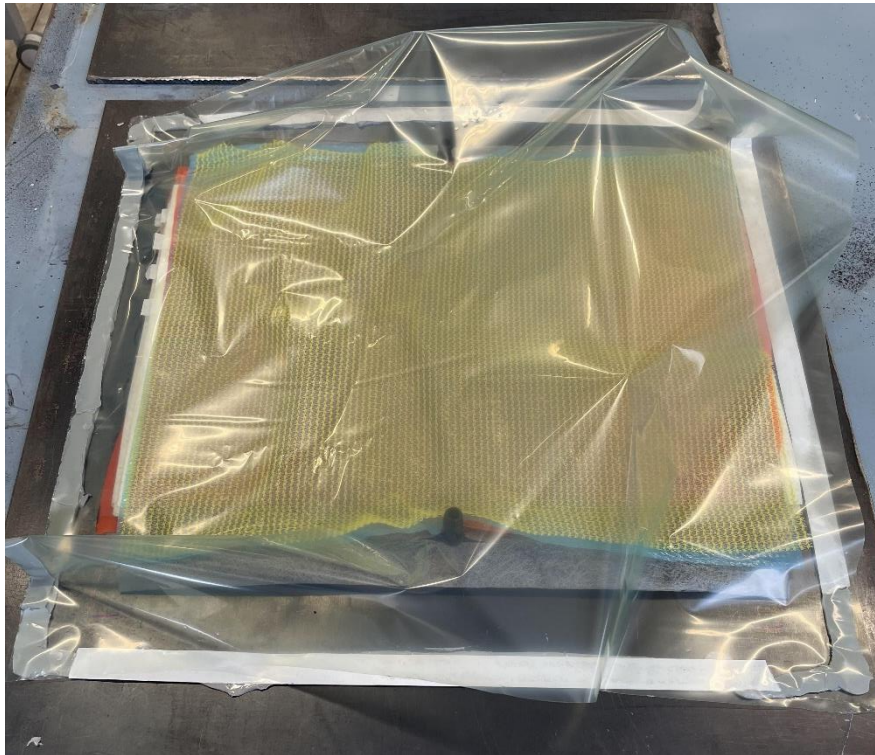


Figura 91. Comienzo de colocación de la bolsa de vacío.

Posteriormente, desde el centro de cada uno de los laterales, se comienza a pegar la bolsa sobre la masilla hacia las esquinas. Cuando se observa un exceso de bolsa previo a llegar a las esquinas, se aplica la técnica conocida como “pliegues”, agregando un trozo adicional de masilla como se muestra en la Figura 92.

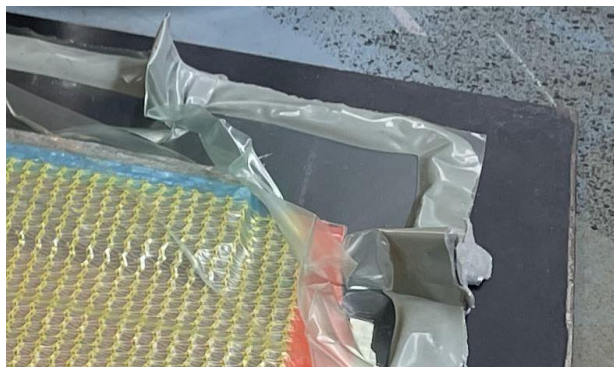


Figura 92. Pliegues en la bolsa de vacío.

Tras la colocación de la bolsa en el perímetro delimitado, se procede a realizar unas pequeñas incisiones en ella a la altura de los conectores en forma de “T” que se encuentran situados en los fragmentos del canal de velocidad. Se traspasa la bolsa con los conectores y se sella como se observa en la Figura 93.



Figura 93. Sellado de la incisión realizada con los conectores.

Terminada la colocación de la bolsa de vacío, se comprueba que esté todo bien sellado aplicando vacío a la bolsa.

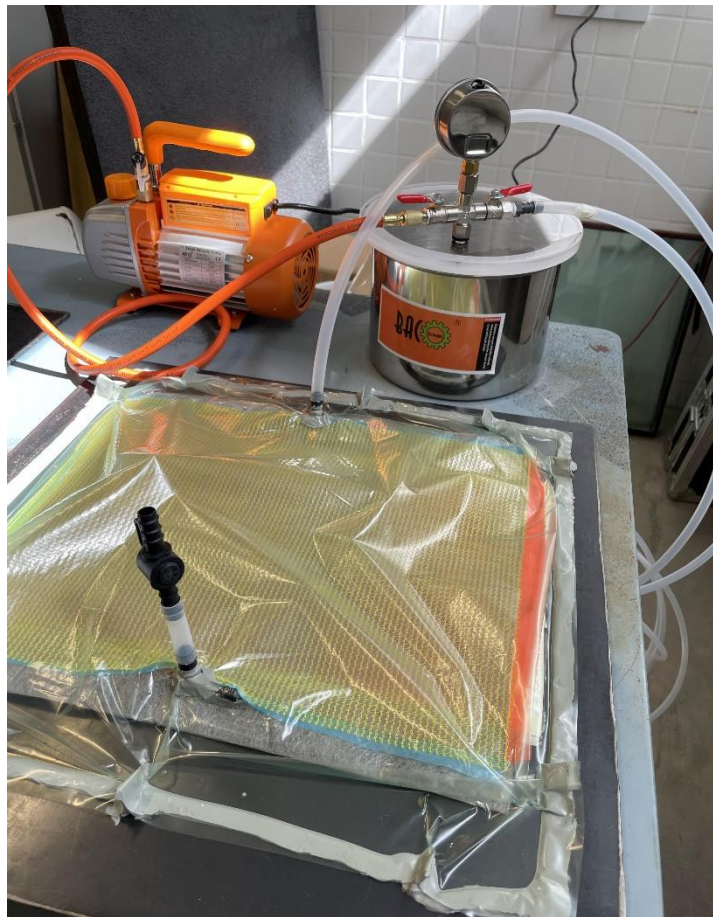


Figura 94. Bolsa preparada previo a la aplicación de vacío.

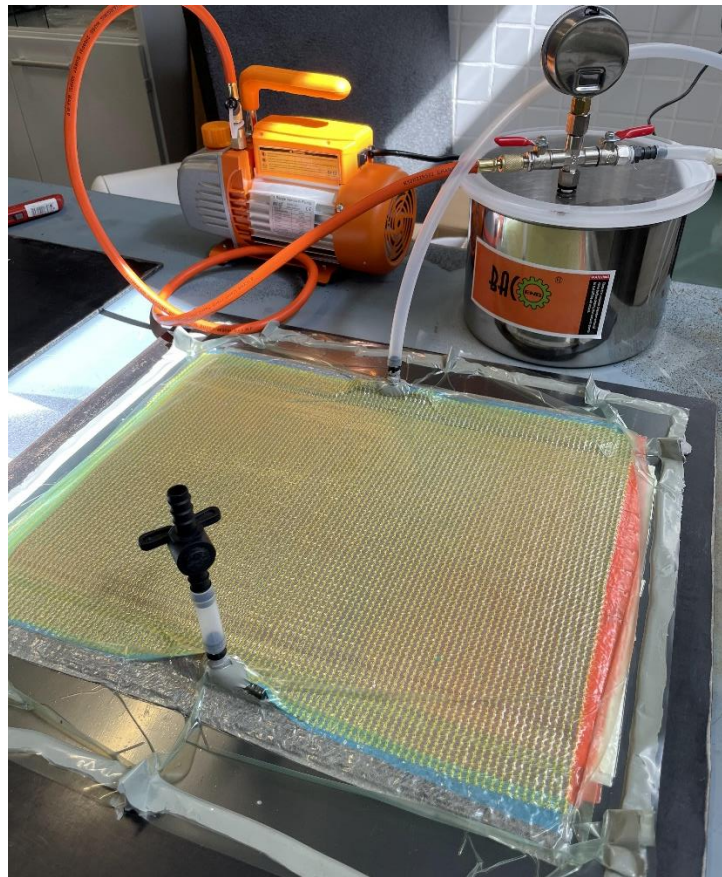


Figura 95. Prueba de vacío para verificar un correcto sellado.

Al tratarse de dos piezas las que se van a realizar, se preparan dos bolsas de vacío y se introducen en el interior los laminados con su correcta disposición. Para economizar el uso de materiales, ambas piezas han sido infundidas a la vez en diferentes bolsas como se muestra en la Figura 96.

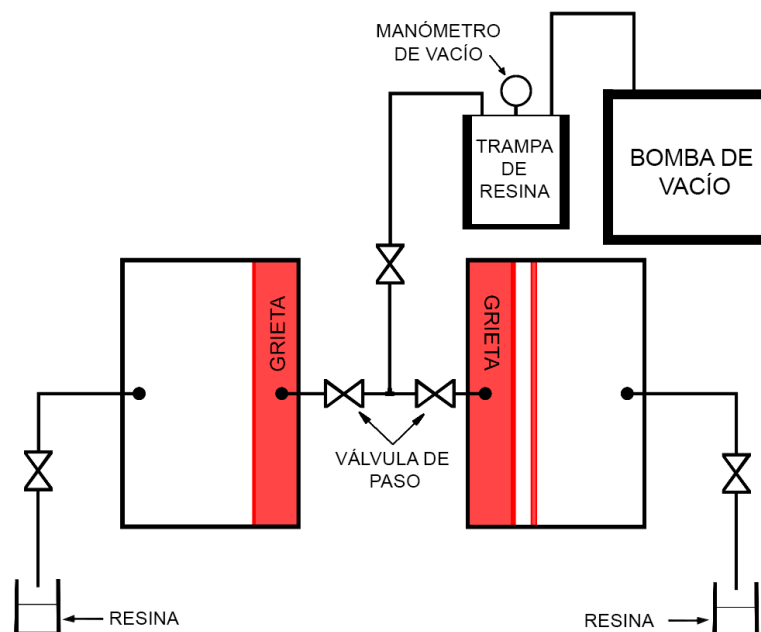


Figura 96. Esquema del proceso de infusión por vacío.

Colocados ambos laminados en sus respectivas bolsas, se procede a la mezcla de resina y catalizador. Es muy importante realizar este paso una vez que esté todo preparado, ya que esta mezcla acelera la solidificación de la resina y es crucial realizar la infusión lo antes posible.

Hay que seguir las instrucciones del fabricante para llevar a cabo la mezcla correcta de resina. En este caso, el fabricante especifica que el catalizador debe ser añadido a la resina en una proporción del 2% en peso. Al preparar una mezcla de 300 gramos para cada una de las piezas, se destinarán 294 gramos de resina y 6 gramos de catalizador, asegurando así una correcta proporción para el proceso de catalización.

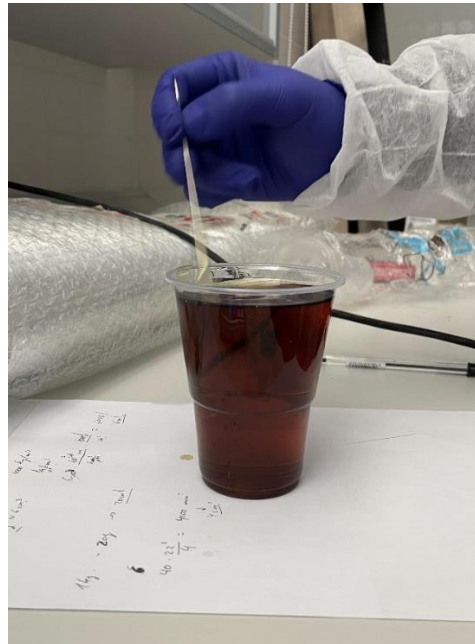


Figura 97. Preparación de la mezcla de resina y catalizador.

Con todo preparado, comienza el proceso de infusión. Es crucial monitorear el vacío generado por la bomba para permitir que la resina avance de manera constante a través del laminado, llenando por completo todos los espacios vacíos. Sin embargo, es importante evitar un avance excesivamente lento, ya que esto puede derivar en una solidificación prematura y resultar en la aparición de defectos en la pieza final. En todo este proceso es fundamental utilizar el equipo de protección. Una vez han sido infundidas ambas piezas, se debe continuar controlando la presión de vacío hasta que se note que la resina ha empezado a solidificar.

Se espera un período de 24 horas para asegurar la correcta solidificación del material. Tras ese tiempo el material adquiere la forma que se muestra en la Figura 98, lo que indica que se puede proceder a realizar el desmoldeo.



Figura 98. Piezas solidificadas tras 24 horas.

Tras retirar la bolsa de vacío, es necesario eliminar las capas de film sangrador y peel-ply (Figura 99). Este paso se realiza de manera sencilla y no presenta complicaciones en el proceso.

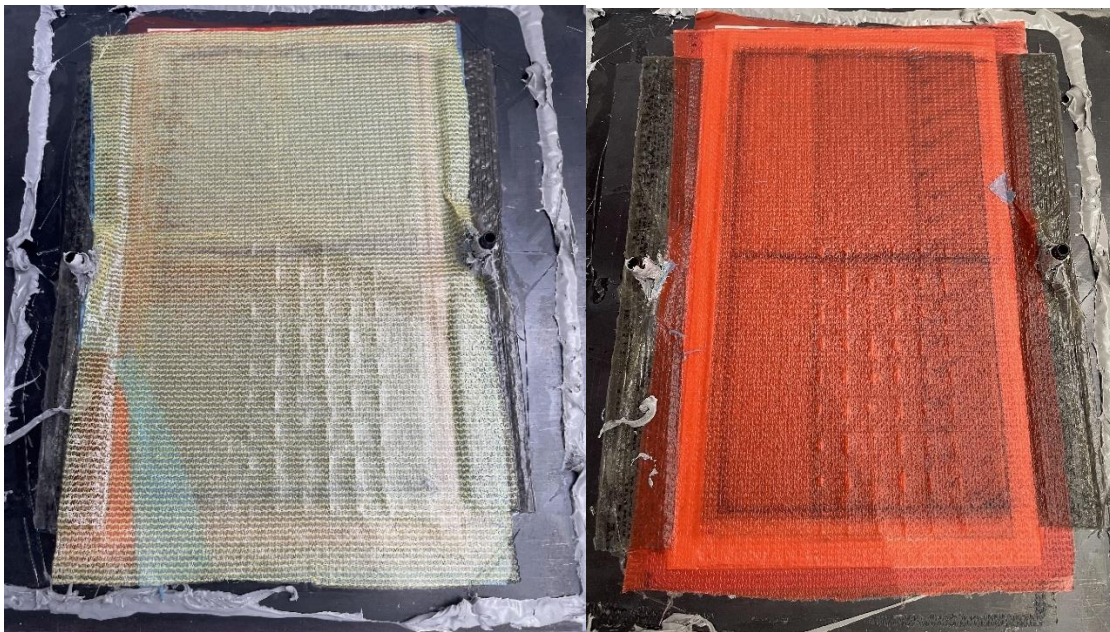


Figura 99. Eliminación del film sangrador (izquierda) y peel-ply (derecha).

Tras la eliminación de los materiales sobrantes, se someten a las piezas a un proceso en el cual se meten en un horno durante 16 horas a una temperatura de 40°, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Al finalizar el proceso, quedan como se ilustra en la Figura 100.

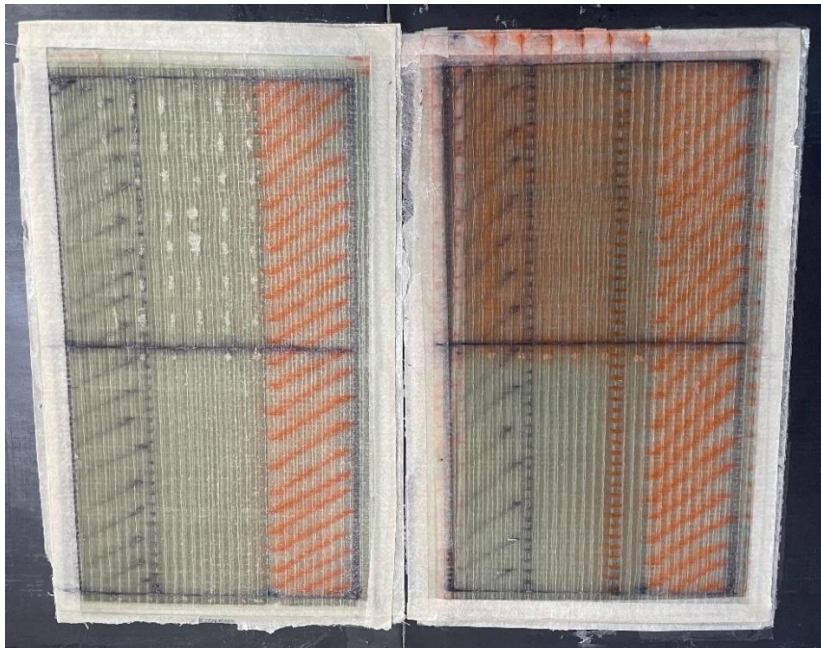


Figura 100. Laminado terminado.

Previo al corte, se asignaron códigos para identificar cada probeta, basados en la posición de cada probeta en sus respectivas láminas. Los códigos fueron los siguientes:

- G1UN para las probetas con una grieta sin coser.
- G1SN para las probetas con una grieta cosidas.
- G2UN para las probetas con dos grietas sin coser.
- G2SN para las probetas con dos grietas cosidas.

La letra "N" varía de 1 a 5, representando la posición que tenía cada probeta, de izquierda a derecha.

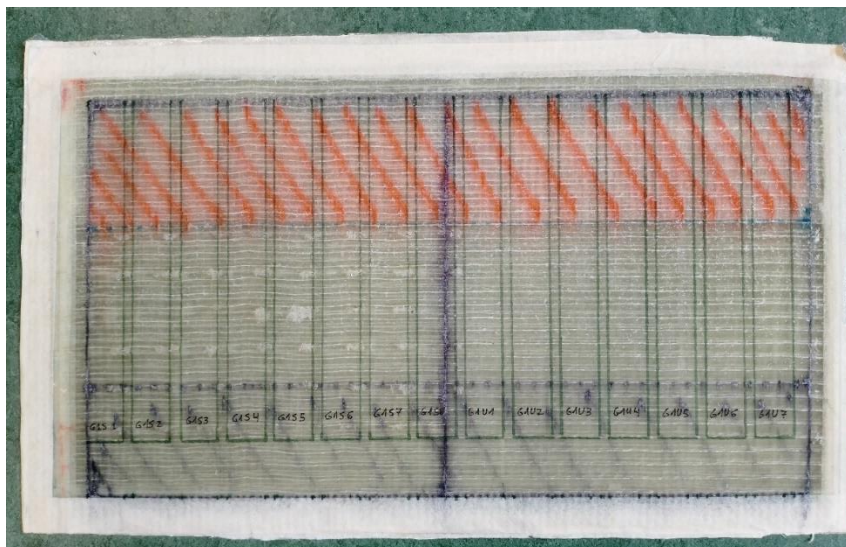


Figura 101. Esquema de las probetas con una grieta con sus respectivos códigos.

proyectos, a los cuales se les pegaron cuatro bisagras, utilizando en cada una un tipo de adhesivo. En la cara del material se indicó que adhesivo se utilizó en cada bisagra.



Figura 104. Adhesivos escogidos para la prueba.

Tras 24 horas de secado para asegurar que todos estuviesen funcionando en óptimas condiciones, se les realiza un ensayo en la máquina de ensayo universal para observar cómo actúa cada adhesivo.



Figura 105. Ensayo de prueba de los adhesivos.

Tras el ensayo, se determinó que los dos adhesivos con mejor resultado eran el Araldite y el Loctite. Finalmente, se optó por el Araldite como producto final a utilizar, debido a los buenos resultados que había ofrecido en proyectos anteriores.

Una vez recibidas todas las probetas, se comprobó que todas tenían las dimensiones deseadas y no había que desechar ninguna para el ensayo. Además, se obtuvieron más probetas de las necesarias para el ensayo, lo que aseguraba una disponibilidad adicional en caso de inconveniente durante el proceso.

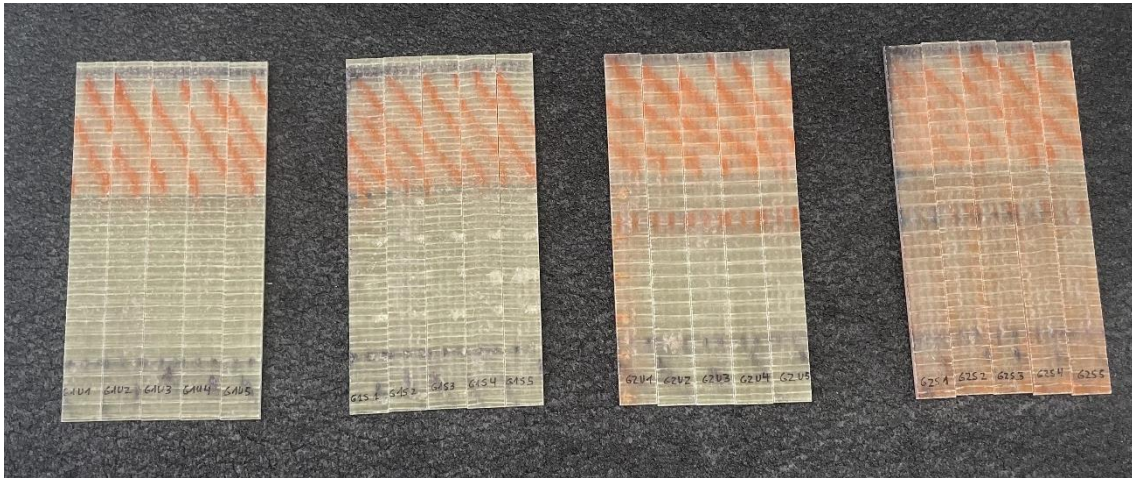


Figura 106. Probetas a ensayar obtenidas tras el corte.

En el ensayo se contaría con una cámara digital (apartado 4.3.4), la cual permite medir la longitud de grieta durante el proceso mediante la toma de imágenes. Para asegurar una visibilidad adecuada de las probetas y poder referenciar el crecimiento de grieta, estas fueron pintadas de blanco para así crear un contraste en las fotografías.

Durante el proceso de pintado, se protegieron las áreas de las probetas que no debían ser pintadas. Esto incluyó la superficie de contacto de las bisagras con las probetas, para evitar interferencias en el pegado del adhesivo, así como uno de los dos bordes, donde el frente de grieta era claramente visible y necesario para pasos posteriores. Para ello, se usó cinta de carroceros como se muestra en la Figura 107.

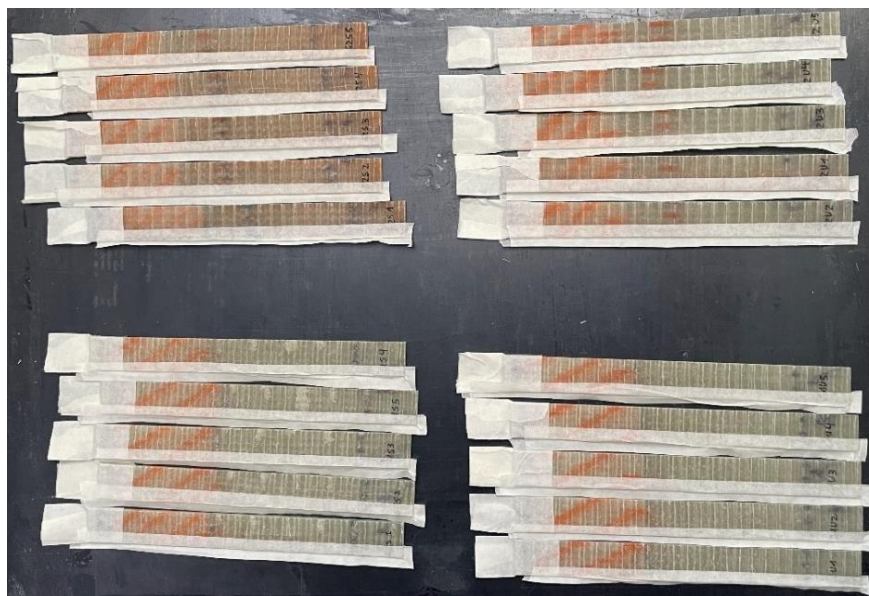


Figura 107. Probetas preparadas para el pintado.

Con todas las probetas preparadas, se procedió al pintado de las mismas. Este proceso fue llevado a cabo con un spray blanco junto con un sistema de protección que incluía guantes, bata y mascarilla, con el fin de evitar la inhalación de la pintura (Figura 108).



Figura 108. Probetas tras el pintado.

Después del pintado, se observó que parte de los códigos no eran fácilmente visibles, por lo que se procedió a repararlos nuevamente. Además, al considerar que el proceso de delaminación dividiría la probeta en dos partes, se escribió el código en la superficie opuesta para conservar las piezas y facilitar la identificación de cada parte.

Tras esto, se inició el proceso de pegado de las bisagras. Se prestó especial atención a la colocación exacta que debían tener estas en la norma, como se muestra en la Figura 52. Para fijar correctamente las bisagras y evitar cualquier movimiento previo al curado del adhesivo, se utilizaron pinzas de resorte como se muestra en la Figura 109.



Figura 109. Pegado de las bisagras.

Mediante este método, se llevó a cabo el pegado de cada una de las bisagras en todas las probetas.

Por último, antes de llevar a cabo el ensayo, se realizaron marcas de color rojo en el borde pintado de las probetas, con una separación de dos milímetros entre cada marca. Estas marcas se realizaron para monitorizar el avance de grieta. Dado que en el borde no pintado se observaba perfectamente el frente de grieta, éste se utilizó como referencia para la primera marca, a partir de la cual se pintaron el resto. En las probetas que contaban con dos grietas, las marcas se hicieron a partir de la grieta principal, obviando la segunda. Esto se debió a que con la segunda grieta se buscaba simular un defecto no visible a simple vista.



Figura 110. Marcas realizadas a las probetas para monitorizar el avance de grieta.



Figura 111. Probetas preparadas para el ensayo.

5 RESULTADOS

5.1 Dimensiones de las probetas

Como se ha mencionado anteriormente, se establecieron unas dimensiones específicas para las probetas. Sin embargo, al llevar esto a la práctica, es complicado que las dimensiones resulten repetitivas en todas las probetas. Por ello, se han tomado medidas de las dimensiones en tres puntos diferentes a lo largo de cada probeta (Figura 112), permitiendo identificar posibles variaciones y evaluar su impacto en los resultados obtenidos.

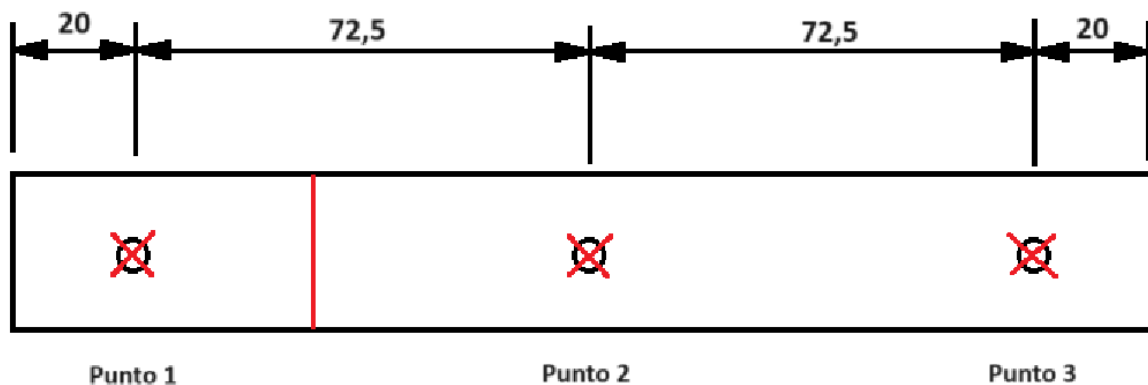


Figura 112. Puntos donde se han tomado los datos. La línea roja indica el frente de grieta.

Se ha comprobado que todas las probetas poseen una longitud similar, con una variación de aproximadamente $\pm 0,01$ mm. Este error no afectará significativamente a los resultados por lo que solo se mostrarán los valores necesarios, en este caso el espesor y el ancho donde si se observan más diferencias. En la Tabla 5 se muestran las dimensiones de las probetas.

	Punto 1		Punto 2		Punto 3	
	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho
G1U1	3,20	19,75	3,20	19,75	3,20	19,70
G1U2	3,25	19,70	3,25	19,75	3,35	19,70
G1U3	3,20	19,70	3,15	19,70	3,30	19,70
G1U4	3,30	19,75	3,25	19,75	3,35	19,75
G1U5	3,30	19,85	3,30	19,80	3,30	19,80
G1S1	3,30	19,80	3,30	19,70	3,40	19,70
G1S2	3,40	19,80	3,40	19,75	3,40	19,75
G1S3	3,50	19,80	3,35	19,70	3,30	19,70
G1S4	3,35	19,70	3,40	19,70	3,45	19,70
G1S5	3,30	19,70	3,30	19,70	3,50	19,70
G2U1	3,30	19,70	3,25	19,65	3,30	19,55
G2U2	3,20	19,70	3,30	19,65	3,30	19,65
G2U3	3,40	19,60	3,20	19,70	3,30	19,70
G2U4	3,20	19,75	3,30	19,75	3,30	19,70
G2U5	3,30	19,70	3,25	19,70	3,20	19,65
G2S1	3,40	19,75	3,35	19,70	3,40	19,70
G2S2	3,30	19,70	3,20	19,70	3,30	19,70
G2S3	3,40	19,70	3,35	19,70	3,35	19,70
G2S4	3,30	19,70	3,30	19,70	3,35	19,70
G2S5	3,30	19,70	3,30	19,65	3,35	19,65

Tabla 5. Dimensiones de las probetas.

Lo más significativo es el valor del ancho de las probetas, que como se mencionó anteriormente debía situarse en un rango de entre 20 y 25 mm. Pese a esta pequeña variación de 0,45 mm en el mayor de los casos, se continuó con el estudio.

En el caso del espesor, estas variaciones son menores, 0,25 mm en el mayor de los casos. Estas variaciones son comprensibles debido a la dificultad de lograr una uniformidad perfecta durante el proceso de infusión, ya sea por el vacío de la bolsa o por las pequeñas irregularidades de la superficie de trabajo.

Analizando todos los datos recopilados, no se observan variaciones significativas ni entre probetas ni a lo largo de una misma probeta. Por lo tanto, se estima que estas variaciones dimensionales no tendrán un impacto significativo en los resultados obtenidos. Sin embargo, se realizará una revisión una vez que se obtengan los resultados para verificar si las dimensiones han podido afectar de alguna manera los resultados experimentales. Para realizar este análisis, se realizará un promedio para cada probeta, obteniendo los siguientes resultados:

	Espesor	Ancho
G1U1	3,20	19,73
G1U2	3,28	19,72
G1U3	3,22	19,70
G1U4	3,30	19,75
G1U5	3,30	19,82
G1S1	3,33	19,73
G1S2	3,40	19,77
G1S3	3,38	19,73
G1S4	3,40	19,70
G1S5	3,37	19,70
G2U1	3,28	19,63
G2U2	3,27	19,67
G2U3	3,30	19,67
G2U4	3,27	19,73
G2U5	3,25	19,68
G2S1	3,38	19,72
G2S2	3,27	19,70
G2S3	3,37	19,70
G2S4	3,32	19,70
G2S5	3,32	19,67

Tabla 6. Dimensiones promedio de las probetas.

5.2 Secuencia del ensayo de delaminación

Como se mencionó anteriormente, unos de los objetivos de este estudio era realizar un seguimiento del crecimiento de la grieta mediante la toma de imágenes con una cámara industrial (Figura 76). Con el fin de visualizar una secuencia completa del ensayo, se presentarán varias imágenes tomadas en distintos momentos del ensayo. Estas imágenes permitirán observar de manera detallada el desarrollo y evolución del ensayo a lo largo del tiempo.

Para mostrar este proceso, se ha seleccionado el ensayo de la probeta G1U3, que corresponde al modelo estándar de la norma. En lugar de hacer un seguimiento según el tiempo de ensayo, se realizará siguiendo el desplazamiento de apertura de grieta. Esto se debe a que, si bien no todas las probetas rompen de la misma manera, al realizar un ensayo a velocidad de apertura constante, el desplazamiento es uniforme para todas las probetas.

Se mostrarán imágenes desde el comienzo del ensayo hasta alcanzar los 90 mm de desplazamiento de apertura de grieta, con incrementos de 10 mm en cada imagen. Este punto de 90 mm se ha seleccionado debido a que, más allá de este desplazamiento, la cámara no captaba adecuadamente las imágenes de la probeta. Esta secuencia permitirá observar el desarrollo del ensayo y el avance de la grieta hasta el punto máximo de desplazamiento registrado por la cámara.

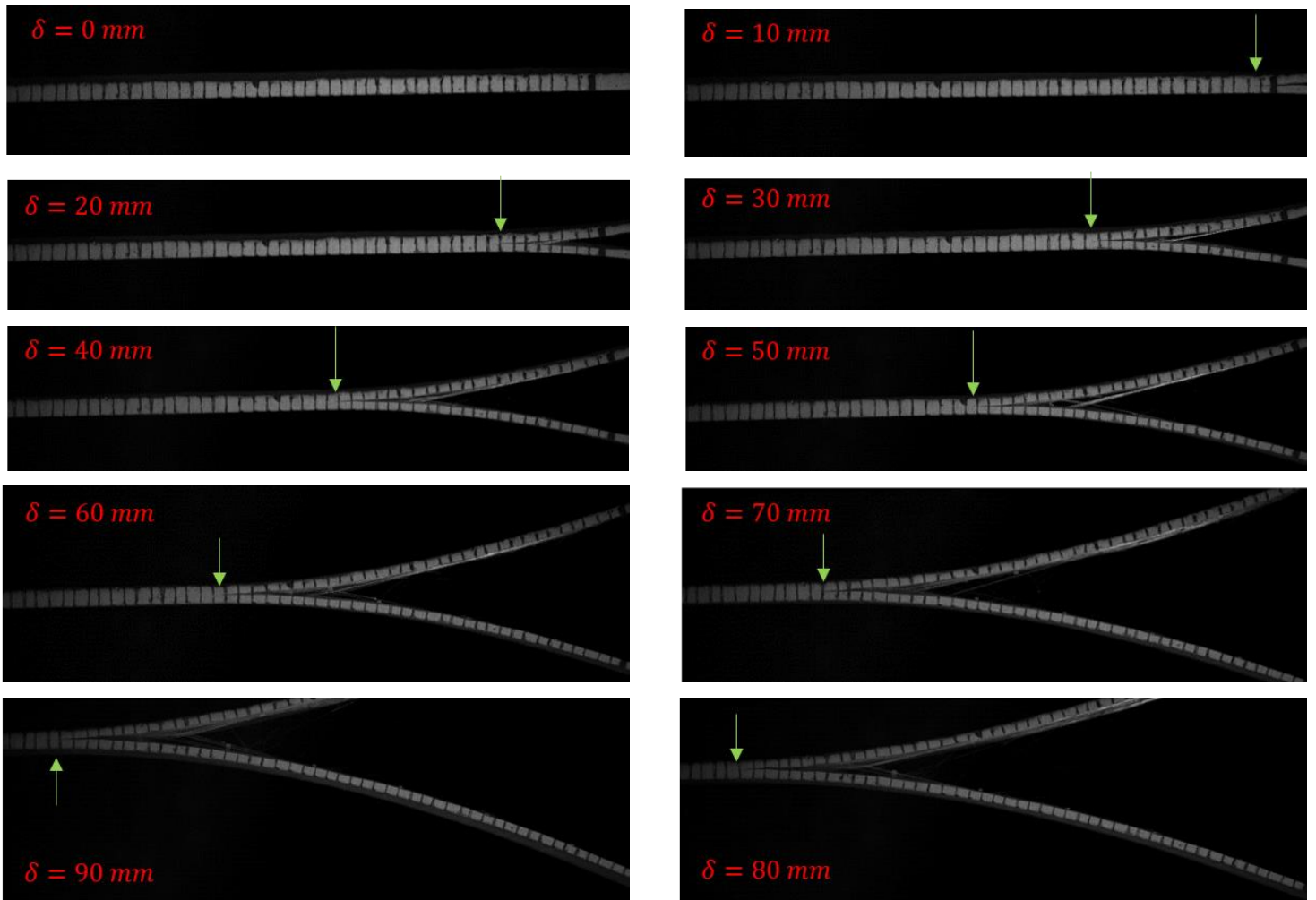


Figura 113. Secuencia del ensayo de delaminación. δ simboliza el desplazamiento de apertura de grieta.

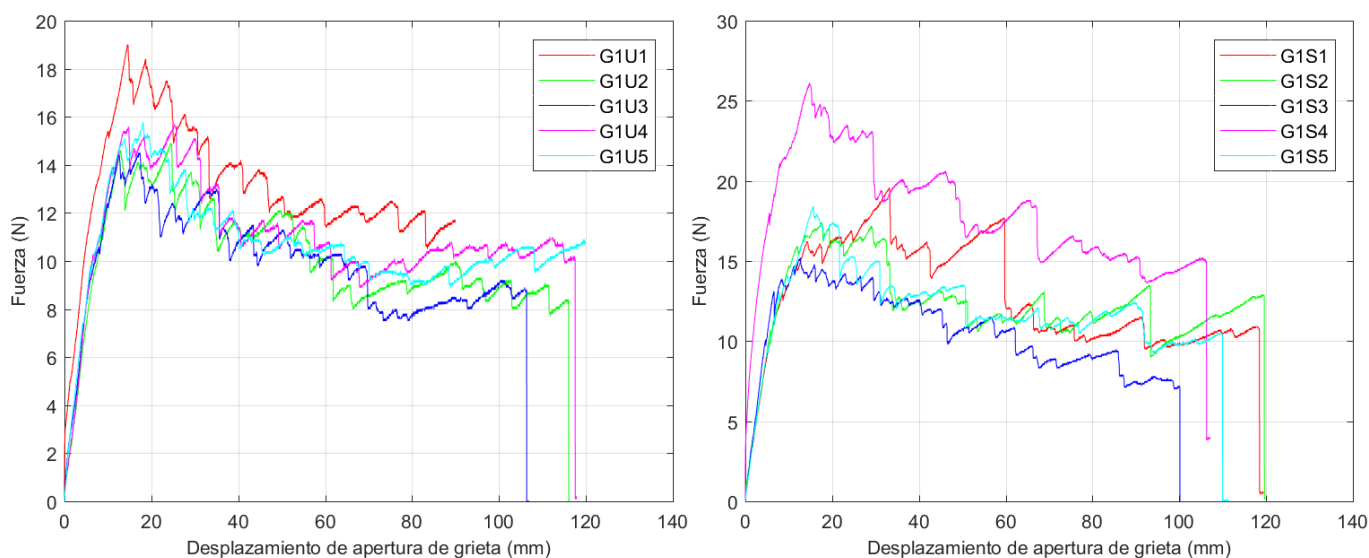
En la Figura 113 se aprecia la secuencia del ensayo. Como se mencionó con anterioridad, las probetas tienen unas marcas realizadas cada dos milímetros para poder observar el avance de grieta. También se puede observar una marca de mayor grosor en la parte derecha de las imágenes que indica el frente de grieta.

En esta secuencia se puede observar cómo la grieta avanza a lo largo del material uniformemente y cómo cuando el desplazamiento del ensayo alcanza un valor de 30 mm aparece el efecto bridging, mencionado con anterioridad en el apartado 3.4.5. Aunque la cantidad de bridging parece ser limitada, será necesario considerar su impacto una vez obtenidos los resultados.

5.3 Análisis gráfico de los resultados

Se ha decidido realizar diferentes gráficas para observar y comprender con exactitud los resultados obtenidos y para facilitar la comparación entre las diferentes configuraciones.

En primer lugar, se graficarán los resultados de fuerza obtenidos frente al desplazamiento de apertura de grieta para cada configuración de probeta. El desplazamiento de apertura de grieta es el término utilizado en este proyecto para referirse al desplazamiento vertical que experimenta el punto de carga durante el ensayo, el cual se mide durante el ensayo como el desplazamiento del puente de la máquina.



Gráfica 1. Resultados de fuerza frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).

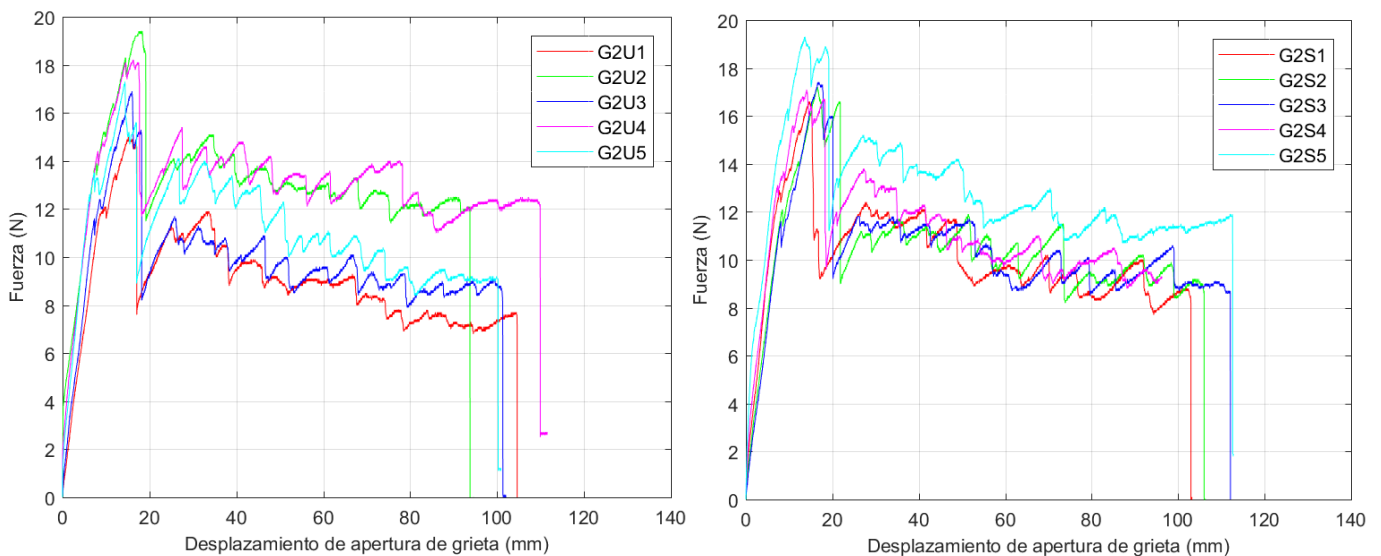
En el análisis de las probetas G1UN mostrado en la Gráfica 1, se puede observar que todas las probetas mantienen un comportamiento similar entre ellas, mostrando un aumento aproximadamente lineal de la fuerza hasta alcanzar un pico, seguido de fluctuaciones debidas a la propagación de la grieta a lo largo del material. El pico observado tras la zona lineal define el punto de inicio de delaminación, si bien, previo al máximo, se observa una pérdida de linealidad, asociada a pequeñas fracturas durante el proceso de carga. En el ensayo, la probeta G1U1 (roja) alcanzó un nivel de fuerza más elevado que el resto de probetas, mientras que la probeta G1U3 (azul) mostró una disminución más rápida de la fuerza, lo que puede deberse a pequeñas variaciones locales en la resistencia del material.

Al analizar la Tabla 6, se puede observar que la probeta G1U1 (roja) es la que tiene un menor espesor en comparación con el resto de probetas, por lo que puede ser un motivo de su nivel de fuerza. También en la Tabla 5, se puede ver cómo en el punto 3 que corresponde a la parte final del ensayo, las probetas G1U2 (verde) y G1U3 (azul) tienen un ancho idéntico e inferior a las probetas G1U4 (morado) y G1U5 (cian), lo cual puede ser un indicativo de por qué mantienen fuerzas similares.

En el análisis de las probetas G1SN, también representado en la Gráfica 1, se observa que todas mantienen una tendencia similar al igual que en el caso de las probetas G1UN, alcanzando un pico máximo y disminuyendo gradualmente. En la probeta G1S4 (morado) se aprecia una tendencia a mantener unos niveles de fuerza superior al resto de probetas y unos picos más abruptos. Esto indica que los hilos de stitching requirieron mayor fuerza para romperse, y la concentración de energía registrada en estos puntos, al romperse, provocó una caída mucho más abrupta en la fuerza.

En contraste, la probeta G1S3 (azul) no ha experimentado dichas concentraciones de fuerza, indicando que en este caso por algún motivo el stitching no ha cumplido su cometido.

Tras analizar la Tabla 6, parece que en este caso no hay relación entre los resultados obtenidos y las dimensiones.



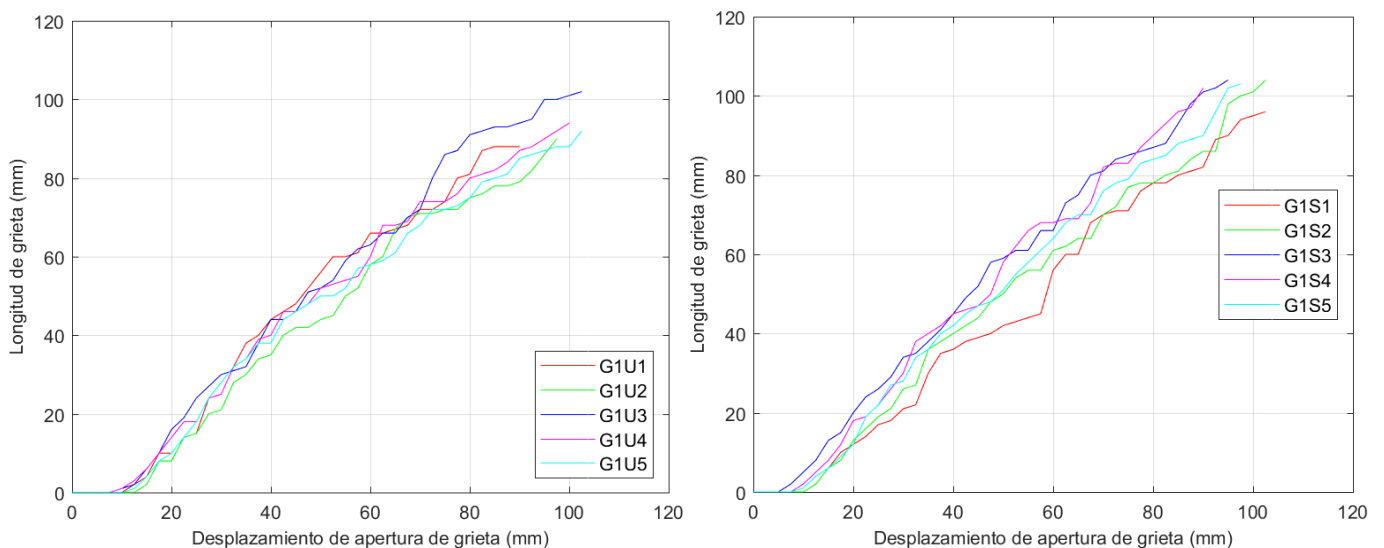
Gráfica 2. Resultados de fuerza frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).

En el caso de las probetas G2UN mostrado en la Gráfica 2, se observa que todas las probetas mantienen una tendencia similar. La diferencia que se aprecia en esta configuración está en la primera caída de fuerza, que es mucho más pronunciada ya que al propagarse la grieta principal y encontrarse con la secundaria, la grieta avanzó una mayor distancia sin resistencia alguna.

Al igual que en casos anteriores, las probetas G2U2 (verde) y G2U4 (morado) destacan por mantener unos niveles de fuerza superiores durante todo el ensayo y, en cambio, las probetas G2U1 (rojo) y G2U3 (azul) mantienen unos niveles inferiores. Al analizar la Tabla 6, se puede ver que las que alcanzan una mayor fuerza poseen un espesor inferior que a las que alcanzan una fuerza menor.

Con respecto a las probetas G2SN mostradas también en la Gráfica 2, se ve que todas siguen una tendencia similar que las probetas G2UN. En este caso todas las probetas mantienen una fuerza parecida a excepción de la probeta G2S5 (cian). Analizando la Tabla 6, pese a que los espesores son más variables que en el resto de configuraciones, no parece que haya ningún tipo de relación entre las dimensiones y los resultados obtenidos, por lo que probablemente estas diferencias pueden deberse al stitching realizado.

Vistos los valores de fuerza obtenidos y para analizar mejor el comportamiento del material, se ha graficado la longitud de la grieta frente al desplazamiento de apertura de la grieta. Este análisis puede proporcionar información muy valiosa sobre el material, ya que permite observar el crecimiento de la grieta a lo largo de la probeta. De esta manera, se pueden detectar anomalías, revelando información sobre la estructura del material.



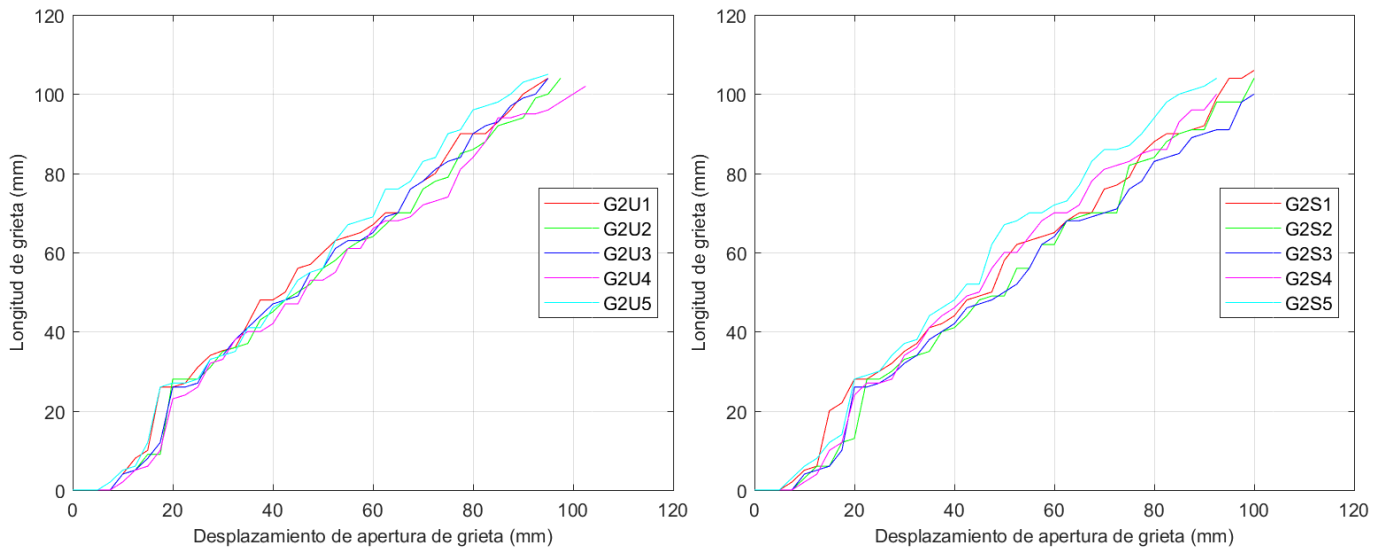
Gráfica 3. Resultados de longitud de grieta frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).

En cuanto a la propagación de la grieta en las probetas G1UN que se muestra en la Gráfica 3, se puede ver cómo tiene un crecimiento casi lineal a lo largo de todo el ensayo.

Sin embargo, se puede observar cómo la probeta G1U3 (azul) presenta picos más pronunciados, indicando momentos en los que la grieta avanza bruscamente probablemente debido a pequeñas variaciones locales en el material. Las probetas G1U1 (rojo) y G1U4 (morado) también presentan algunos picos menos marcados que la probeta anterior y las probetas G1U2 (verde) y G1U5 (cian) presentan curvas mucho más suaves, indicando una mayor uniformidad del material en toda su longitud.

Al añadir stitching, se puede observar que las probetas G1SN mantienen una tendencia lineal con la diferencia de la aparición de más picos debido a la interacción de la grieta con el stitching. Pese a que hay un mayor número de picos, el crecimiento es más

uniforme de lo esperado, indicando que el stitching no ha supuesto un gran impedimento en su propagación.



Gráfica 4. Resultados de longitud de grieta frente a desplazamiento de apertura de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).

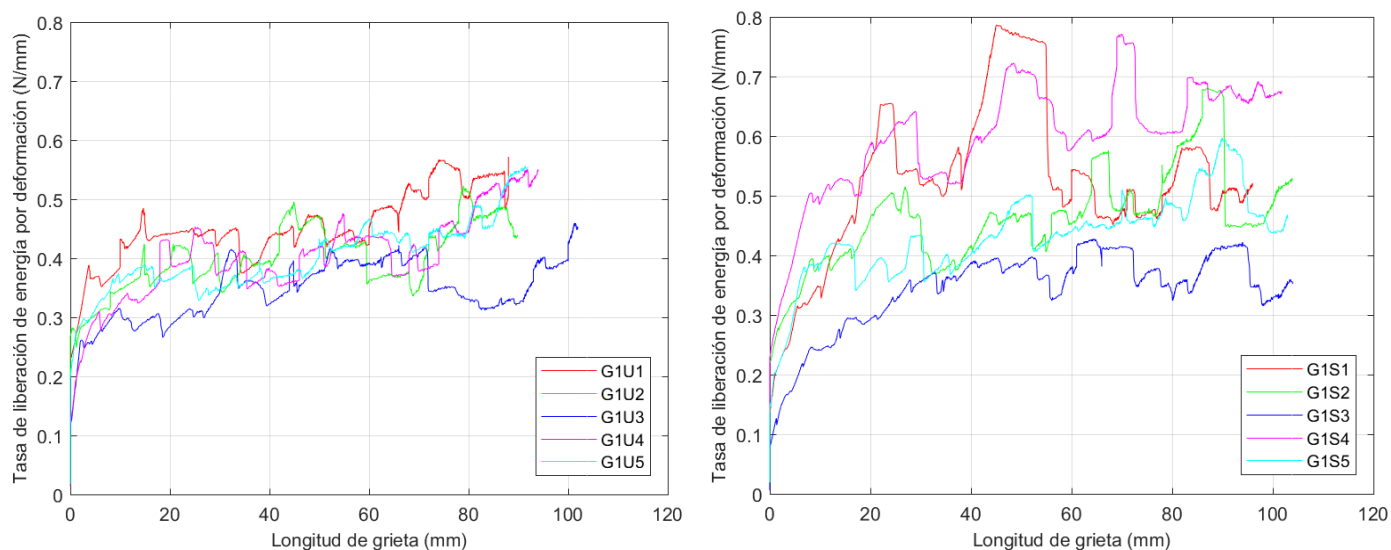
Al igual que en las probetas G1UN, en la Gráfica 4 se observa un crecimiento uniforme de la grieta a lo largo del material, con la única diferencia de un pico muy pronunciado en la parte inicial del ensayo debido a la unión de ambas grietas.

Se puede observar que el crecimiento de grieta de las probetas G2SN también mantiene un crecimiento casi lineal y, al igual que en el caso de las probetas G2UN, tiene un primer pico inicial muy pronunciado debido a la unión de las grietas. En este caso, el pico es más brusco ya que entre las grietas había stitching, y a medida que la grieta crecía y se encontraba con esta hilera de stitching, la energía en ese punto aumentaba significativamente. Al romperse el hilo, esta energía acumulada se liberaba, provocando que la grieta se propagase una mayor distancia.

El fin de este proyecto es cuantificar la energía liberada en el proceso de delaminación para así poder evaluar la resistencia a fractura interlaminar de cada probeta y determinar si la implementación de stitching mejora las características del material. Según la norma [4], hay varios métodos para realizar este cálculo pero aquí se realizará mediante el método de la teoría de viga modificada mostrada en el apartado 12.1.1. Este método viene dado por la expresión de la teoría de viga para la tasa de liberación de la energía por deformación de una viga en doble voladizo perfectamente empotrada, que viene dada del desarrollo de la ecuación (5) (apartado 3.6):

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (7)$$

Donde P es la carga que soporta el material, δ el desplazamiento de apertura de la grieta, b el ancho de probeta y a la longitud de grieta. Para aplicar esta fórmula, se ha tenido en cuenta los diferentes valores de ancho de probeta mostrados en la Tabla 6.

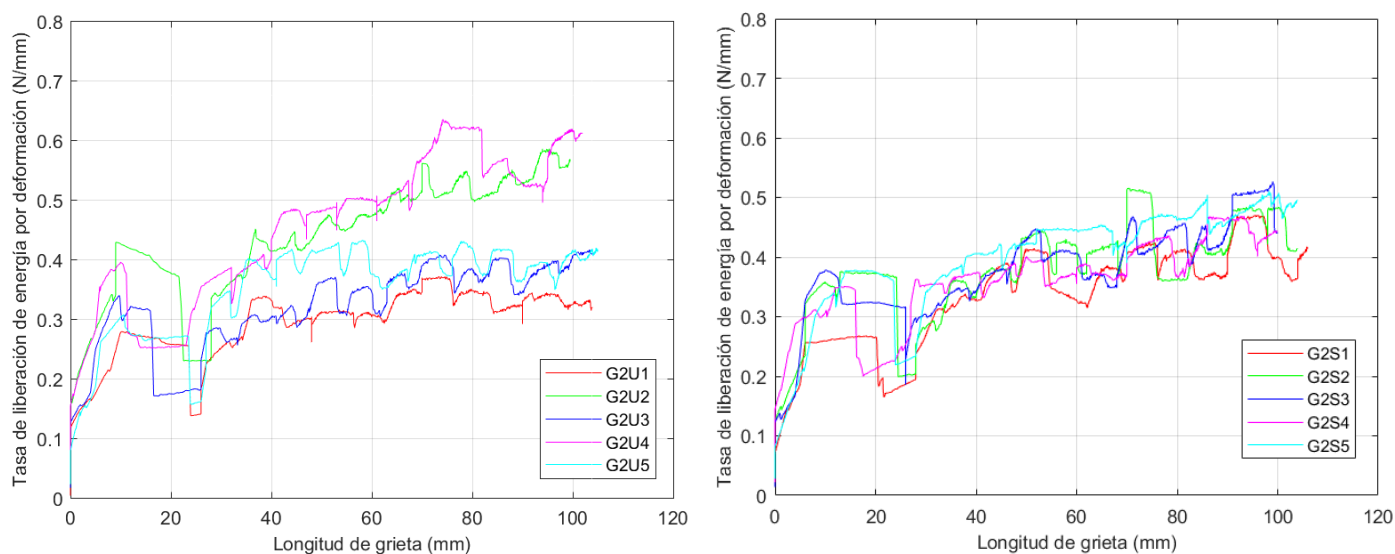


Gráfica 5. Resultados de tasa de liberación de energía por deformación frente a longitud de grieta (izquierda para las probetas G1UN y derecha para las probetas G1SN).

En la Gráfica 5 se puede observar una gran similitud en la energía liberada de todas las probetas G1UN. Al inicio de la curva se observa un incremento debido al inserto inicial y conforme avanza el ensayo aparecen pequeñas fluctuaciones debidas a la estructura del material. Todas las probetas muestran una resistencia a la fractura similar a lo largo del ensayo aunque destacan las probetas G1U1 (rojo) y G1U2 (verde) que mantienen picos más elevados en la primera mitad del mismo. También se puede apreciar una estabilización de los resultados alcanzados los 30 milímetros de longitud de grieta aproximadamente lo cual indica que en la fase inicial de la delaminación, el material está sufriendo fuerzas internas inestables debido al inserto y, tras esta propagación, ha entrado en una fase de crecimiento de grieta más estable.

En el caso de las probetas G1SN hay mucha más variabilidad debido al stitching. Como ya se mostraba en la Gráfica 1, hay probetas cuya resistencia a la fractura interlaminar era superior a otras. Es el caso de las probetas G1S1 (rojo) y G1S4 (morado), en las cuales podemos ver cómo se alcanzan unos valores más altos en cuanto a tasa de liberación de energía. Los picos de energía vienen dados por la rotura de los hilos, los cuales provocan un mayor aumento cuando el frente de grieta se encuentra con uno y tras su rotura se libera bruscamente. También se comprueba que en las probetas G1S2 (verde) y G1S5 (cian) el stitching no refuerza el material ya que se obtienen unos valores muy similares a los obtenidos de las probetas G1UN y en la probeta G1S3 (morado) la implementación del stitching parece que ha empeorado las características del material.

Tras comprobar la Tabla 6 y ver que no hay ninguna diferencia significativa con el resto de probetas, probablemente la región del material que compone esta probeta sufriese algún defecto en el proceso de fabricación.



Gráfica 6. Resultados de tasa de liberación de energía por deformación frente a longitud de grieta (izquierda para las probetas G2UN y derecha para las probetas G2SN).

En la Gráfica 6 podemos observar los resultados obtenidos para el conjunto de probetas G2UN y G2SN. Al igual que en el caso anterior, se observa una estabilización de la propagación de la grieta cuando esta alcanza una longitud aproximada de 30 milímetros. Como ya se intuía en la Gráfica 2, las probetas G2U2 (verde) y G2U4 (morado) presentan una mayor resistencia a la fractura que el resto de probetas con configuración G2UN. Esta mayor resistencia puede estar debida a la aparición del efecto bridging en los ensayos. Este efecto apareció durante todos los ensayos realizados, pero fue más notable en el ensayo de estas dos probetas por lo que puede ser el causante de este incremento.

En las probetas G2SN podemos observar una mayor similitud en todas las probetas. La implementación del stitching parece no haber influido tanto en la resistencia del material ya que se observan unos resultados muy parecidos a los obtenidos en las probetas G2UN, pero si parece haber reducido la variabilidad de los resultados obtenidos.

Para realizar una comparación precisa de los resultados obtenidos en los ensayos de delaminación y comprobar si la implementación de stitching mejora la resistencia a la fractura interlaminar, la norma establece que cada ensayo debe resumirse en un único valor de tasa de liberación de energía por deformación. Para ello, en el apartado 11.10 de la misma se nos muestran varios métodos para la obtención de los resultados. Estos métodos analizan la energía liberada en la primera rotura del inserto. No obstante, esto no resulta representativo para este estudio, ya que en este punto ninguna de las configuraciones presenta ni stitching ni la segunda grieta.

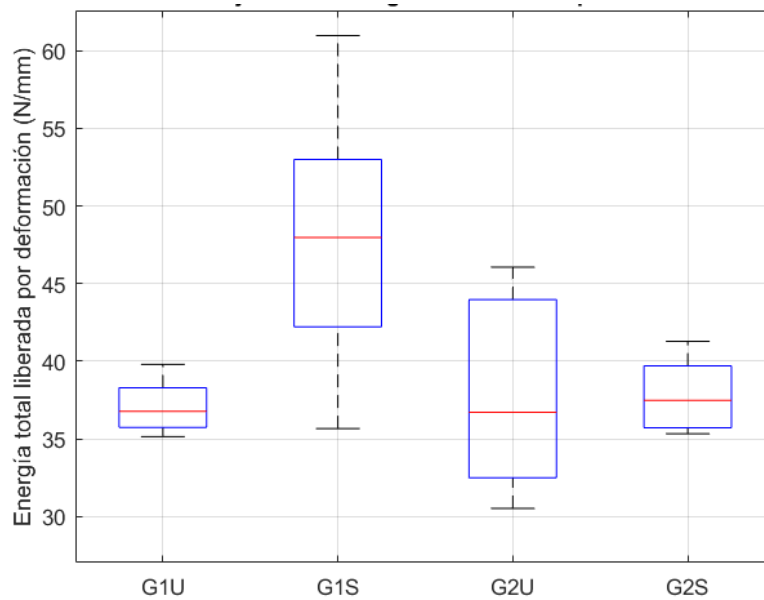
Para poder realizar un análisis similar al establecido en la norma, se ha decidido calcular la energía total liberada por deformación de cada probeta. De esta manera, se podrán comparar los diferentes grupos de probetas, teniendo en cuenta todos los componentes de cada configuración. Para obtener estos valores, se ha optado por calcular el área bajo la curva de la Gráfica 5 y Gráfica 6.

En la Tabla 7 se muestra el valor de la energía total liberada de cada probeta. Se puede observar que, en el caso de las configuraciones con una grieta, el stitching refuerza considerablemente el material, pero también está introduciendo una mayor variabilidad en los resultados. Esta variabilidad podría deberse a diferencias en la efectividad del stitching. En las configuraciones con dos grietas ocurre lo contrario, no parece que el stitching refuerce en exceso el material, pero si le aporta una mayor estabilidad.

Código Probeta	Energía total liberada por deformación (N/mm)	Mediana	Desviación Típica
G1U1	39,79	36,78	1,80
G1U2	35,94		
G1U3	35,14		
G1U4	37,80		
G1U5	36,78		
G1S1	50,33	47,97	9,20
G1S2	47,97		
G1S3	35,66		
G1S4	60,97		
G1S5	44,39		
G2U1	30,53	36,71	6,59
G2U2	43,27		
G2U3	33,16		
G2U4	46,05		
G2U5	36,71		
G2S1	35,33	37,49	2,45
G2S2	39,17		
G2S3	37,49		
G2S4	35,84		
G2S5	41,28		

Tabla 7. Energía total liberada por deformación.

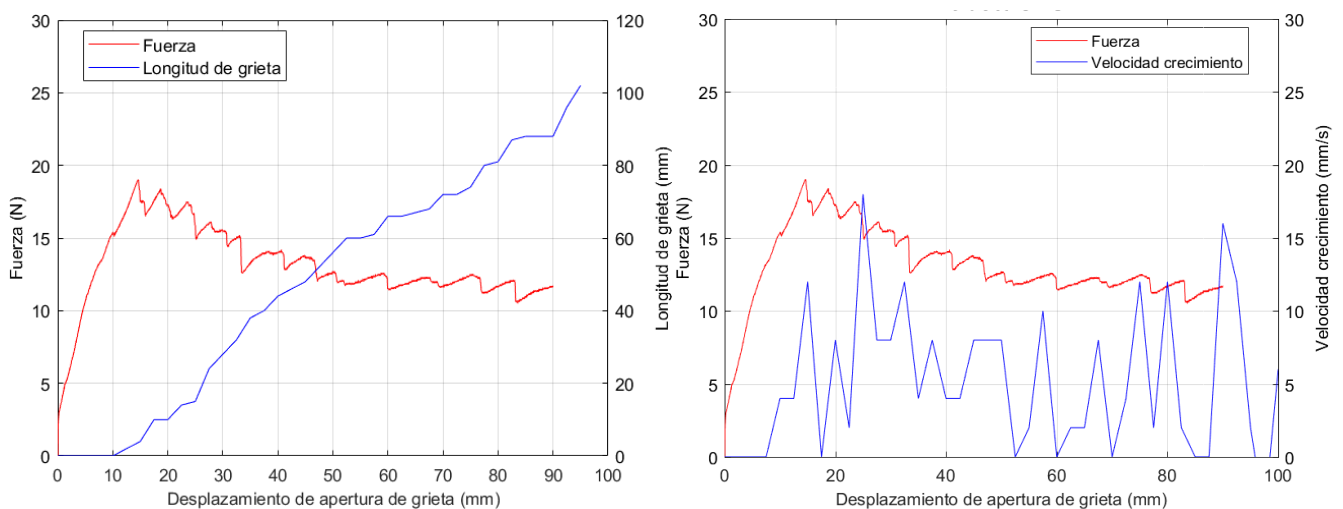
Para facilitar la interpretación de los valores mostrados en la Tabla 7, se muestran dichos resultados graficados en la Gráfica 7. Representación gráfica de la energía total liberada por deformación.



Gráfica 7. Representación gráfica de la energía total liberada por deformación.

En la Gráfica 7 podemos observar que, como se ha mencionado con anterioridad y se puede apreciar en la Tabla 7, la aplicación del stitching en las probetas con una grieta aumenta la resistencia del material un 30,2%. En el caso de las probetas con dos grietas, pese a que no mejora en exceso la resistencia, si reduce la variabilidad de los resultados en un 60,67%.

Para comprender mejor los resultados, se han realizado gráficas individuales de cada probeta, mostrando una comparativa entre la fuerza, la longitud de grieta y la velocidad de crecimiento de la misma.



Gráfica 8. Resultados individuales de la probeta G1U1.

En la Gráfica 8, podemos observar que cuando la fuerza disminuye, la grieta crece y, por tanto, aumenta la velocidad de crecimiento. El resto de gráficas se encuentran en el apartado Anexo I: Gráficas individuales de cada probeta, por si fuese necesario consultar algún valor en específico.

5.4 Análisis microscópico de la estructura del material

Tras el ensayo de delaminación, se ha realizado un pequeño análisis de la estructura externa e interna del material, para observar los posibles defectos que haya sufrido en el proceso de infusión o el ensayo y dictaminar si son lo suficientemente considerables para poder haber afectado a los resultados.

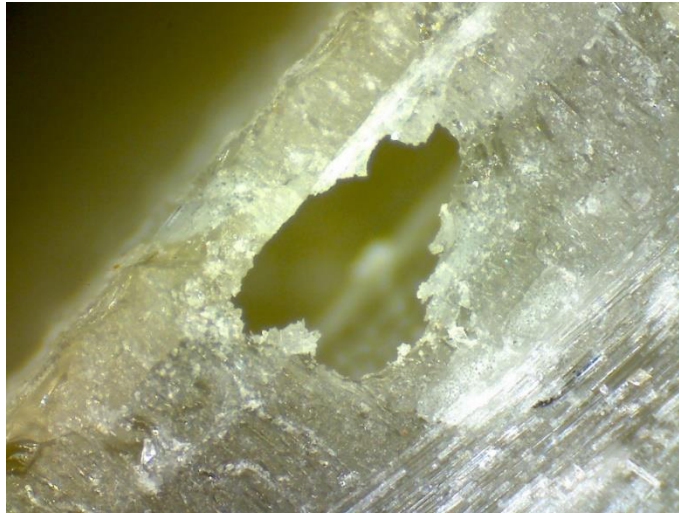


Figura 114. Poro en la estructura interna de una de las probetas.

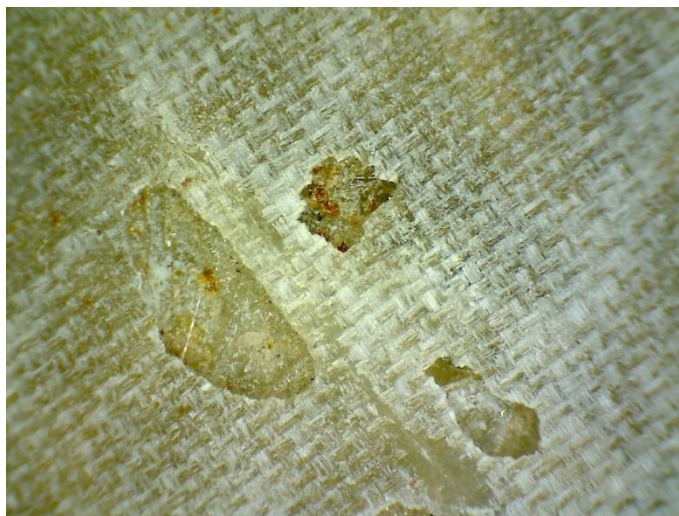


Figura 115. Poro en la superficie de una de las probetas.

Como se puede observar en la Figura 114 y Figura 115, han aparecido poros en el proceso de fabricación. Se ha observado que dichos defectos han aparecido con más frecuencia en la superficie de las probetas y no en la parte interna de las mismas, por lo que se ha determinado que no afectan a los datos obtenidos.

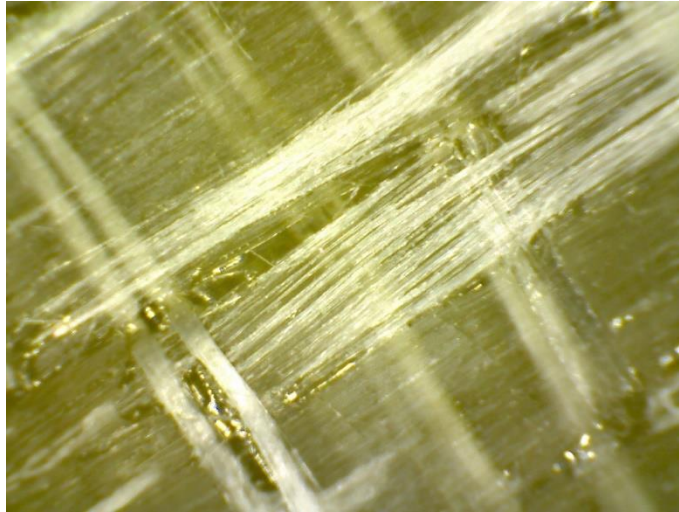


Figura 116. Negativo de las cuerdas de sujeción de las fibras.

También se han observado muchas marcas como la mostrada en la Figura 116. Al principio se contempló la posibilidad de que fuesen poros, pero tras ver que había muchas marcas de este tipo en todas las probetas y seguían un patrón se optó por descartar esta posibilidad.

Tras un análisis más detallado, se descubrió que estas marcas se trataban del negativo de las cuerdas que separaban los conjuntos de fibras (Figura 117). Al conocer el motivo de dichas marcas, se determinó que podrían afectar ligeramente los resultados. Las cuerdas, al despegarse de la otra mitad de las probetas, podrían ejercer una pequeña resistencia en el proceso de delaminación. Sin embargo, se concluyó que esta influencia sería mínima, aunque podrían explicar los distintos picos que aparecen en las gráficas anteriores.



Figura 117. Cuerdas de sujeción de las fibras.

Se aprovechó la oportunidad de disponer de un microscopio para observar otros aspectos de las probetas, como la grieta (Figura 118), el hilo tras el ensayo (Figura 119) y el inicio de grieta en el interior de la estructura de la probeta (Figura 120).

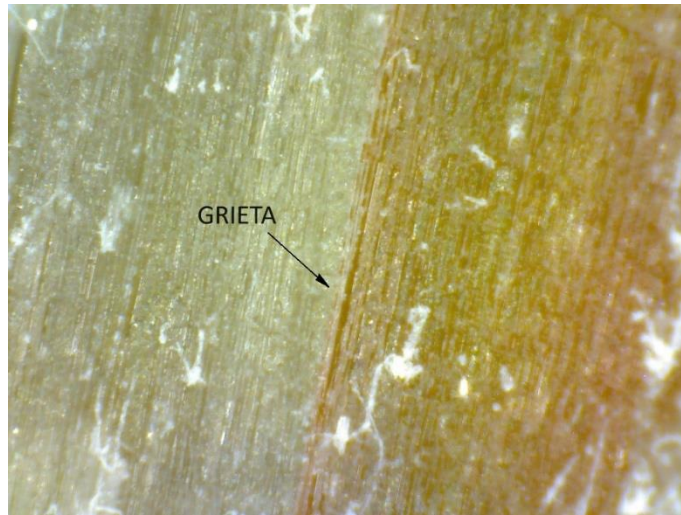


Figura 118. Grieta inicial en la probeta.

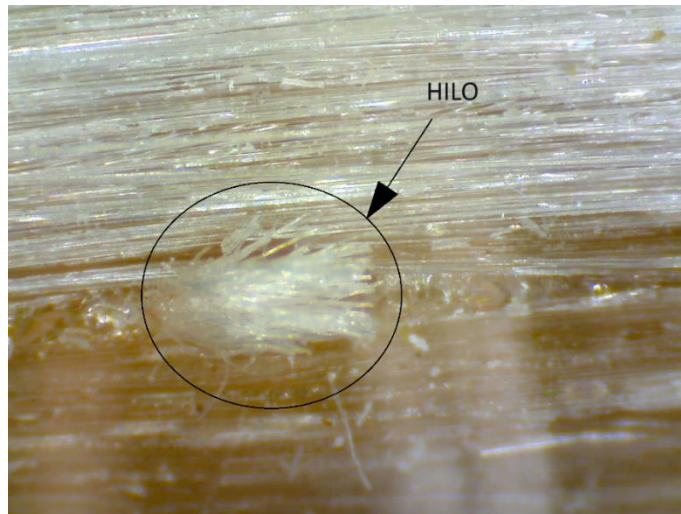


Figura 119. Hilo seccionado tras el ensayo.

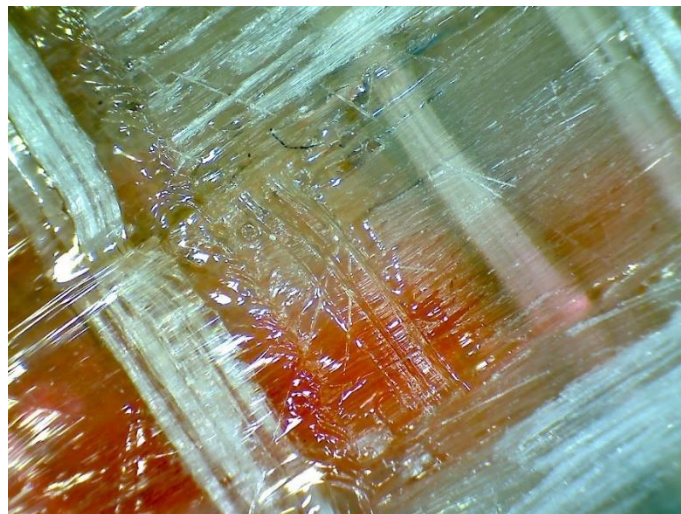


Figura 120. Final de grieta.

5.5 Ensayo a tracción hilos

Como se ha mencionado con anterioridad, se ha realizado un ensayo a tracción de una probeta formada por diez hilos impregnados en resina para conocer la resistencia que ejerce cada hilo en el ensayo.

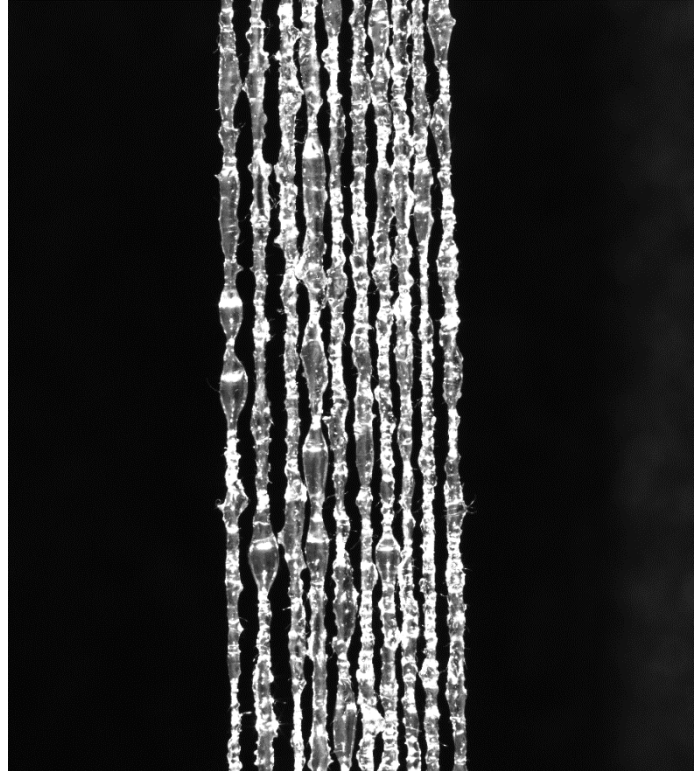
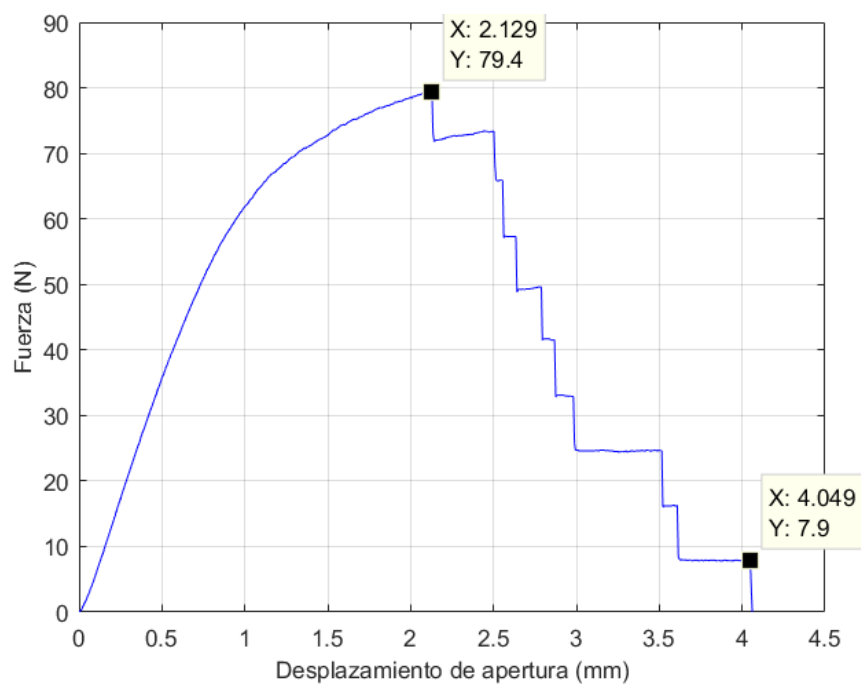


Figura 121. Probeta con diez hilos impregnados en resina.



Gráfica 9. Fuerza-Desplazamiento de apertura ensayo de los hilos.

En la Gráfica 9 se puede observar perfectamente la rotura de cada uno de los hilos de la probeta, correspondiendo cada escalón a la rotura de un hilo.

Se ha tomado la fuerza máxima soportada en este ensayo, así como la correspondiente al último escalón. Como se puede apreciar, la fuerza máxima de los diez hilos es de 79,4 N, mientras que en el último escalón es de 7,9 N. Relacionando la carga máxima y la carga del último escalón, se puede concluir con seguridad que cada hilo está resistiendo una carga de 7,9 N, si bien su efecto no ha sido notable en los resultados del ensayo de probetas con stitching.

6 CONCLUSIONES

El estudio muestra que el stitching puede mejorar la resistencia a la delaminación en materiales compuestos, pero su efectividad depende de su aplicación y del estado del material.

En las probetas con una grieta, refuerza notablemente al material aumentando la energía necesaria para la propagación de la grieta y mejorando la resistencia global del mismo. Sin embargo, este refuerzo introduce una variabilidad en los resultados, siendo necesario un control preciso en su configuración y en el proceso de fabricación.

En las probetas con dos grietas, el stitching no refuerza en exceso al material, pero reduce la variabilidad del material, otorgando una estabilidad y consistencia que puede ser necesaria para el control de la vida útil de la probeta.

Este análisis muestra la importancia de una correcta configuración y fabricación de materiales compuestos fibrosos con refuerzo tridimensional. Los materiales compuestos han demostrado ser excepcionales debido a su alta relación resistencia-peso y en su versatilidad a la hora de realizar diseños según las necesidades específicas de diversas aplicaciones. Sin embargo, el comportamiento mecánico de estos materiales está íntimamente ligado a su diseño y fabricación, lo que subraya la necesidad de optimizar ambos factores para alcanzar el rendimiento deseado.

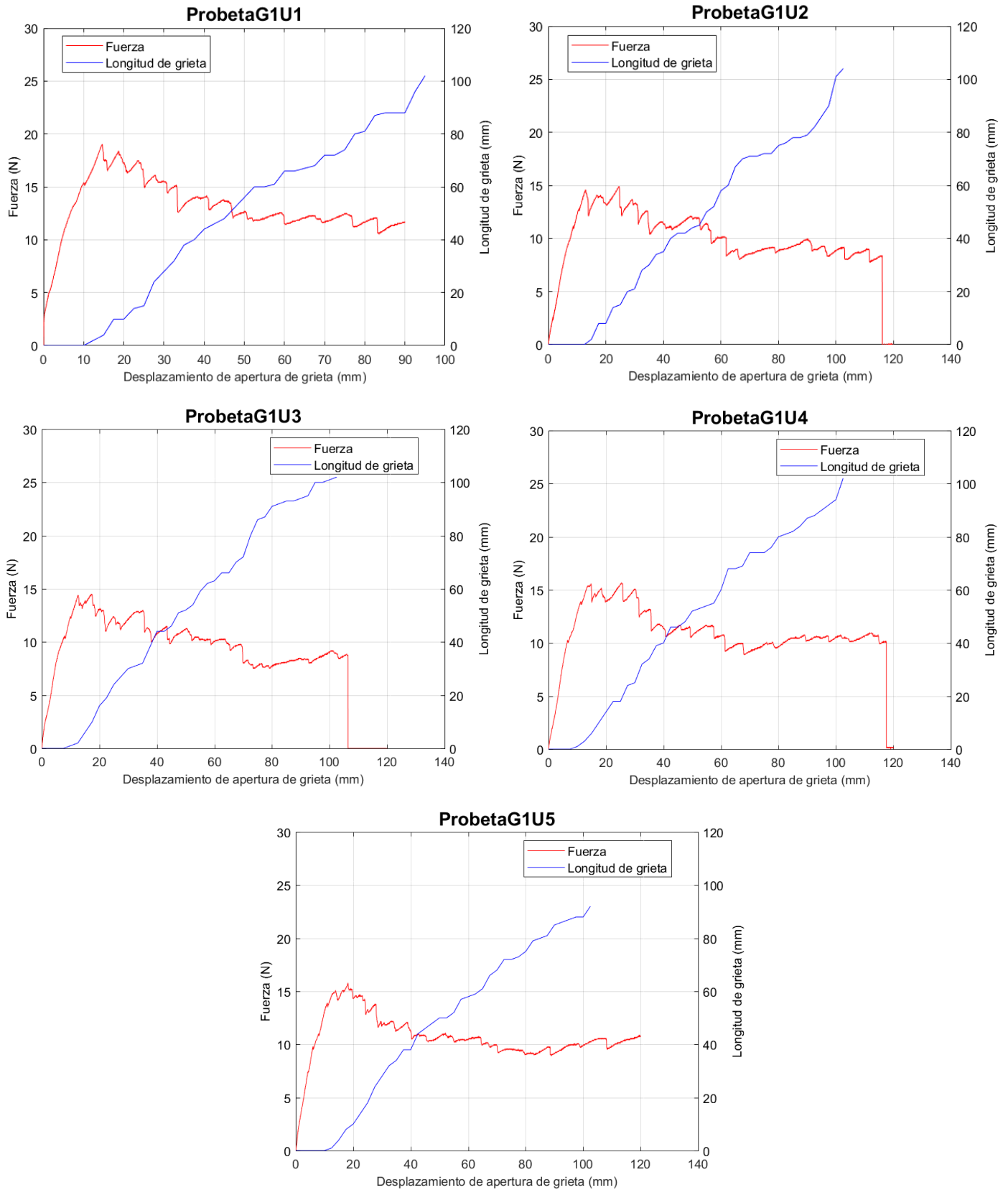
El refuerzo tridimensional de estos materiales no solo juega un papel fundamental en la incrementación de la resistencia del material, también otorga una estabilidad y un control sobre el fallo catastrófico del mismo. Los materiales compuestos tienden a mostrar signos de daño progresivo, con este método de refuerzo se consigue una mejora en la cohesión de las diferentes láminas que componen el material y proporciona tiempo para tomar medidas correctivas antes de que ocurra un fallo total. La introducción de una mayor cantidad de stitching aportaría más información sobre su efecto en estos materiales.

7 PROPUESTAS DE ESTUDIOS FUTUROS

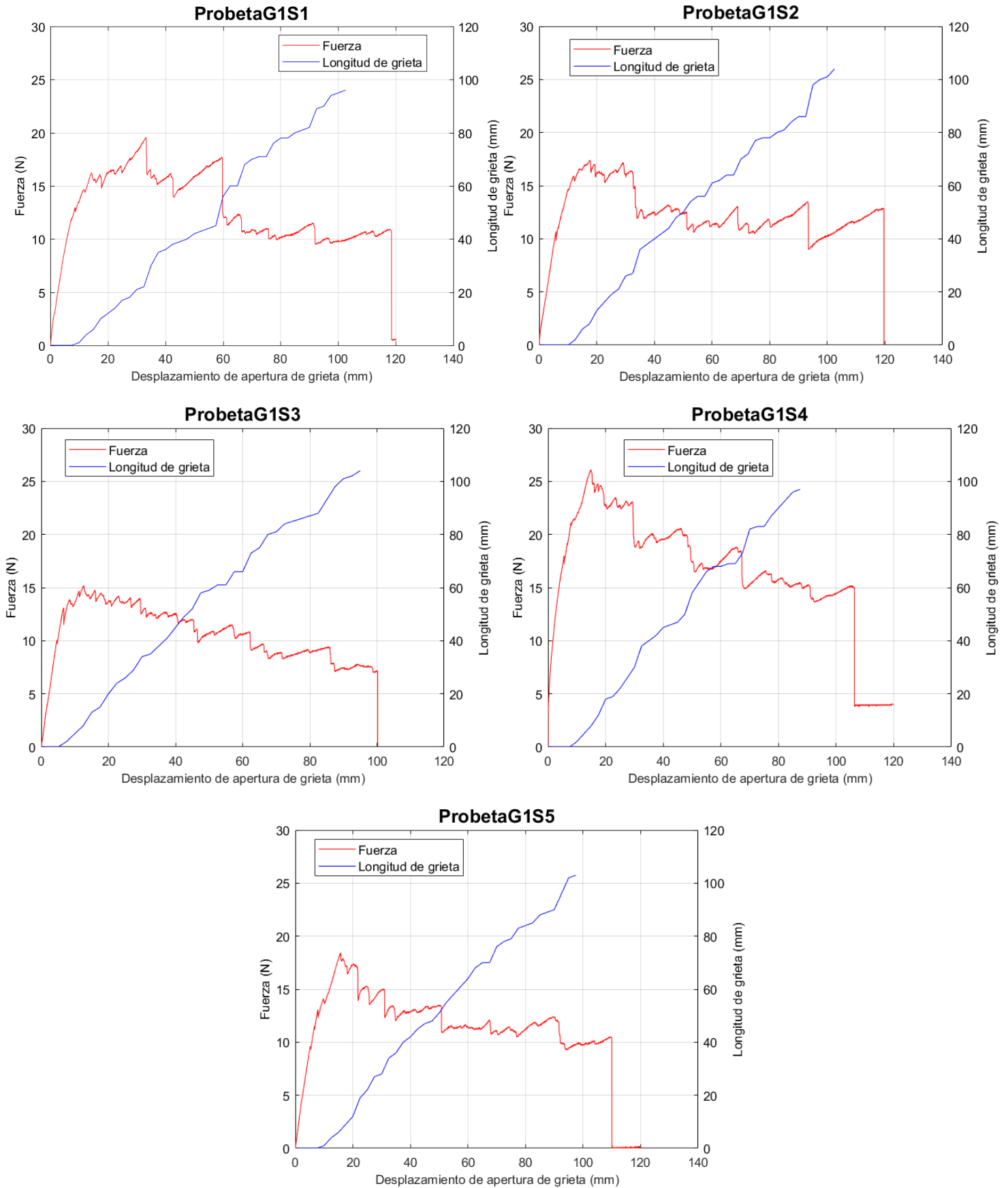
El estudio de los resultados obtenidos ha revelado varias curiosidades y ha generado nuevas ideas para futuras investigaciones. Durante el proceso de este proyecto, han ido surgiendo cuestiones sobre posibles mejoras y ajustes en la metodología aplicada. A continuación, se presentan algunas propuestas para estudios futuros que podrían optimizar y expandir los hallazgos actuales.

1. Investigación de nuevos materiales de refuerzo: Explorar el uso de diferentes tipos de refuerzo tridimensional, como nylon o fibras naturales.
2. Análisis de procesos de fabricación alternativos: Evaluar otros métodos de fabricación, como pueden ser los mencionados en este proyecto o la impresión en 3D.
3. Estudios de ciclo de vida y durabilidad: Implementar pruebas de ciclo de vida más extensas para analizar como estos materiales se comportan bajo condiciones de carga cíclica y ambiental.
4. Uso de otros materiales: Realizar estudios comparativos con otros materiales compuestos, como la fibra de carbono o el yute.
5. Implementación de una mayor cantidad de stitching: Aumentar la cantidad de stitching en el estudio y contrastar los resultados obtenidos en este proyecto.

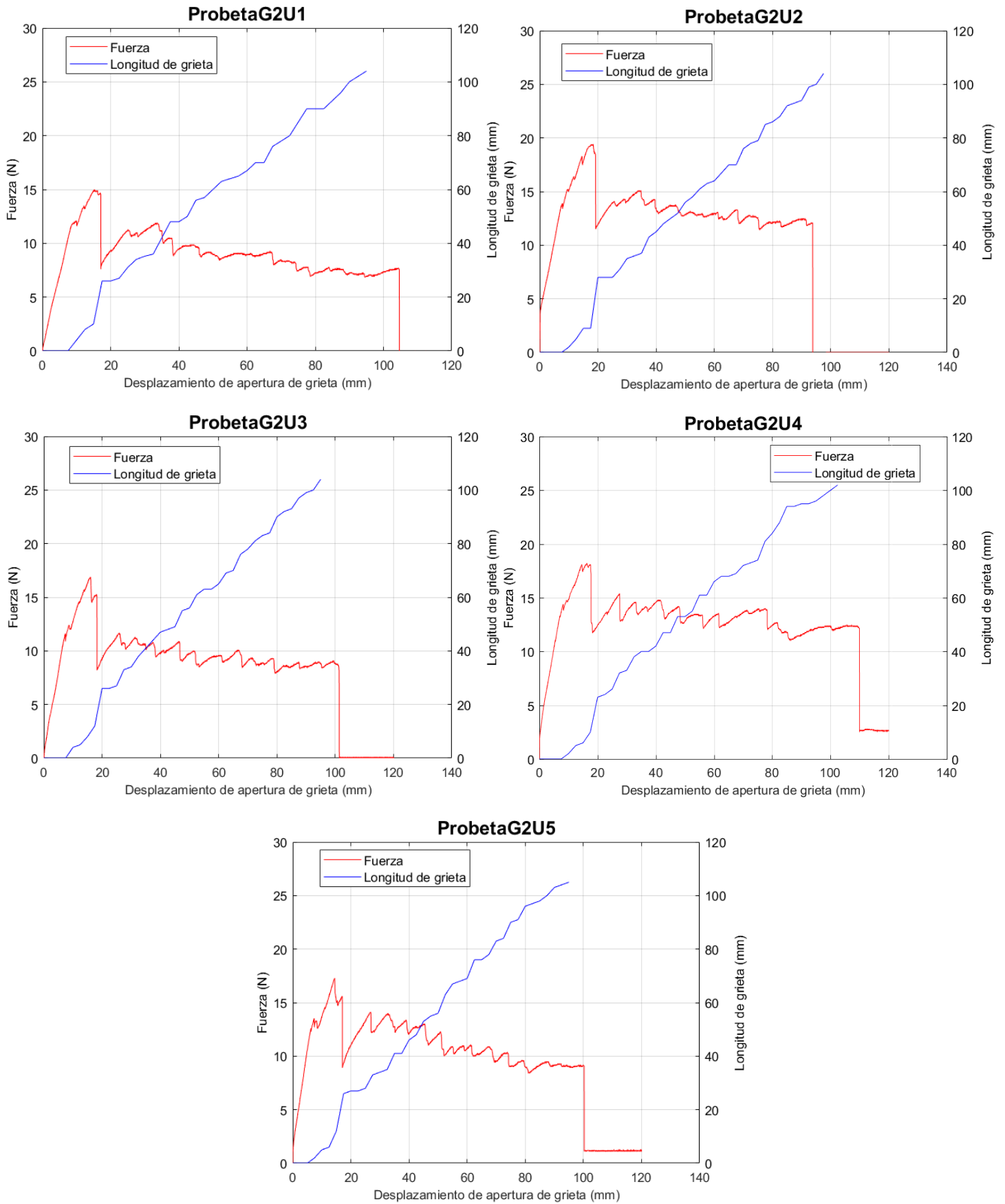
8 ANEXO I: GRÁFICAS INDIVIDUALES DE CADA PROBETA



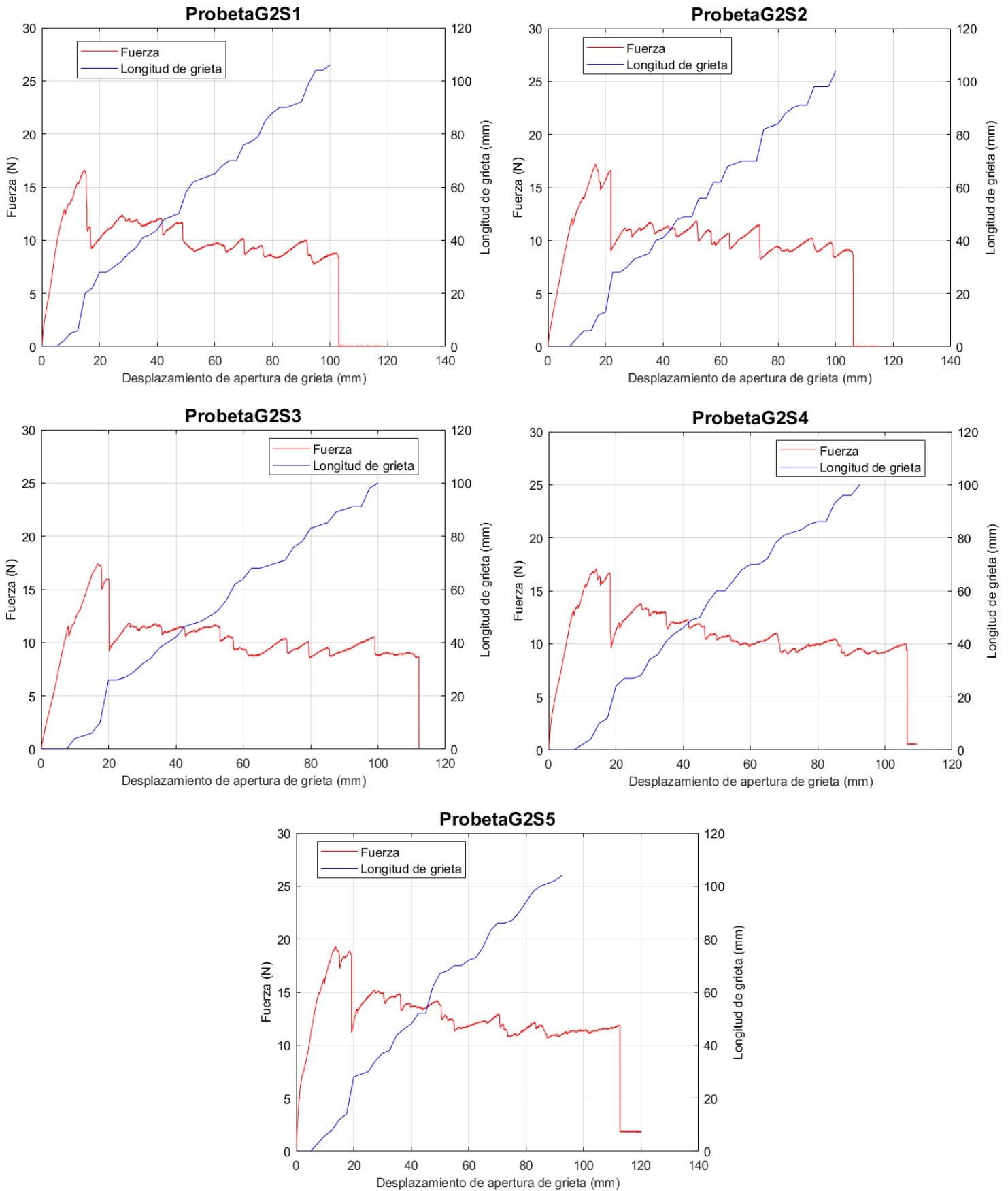
Gráfica 10. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G1UN.



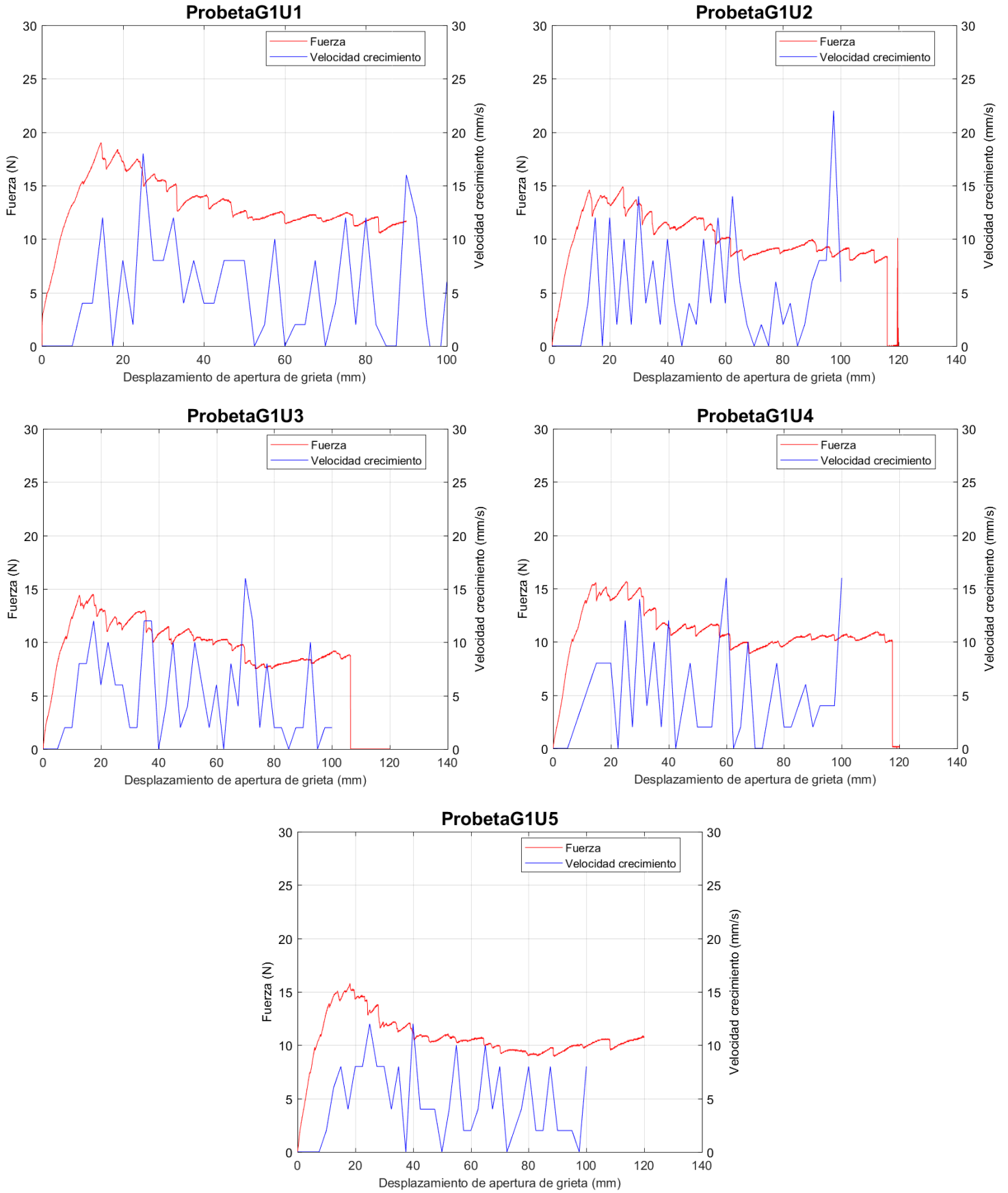
Gráfica 11. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G1SN.



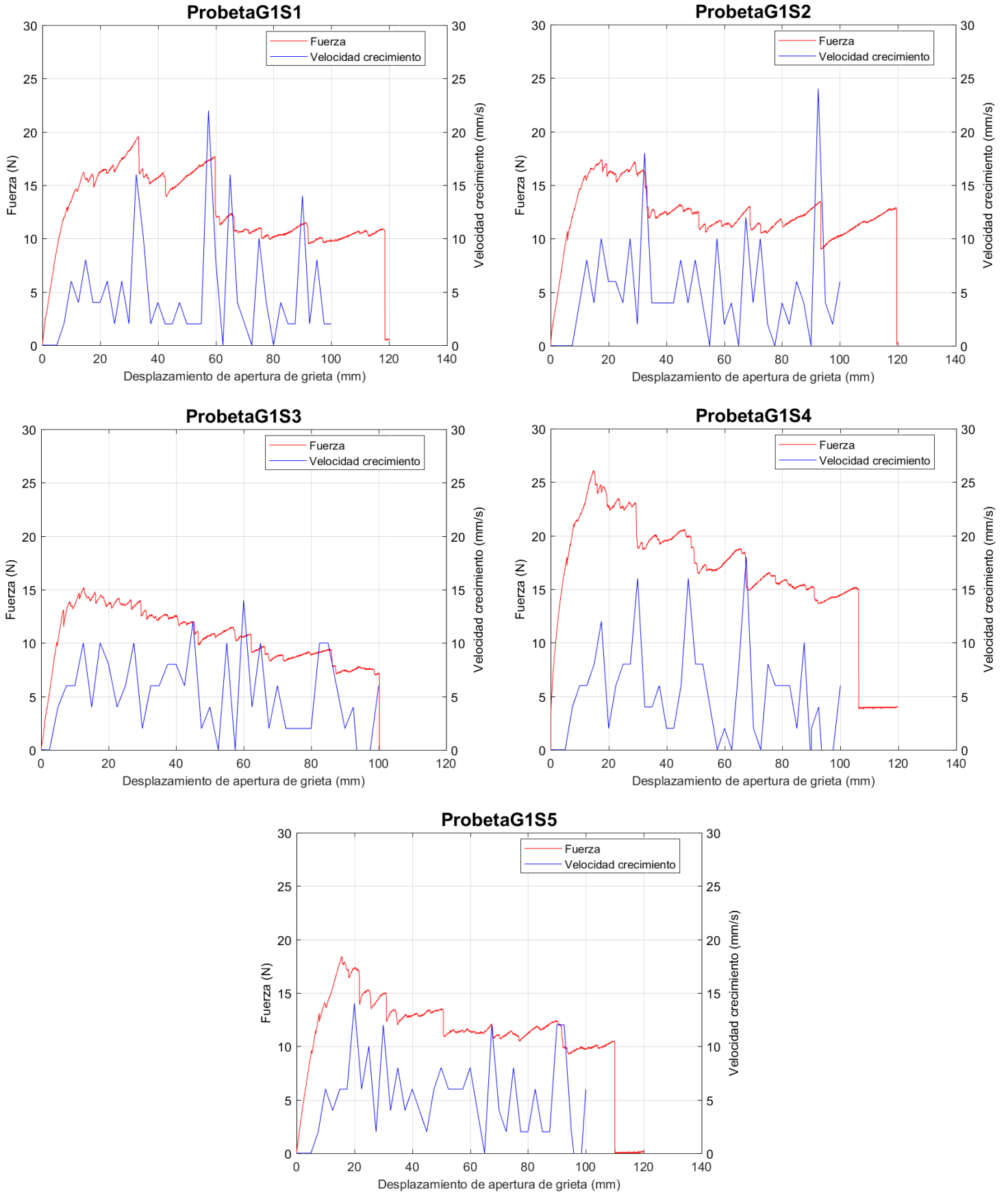
Gráfica 12. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G2UN.



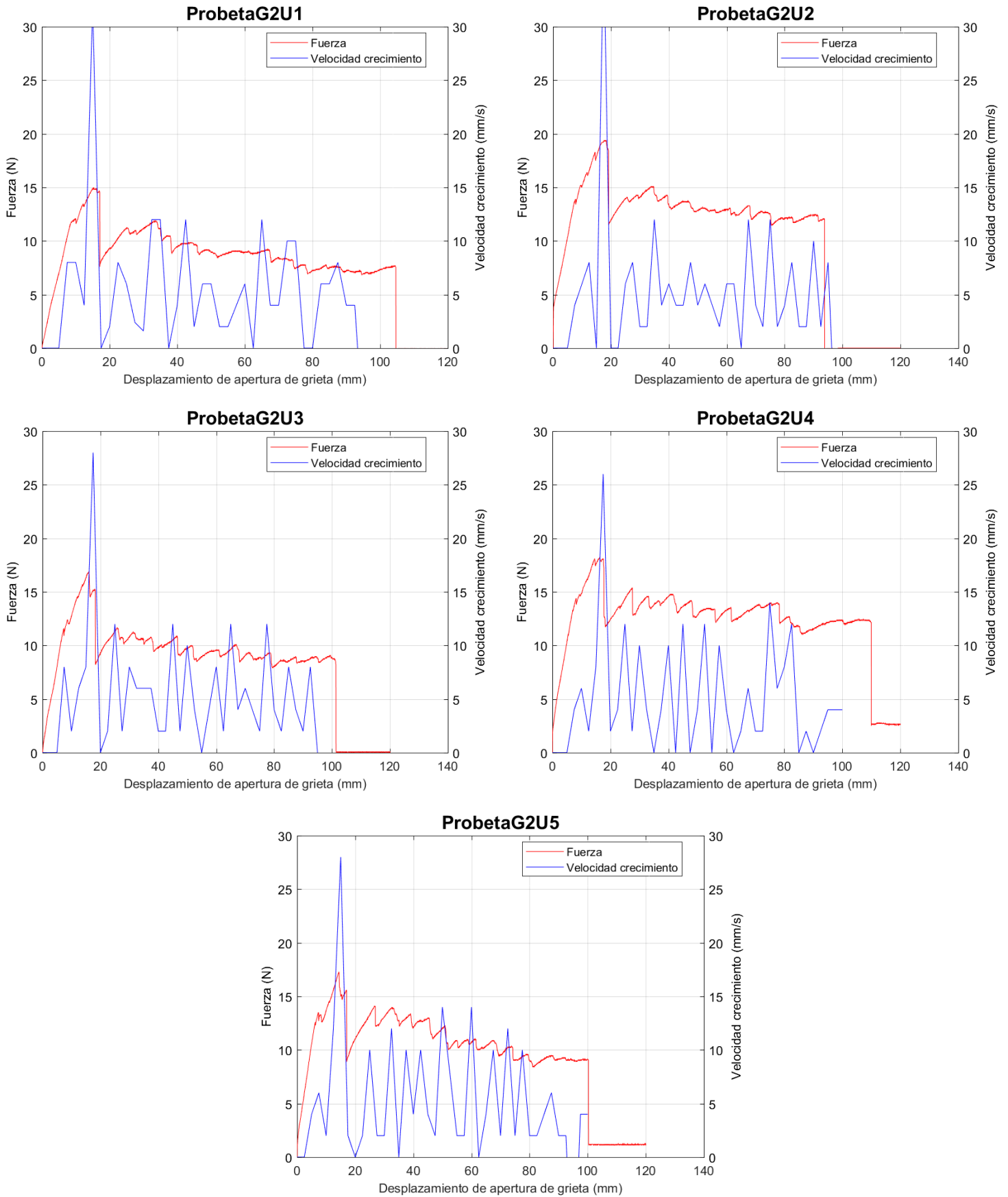
Gráfica 13. Resultados de fuerza frente a longitud de grieta para las probetas G2SN.



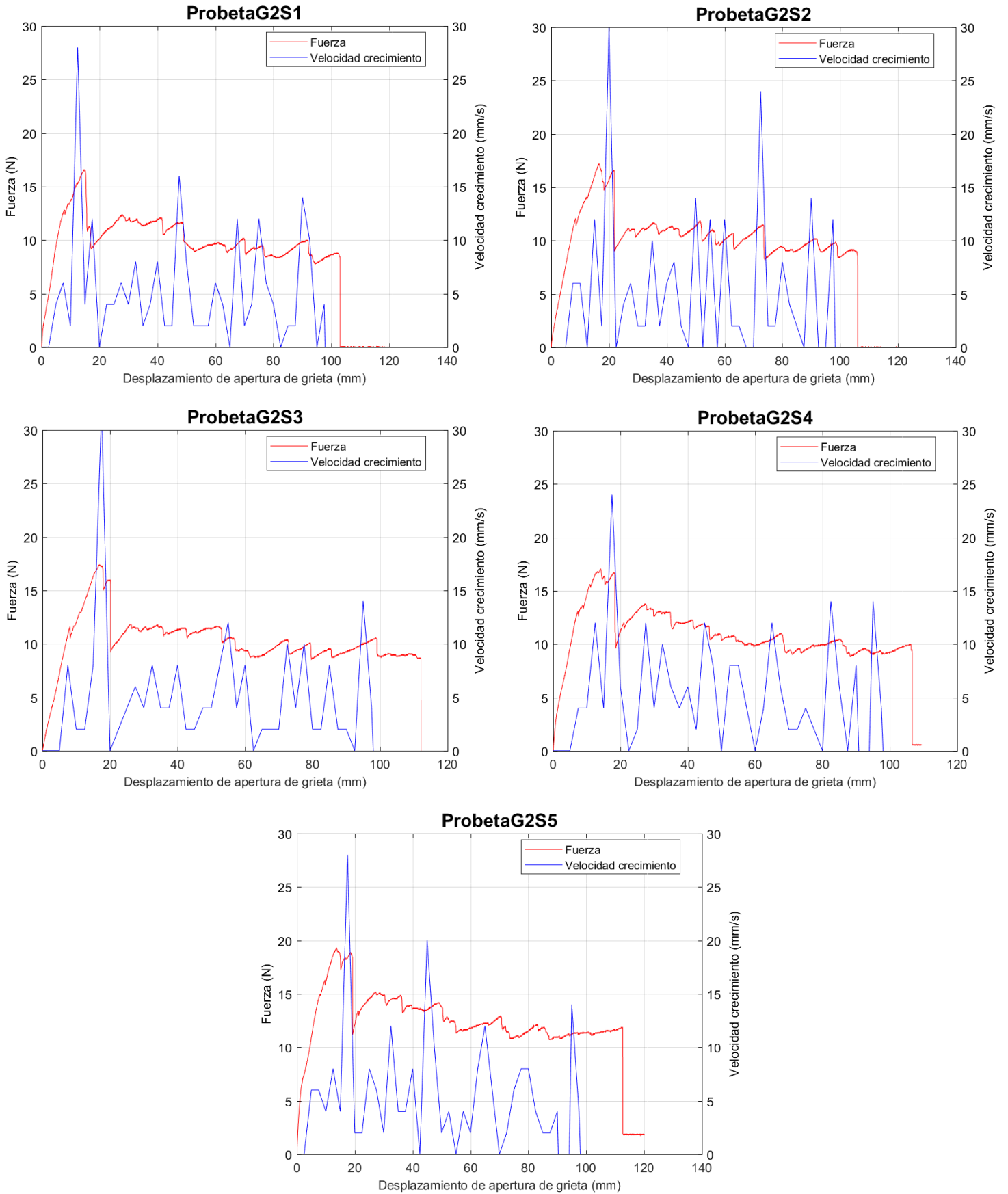
Gráfica 14. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G1UN.



Gráfica 15. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G1SN.



Gráfica 16. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G2UN.



Gráfica 17. Resultados de fuerza frente a velocidad de grieta para las probetas G2SN.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Miravete and E. Larrodé, *Materiales compuestos. Tomo II*, 1st ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2012.
- [2] D. P. M. y M. P. H. P. Rafael Andrés Robayo Salazar, Fernando Delgado Gómez, Julian Hermann Portocarrero, Jose Luis Trisancho Reyes, *Materiales compuestos clasificación, procesamiento y aplicaciones. Soluciones para los sectores Aeronáutico, Aeroespacial y Defensa*. Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI) y Universidad Tecnológica de Pereira, 2020.
- [3] “Poliester Gabiria,” *January 14, 2021*. <https://www.poliestergabiria.com/articulo-blog-4-2-3/>
- [4] ASTM International, “Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites,” p. 12, 2007.
- [5] A. Miravete and E. Larrodé, *Materiales compuestos. Tomo I*, 1st ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2012.
- [6] J. F. Shackelford, N. Martín, and A. Güemes, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, 7ª ed. Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [7] Patricia Reyes Cruz, “Mejora de procesos de fabricación de material compuesto mediante stitching y su repercusión en las propiedades mecánicas.” 2021.
- [8] M. A. López Martín, “Análisis mecánico de materiales compuestos y la mejora producida por la introducción de diversos factores en su proceso de fabricación.” 2018.
- [9] U. de Barcelona, “Materials”, [Online]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/fibra-de-vidrio-como-refuerzo>
- [10] A. Miravete, *Materiales compuestos*. Zaragoza: Los autores, 2000.
- [11] Ana Teresa Santiago Pérez, “Análisis numérico-experimental del comportamiento de una viga de material compuesto a flexión.” 2016.
- [12] P. Antequera Benitez, L. Jiménez Cano, and A. Miravete, *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*. Zaragoza: Universidad, 1991.
- [13] Juan Antonio Almazán Lázaro, “Estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos. Fabricación mediante técnicas de vacío e infusión. Ensayos experimentales y validación numérica.” 2014.
- [14] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design*, 3rd ed. Boca Raton [etc: CRC Press, 2008.
- [15] R. M. German, *Particulate Composites Fundamentals and Applications*, 1st ed. 20. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [16] K. K. Chawla, *Composite Materials Science and Engineering*, 3rd ed. 20. New York,

- NY: Springer New York, 2012.
- [17] J. F. Shackelford, *Introducción a materiales compuestos para ingenieros*. 1998.
- [18] U. de Alcalá, “Antecedentes”, [Online]. Available: <https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/8739/ANTECEDENTES.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- [19] J. H. Bendezú Reyes, “Introducción a las resinas poliéster y afines.”, [Online]. Available: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/bendezu_r_j/cap2.pdf
- [20] J. M. Arrollo Martínez, “Estudio de la morfología interfacial en materiales compuestos de matriz epoxi modificada y fibras de vidrio.”, 2010, [Online]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10765/PFC_Jose_Maria_Arroyo.pdf;jsessionid=913A62B69898B8DC2EA484555F6F2E29?sequence=1
- [21] Reacciones Químicas, “Resinas Viniléster”, [Online]. Available: https://www.reacciones.com/pdf/mercados/resinas/vynil_ester/krf-1001mv.pdf
- [22] “No Title,” p. <https://modelodemetalesypolimeros.wordpress.com/20>.
- [23] “No Title,” p. <https://www.redalyc.org/journal/707/70745478004/ht>.
- [24] “No Title,” p. <https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Alcud>.
- [25] G. A. F. Abu-Farsakh and H. M. Al.Jarrah, “Micro-mechanical damage model accounting for composite material nonlinearity due to matrix-cracking of unidirectional composite laminates,” 2018, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353818302379>
- [26] R. Talreja and J. Varna, *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*. Cambridge: Elsevier Science & Technology, 2015.
- [27] W. Li, C. Ji, H. Zhu, F. Xing, J. Wu, and X. Niu, “Experimental Investigation on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites Containing Nanocomposite,” *J. Nanomater.*, vol. 2013, p. 352639, 2013, doi: 10.1155/2013/352639.
- [28] A. Makeev, G. Seon, Y. Nikishkov, and E. Lee, “Methods for assessment of interlaminar tensile strength of composite materials,” *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 7, pp. 783–794, 2015, doi: 10.1177/0021998314525979.
- [29] P. W. R. Beaumont, “The failure of fibre composites: An overview,” *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 24, no. 4, pp. 189–205, 1989, doi: 10.1243/03093247V244189.
- [30] N. J. Pagano, *Interlaminar response of composite materials*. Amsterdam ; Elsevier, 1989.
- [31] A. C. Garg, “Delamination—a damage mode in composite structures,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 29, no. 5, pp. 557–584, 1988.
- [32] W. Li, Y. Liu, P. Jiang, F. Guo, and J. Cheng, “Study on Delamination Damage of

- CFRP Laminates Based on Acoustic Emission and Micro Visualization,” p. 20, 2022.
- [33] J. A. Pascoe, R. C. Alderliesten, and R. Benedictus, “Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds – A critical review,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 112–113, pp. 72–96, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.10.003>.
- [34] M. J. Suriani, H. Z. Rapi, R. A. Ilyas, M. Petru, and S. M. Sapuan, “Delamination and Manufacturing Defects in Natural Fiber-Reinforced Hybrid Composite: A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2021, doi: 10.3390/polym13081323.
- [35] J.-C. Grandidier, G. Ferron, and M. Potier-Ferry, “Microbuckling and strength in long-fiber composites: theory and experiments,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 29, no. 14, pp. 1753–1761, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(92\)90168-S](https://doi.org/10.1016/0020-7683(92)90168-S).
- [36] S. R. Vankar, A. N. Kaore, and C. S. Yerramalli, “Methodology for testing the compressive strength of pultruded composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 42, no. 11–12, pp. 544–557, 2023, doi: 10.1177/07316844221133293.
- [37] L. Tong, A. P. Mouritz, and M. K. Bannister, *3D fibre reinforced polymer composites*, 1st ed. Boston: Elsevier, 2002.
- [38] K. Bilisik, “Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review,” *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 7, pp. 725–743, 2012, doi: 10.1177/0040517511435013.
- [39] “Plaremesa”, [Online]. Available: <https://www.plaremesa.net/perfiles-estructurales-fibra-vidrio-elementos-otorgan-rigidez-las-construcciones/>
- [40] F. K. Ko, “Braiding,” *Composites*, vol. 21. ASM International, p. 0, Jan. 01, 2001. doi: 10.31399/asm.hb.v21.a0003361.
- [41] Y. Kyosev, *Braiding Technology for Textiles: Principles, Design and Processes*. Elsevier Science, 2014. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=K2F7AwAAQBAJ>
- [42] Y. B. T.-B. T. for T. Kyosev, Ed., “8 - The mechanics of the braiding process,” in *Woodhead Publishing Series in Textiles*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 177–209. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857099211.2.177>.
- [43] “Credit Ocean.” <https://www.creditoclean.net/es/una-introduccion-a-las-maquinas-de-trenzado>
- [44] A. Russo, M. Zarrelli, A. Sellitto, and A. Riccio, “Fiber Bridging Induced Toughening Effects on the Delamination Behavior of Composite Stiffened Panels under Bending Loading: A Numerical/Experimental Study,” 2019.
- [45] M. Elhadary, A. Hamdy, and W. Shaker, “Effect of fiber bridging in composites healing,” *Alexandria Eng. J.*, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821005172>
- [46] R. Khan, “Fiber bridging in composite laminates: A literature review,” 2019, [Online].

- Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318346051>
- [47] M. Elhadary, A. Hamdy, and W. Shaker, "Effect of fiber bridging in composites healing," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 4, pp. 2769–2774, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.002>.
- [48] J. M. Escacena Ventura, "Caracterización de las propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651", [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4089/>
- [49] J. L. Arana Bilbao and J. J. González Martínez, *Mecánica de fractura*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko ..., 2002.
- [50] "RS." <https://es.rs-online.com/web/>
- [51] "Castro Composites." <https://www.castrocompositesshop.com/>
- [52] "TF3P." <https://tf3p.com/>
- [53] "Airtech-Advanced Materials Group." <https://airtech.com/>
- [54] "Bacoeng", [Online]. Available: <https://bacoeng.com/products>
- [55] "Instron." <https://www.instron.com/es-es/>
- [56] "Allied Vision Technologies." <https://www.alliedvision.com/en/avt-cameras/>