



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA  
MULTIDIRECCIONAL EN MODO I DE MATERIALES ESTRUCTURALES  
LIGEROS DE INGENIERÍA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Civil

AUTOR: FERNANDO MATEO CRESPO BELTRÁN

TUTOR: ING. JONNATHAN DARÍO SANTOS BENÍTEZ, MSc.

Cuenca - Ecuador

2025

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Fernando Mateo Crespo Beltrán con documento de identificación N° 0107338311 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 10 de enero del 2025

Atentamente,

*Fernando Crespo.B*

---

Fernando Mateo Crespo Beltrán

0107338311

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Fernando Mateo Crespo Beltrán con documento de identificación N° 0107338311 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de investigación: “Caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I de materiales estructurales ligeros de ingeniería” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de enero del 2025

Atentamente,

*Fernando Crespo.B*

---

Fernando Mateo Crespo Beltrán

0107338311

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Jonnathan Darío Santos Benítez con documento de identificación N° 0105088058, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA MULTIDIRECCIONAL EN MODO I DE MATERIALES ESTRUCTURALES LIGEROS DE INGENIERÍA**, realizado por Fernando Mateo Crespo Beltrán con documento de identificación N° 0107338311, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de enero del 2025

Atentamente,



---

Ing. Jonnathan Darío Santos Benítez, MSc

0105088058

## **DEDICATORIA**

*A mí padre Fernando Crespo, a mí madre Jackeline Beltrán y a mí hermana Doménica Crespo, han sido mi motor y gracias a su ayuda y apoyo todas las metas y logros se han logrado, los amo con todo mi corazón.*

*A mis abuelos César, Gerardo, Carmen y Elisabeth por estar siempre presentes en cada momento y darme el impulso necesario para seguir adelante.*

Fernando Mateo Crespo Beltrán

## **AGRADECIMIENTO**

*Mi familia que siempre ha sido mi mayor apoyo incondicional, mi padre con sus grandes consejos y apoyo, mi madre con su amor y sabiduría y mi hermana que siempre ha estado en los buenos y malos momentos.*

*A mis abuelos por todos los hermosos momentos y su apoyo incondicional.*

*Al ingeniero Jonnathan Santos por haberme apoyado en las ideas planteadas en el grupo de investigación y más que ser un profesor le considero mí amigo.*

*A mis compañeros de la tesis los cuales han estado presentes en todo momento de la carrera, compartimos momentos, viajes y largas tardes de investigación*

*A las personas del coworking por apoyarnos en todo momento de esta investigación y brindarnos muchas herramientas para facilitar nuestro estudio.*

***Fernando Mateo Crespo Beltrán***

## RESUMEN

En este trabajo, se analizan las propiedades mecánicas y la resistencia interlaminar a la fractura de compuestos reforzados con fibra de vidrio continua, fabricados utilizando una impresora 3D Markforged MarkTwo<sup>®</sup>. El desafío principal de este estudio radica en la escasez de información sobre las características mecánicas de este material, lo que motivó la realización de la investigación para evaluar la resistencia a la falla interlaminar mediante ensayos de fractura en modo I. Se llevó a cabo el proceso de fabricación y prueba de las muestras para determinar sus características de tenacidad y comenzar la impresión de las muestras de fibra de vidrio.

El estudio de los resultados derivados de las pruebas de modos de falla mecánica proporcionó datos valiosos para futuras investigaciones y para posibles implementaciones en el ámbito de la impresión 3D, especialmente en lo que respecta a la producción de componentes estructurales. La investigación se centró en detectar las zonas vulnerables de las muestras utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta técnica permitió un análisis detallado de la microestructura de las fibras de vidrio, observando de manera microscópica su degradación, las rupturas intersticiales y otros defectos, así como las elongaciones y fallas mecánicas presentes en la superficie fracturada.

**Palabras claves:** fibra de vidrio, impresora Markforged MarkTwo<sup>®</sup>, tenacidad a fractura en modo I, microscopía electrónica de barrido

## ABSTRACT

In this study, the mechanical properties and interlaminar fracture resistance of composites reinforced with continuous fiberglass, manufactured using a Markforged MarkTwo<sup>®</sup> 3D printer, are analyzed. The main challenge of this research lies in the lack of information about the mechanical characteristics of this material, which motivated the investigation to evaluate interlaminar failure resistance through mode I fracture tests. The manufacturing and testing process of the samples was carried out to determine their toughness characteristics and to initiate the printing of fiberglass samples.

The study of the results derived from mechanical failure mode tests provided valuable data for future research and potential applications in the field of 3D printing, particularly concerning the production of structural components. The research remains focused on identifying vulnerable areas of the samples using scanning electron microscopy (SEM). This technique enabled a detailed analysis of the microstructure of fiberglass, observing its degradation, interstitial fractures, and other defects at a microscopic level, as well as the elongations and mechanical failures present on the fractured surface.

**Keywords:** glass fiber, Markforged MarkTwo<sup>®</sup> printer, mode I fracture toughness, scanning electron microscopy

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>6</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>9</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>18</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA</b> .....	<b>22</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1. Objetivo General</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>23</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1. Conceptos esenciales de mecánica de sólidos</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2. Fundamentos de la mecánica de la fractura</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3. Ensayos esenciales de caracterización mecánica</b> .....	<b>26</b>
<b>4.4. Materiales de ingeniería</b> .....	<b>28</b>
<b>4.5. Herramientas usadas para la producción y análisis de los especímenes</b> .....	<b>31</b>
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	<b>34</b>
<b>6. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>35</b>
<b>6.1. Introducción</b> .....	<b>35</b>
<b>6.2. Producción de especímenes</b> .....	<b>35</b>

<b>6.2.1. Fabricación de las piezas de aluminio.....</b>	<b>36</b>
<b>6.2.2 Producción de las probetas de fibra continua de vidrio .....</b>	<b>41</b>
<b>6.3. Preparación de ensayos.....</b>	<b>49</b>
<b>6.4. Reducción numérica de datos experimentales.....</b>	<b>58</b>
<b>6.5. Reducción estadística de datos representativos.....</b>	<b>61</b>
<b>6.6. Análisis de la superficie de fractura de la probeta en el SEM .....</b>	<b>62</b>
<b>7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
<b>7.1. Análisis de las gráficas de fuerza apertura.....</b>	<b>69</b>
<b>7.2. Análisis de las cargas máximas .....</b>	<b>71</b>
<b>7.3. Análisis de los resultados del SEM.....</b>	<b>73</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>88</b>
<b>10. ANEXOS .....</b>	<b>90</b>
<b>10.1. Taladro vertical .....</b>	<b>91</b>
<b>10.2. Impresora 3D vista superior .....</b>	<b>92</b>
<b>10.3. Impresora 3D vista frontal.....</b>	<b>93</b>
<b>10.4. Cinta térmica .....</b>	<b>93</b>
<b>10.5. Filamento de Onix™ .....</b>	<b>94</b>
<b>10.6. Drybox.....</b>	<b>97</b>
<b>10.7. Estereomicroscopio.....</b>	<b>97</b>
<b>10.8. Trípode .....</b>	<b>104</b>

<b>10.9. Cámara Nikon™</b> .....	<b>105</b>
<b>10.10. Calibrador digital de precisión</b> .....	<b>105</b>
<b>10.11. Entenalla de precisión</b> .....	<b>106</b>
<b>10.12. Entenalla de precisión</b> .....	<b>107</b>
<b>10.13. Probeta colocada en la base del SEM</b> .....	<b>108</b>
<b>10.14. Rectificadora plana</b> .....	<b>108</b>
<b>10.15. Equipos de visualización del SEM</b> .....	<b>110</b>
<b>10.16. Desecador</b> .....	<b>110</b>
<b>10.17. SEM</b> ... ..	<b>111</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agujero elíptico en placa plana.....	18
Figura 2. Representación esquemática de los tres modos de fractura.....	26
Figura 3. Curva de deformación.....	27
Figura 4. Polipropileno.....	28
Figura 5. Esquema de tipos de refuerzos.....	30
Figura 6. Impresora Markforged® The Mark Two™.....	41
Figura 7. Probeta de ajuste de parámetros en Onix™.....	43
Figura 8. Aplicación de la capa homogénea de pegamento sólido en barra.....	43
Figura 9. Impresión de las primeras capas de Onix™.....	44
Figura 10. Colocación de la capa de cinta térmica entre los dos constituyentes.....	44
Figura 11. Remoción del Onix™.....	45
Figura 12. Primeras capas de fibra de vidrio.....	45
Figura 13. Aplicación de la segunda capa de cinta térmica para generar la pre-grieta.....	46
Figura 14. Finalización de la impresión de la Probeta conforme normativa.....	46
Figura 15. Corte con láser de la Probeta impresa conforme medidas del ensayo.....	48
Figura 16. Marcado de la grieta mediante observación en estereomicroscopio.....	48
Figura 17. Dry Box con bolsas desecantes para capturar humedad.....	49
Figura 18. Posicionamiento de la pre-grieta y señalización con líneas verticales de dos colores.....	50
Figura 19. Colocación del teflón industrial entre los brazos de viga la probeta.....	50
Figura 20. Pegado de los bloques de carga en aluminio.....	51
Figura 21. Prensa manual durante el proceso de curado del pegamento.....	51
Figura 22. Máquina de ensayos universal.....	52
Figura 23. Ensayo de pre-fractura a apertura controlado.....	53
Figura 24. Cámara profesional Nikon™ captando el avance del frente de grieta durante el ensayo.....	53

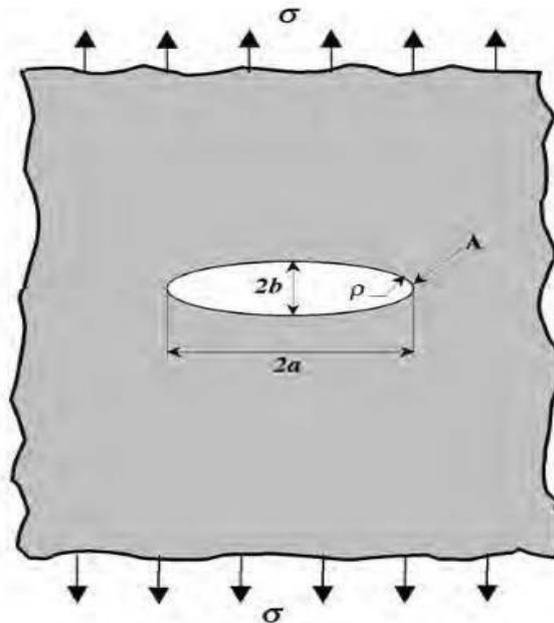
Figura 25. Marcando del alcance de la pre-grieta mediante observación óptica.....	55
Figura 26. Gráfica fuerza/apertura de una muestra ensayada .....	59
Figura 27. Compendio de gráficas fuerza/apertura de las 3 probetas ensayadas .....	60
Figura 28. Recubrimiento de oro a la probeta .....	64
Figura 29. Ensamblaje de la muestra.....	65
Figura 30. SEM marca Jeol, modelo IT300.....	66
Figura 31. Captura de la superficie de fractura mediante SEM a x500 de magnificación .....	67
Figura 32. Captura de la zona de fractura de la muestra mediante SEM a x20 de amplificación .....	67
Figura 33. Muestras guardadas en el desecador .....	68
Figura 34. Gráfica fuerza/apertura (N/mm) del lote de probetas ensayadas .....	69
Figura 35. Zona de inspección 1 mediante SEM a x500 de amplificación .....	78
Figura 36. Zona de inspección 2 mediante SEM a x500 de amplificación .....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuerzas máximas del lote de probetas ensayadas .....	60
Tabla 2. Medidas de la probeta.....	61
Tabla 3. Cálculo del $G_{IIIC}$ .....	62

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el año de 1923, Griffith, apoyándose en la ley de la conservación de energía, propuso que en el momento en que una red cambia de un estado estable a uno no estable, se produce una disminución en su potencial energético completo. Este planteamiento lo motivó a investigar El estudio de la ruptura en materiales frágiles con grietas permitió sentar los principios esenciales de la Mecánica de la Fractura. Según su teoría, una grieta solo puede formarse o expandirse si este proceso conlleva a una reducción de la energía total del sistema o si dicha energía permanece constante. (Vázquez, 2022). Griffith fue el primero en presentar un análisis cuantitativo del impacto de la concentración de tensiones en las grietas, estudiando los agujeros de forma elíptica en placas planas.



**Figura 1.** Agujero elíptico en placa plana

Imagen extraída de (Vázquez, 2022)

Griffith continuó con su investigación (Griffith, 1995) en la que, por primera vez, estableció una relación entre la tensión aplicada y el tamaño de un defecto mediante un análisis de tensiones en defectos con forma de elipse. Este estudio mostró que, al someter estos defectos a tensión hasta que se formara una grieta, la resistencia real de los materiales frágiles a la tensión era considerablemente inferior a lo que se había predicho teóricamente, debido a la presencia de rupturas microscópicas en su estructura interna.

En la década de 1950, el modelo de Griffith fue modificado por Irwin, quien lo amplió para incluir materiales con deformación plástica en los bordes de las grietas, es decir, materiales más dúctiles. En su trabajo de 1950, Irwin introdujo el principio de velocidad de disipación energética en la teoría de Griffith. Más adelante, Irwin utilizó la aproximación propuesta por Westergaard en 1939 para demostrar que las tensiones y aperturas cerca de la punta de la grieta podían ser expresadas con una constante, la cual se denomina actualmente el factor de intensidad de tensiones ( $K$ ) (Vázquez, 2022).

Después de desarrollar los conceptos básicos de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM), comenzaron las investigaciones para abordar la plastificación cerca de la punta de la grieta. En 1961, Wells propuso la apertura de las caras de la grieta como un criterio alternativo de diseño cuando se observaba una plastificación considerable en la punta de la grieta (Arana, 2002). Esta observación dio lugar a la creación de un parámetro denominado como la abertura del frente de la fisura. En 1968, Rice introdujo la integral de contorno  $J$ , una extensión de la tasa de liberación de energía en el caso de materiales más dúctiles, tomando en cuenta la deformación plástica como una deformación elástica no lineal. Este desarrollo fue clave para la creación de la Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM) (Vázquez, 2022).

La evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales es crucial para entender su comportamiento frente a diferentes tipos de cargas. En tiempos recientes, se ha investigado el uso de fibras como refuerzo en probetas de polímeros, lo que ha demostrado ser una técnica prometedora para mejorar sus propiedades (Katalagarianakis, 2023). Esta técnica implica incorporar fibras en la base polimérica con el fin de mejorar su durabilidad y resistencia frente a esfuerzos y deformaciones. Mediante pruebas de tracción, flexión y compresión, se puede evaluar el efecto de estas fibras sobre las características mecánicas de los polímeros, lo que facilita la personalización de los materiales compuestos obtenidos para su uso en diversas áreas industriales. Además, este análisis contribuye a optimizar los procesos de fabricación y garantizar la calidad de los productos finales (Katalagarianakis, 2023).

El uso de fibras como refuerzo ha transformado el campo estructural, ya que las fibras, siendo materiales versátiles y económicos, ofrecen una alternativa rentable para fortalecer las estructuras, mejorando su resistencia y durabilidad sin comprometer la calidad ni causar impactos negativos en el entorno (Belouar, 2013). Las imperfecciones en las estructuras de concreto, originadas por deficiencias en la ejecución, desgaste del material, corrosión del refuerzo metálico o un incremento en las cargas previstas, han ocasionado el envejecimiento de estas estructuras, lo que genera un riesgo que requiere reforzamiento. Actualmente, la incorporación de fibras como refuerzo en estructuras ha mostrado resultados prometedores, como es el caso de las fibras de carbono en materiales estructurales (Katalagarianakis, 2023). Aunque existe una gran cantidad de investigaciones sobre la utilización experimental de diferentes materiales livianos como refuerzo, el entendimiento acerca del empleo de fibra de vidrio como refuerzo continúa siendo escaso. A pesar de que se han llevado a cabo diversos análisis sobre la

resistencia a la fractura en modo I de compuestos impresos en 3D y reforzados con materiales ligeros, no se ha comprobado aún la viabilidad de esta técnica en polímeros reforzados con fibra de vidrio. La fibra de vidrio, una opción económica y ampliamente empleada en aplicaciones estructurales podría aprovechar la fabricación aditiva para producir geometrías complejas y refuerzos de fibra específicos. Sin embargo, La carencia de información experimental acerca de la resistencia a la fractura por delaminación en polímeros reforzados con fibra de vidrio, en modo I, en compuestos impresos en 3D sigue siendo una brecha en el conocimiento que esta tesis busca llenar. Las fibras de carbono continuas, por ejemplo, pueden mejorar significativamente Las características de los componentes de polímero producidos mediante impresión 3D utilizando la extrusión de materiales. No obstante, al igual que otros compuestos laminados, las piezas impresas en 3D son susceptibles a daños por delaminación (Katalagarianakis, 2023).

El desafío principal de este trabajo radica en la ausencia de datos experimentales que permitan comprender y aplicarlos en la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I de materiales estructurales ligeros. Es clara la limitada cantidad de investigaciones y fuentes que avalen la aplicación efectiva de la fibra de vidrio como refuerzo en polímeros, a pesar de las prometedoras características mecánicas del vidrio. Por lo tanto, la limitada información comparativa con materiales de polímeros reforzados con carbono ha restringido el entendimiento sobre el comportamiento y las posibles ventajas de los polímeros reforzados con fibra de vidrio (Santos, 2023).

## 2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA

Comprender la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo I multidireccional es esencial para evaluar cómo los materiales comerciales de Markforged® pueden resistir cargas y prevenir la formación y propagación de grietas estables o inestables cuando las piezas fabricadas mediante tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) se someten a una carga perpendicular a su plano. Es fundamental considerar el comportamiento del polímero reforzado con fibra de vidrio, ya que esto permitiría diseñar estructuras seguras y anticipar su respuesta ante diversas cargas.

Además, investigar la tenacidad a la fractura en modo I multidireccional puede facilitar el desarrollo de nuevos materiales compuestos con propiedades mejoradas, lo que resultaría en diseños más robustos y ligeros, optimizando el rendimiento económico de futuras aplicaciones estructurales.

Finalmente, al realizar ensayos sobre los polímeros reforzados con fibra de vidrio, se contribuye al progreso del conocimiento científico en el área de la mecánica de fractura lineal elástica, proporcionando información valiosa que aún es limitada en la literatura actual.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Caracterizar la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I de materiales estructurales ligeros de ingeniería.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Fabricar especímenes multidireccionales para la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo I de polímeros reforzados con fibra de vidrio.
- Evaluar la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I del polímero reforzado con fibra de vidrio mediante ensayos cuasi estáticos.
- Analizar el comportamiento morfológico superficial asociado a la mecánica de la fractura.

## 4. MARCO TEÓRICO

Se exponen los conceptos esenciales y los elementos principales para abordar el tema relacionado con la evaluación mecánica de la resistencia a la fractura en múltiples direcciones en modo I de materiales ligeros estructurales empleados en ingeniería:

### 4.1. Conceptos esenciales de mecánica de sólidos.

**Esfuerzo cortante:** el corte hace referencia a las presiones del interior del material cuando se aplican fuerzas en dirección perpendicular a su dirección de mayor dirección. En este marco, se examina la capacidad del material para resistir el corte, los esfuerzos cortantes máximos que puede soportar y los modos de fallo asociados con la deformación inducida por este tipo de carga (Popov, 2000).

**Impacto:** la caracterización del impacto en materiales hace referencia a la capacidad de un material para resistir cargas internas y externas sin sufrir. Esta característica se analiza a través de diversas evaluaciones y experimentos, que incluyen desde pruebas de fuerza mecánica hasta estudios de dureza y resistencia a la fatiga, entre otros métodos. La valoración del impacto es esencial para determinar la idoneidad de un material en una amplia gama de aplicaciones, que incluyen desde la construcción hasta la fabricación de dispositivos médicos (Callister et al., 2016).

**Caracterización a flexión:** la caracterización en flexión abarca diversas técnicas y enfoques empleados para evaluar las propiedades mecánicas de un material expuesto a cargas flexionales. Entre los aspectos que se analizan se encuentran la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la manera en que el material se deforma bajo estas fuerzas (Hibbeler, 2011).

**Dureza:** La dureza se refiere a la habilidad de un material para soportar deformaciones permanentes o daños en su superficie cuando se somete a cargas específicas. Normalmente, la dureza se evalúa a través de pruebas estandarizadas, donde se aplica una carga controlada sobre un penetrador que interactúa con la superficie del material, y luego se mide la profundidad alcanzada por la penetración (Callister, 1995).

#### **4.2. Fundamentos de la mecánica de la fractura.**

- **Modo I: fractura por apertura.**

En el Modo I, la carga se aplica de manera perpendicular a la grieta, causando su apertura. Este tipo de fallo se caracteriza por un esfuerzo de tracción que provoca que la grieta se abra en la dirección perpendicular a su superficie (Xiang, 2023).

- **Modo II: fractura por cizallamiento en plano.**

En el Modo II, la carga se aplica en paralelo a la dirección de la grieta y perpendicular a su superficie, lo que provoca un deslizamiento relativo entre las superficies de la grieta (Xiang, 2023).

- **Modo III: fractura por cizallamiento fuera de plano.**

En el Modo III, la carga se aplica de manera perpendicular a la dirección de la grieta y paralela a su superficie, lo que genera un deslizamiento relativo de las superficies de la grieta en dirección lateral (Xiang, 2023).

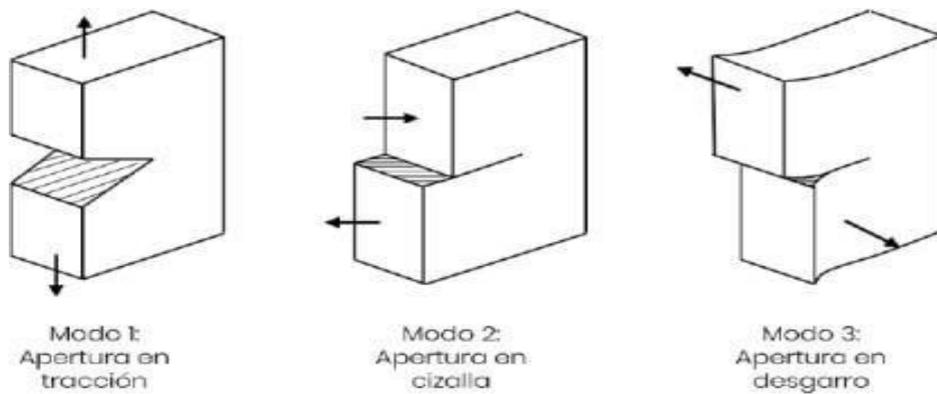


Figura 2. Representación esquemática de los tres modos de fractura

Imagen extraída de (Vázquez, 2022)

### 4.3. Ensayos esenciales de caracterización mecánica.

**Ensayo tensión en el plano:** la prueba de tracción, dentro del contexto de la caracterización mecánica de un material, es un ensayo cuyo propósito es poner a prueba la respuesta del material al momento de ejecutar una carga que aumenta progresivamente a la dirección más corta del plano. Durante este proceso, se registran y analizan las deformaciones generadas por las fuerzas aplicadas, con el objetivo de determinar propiedades esenciales como la resistencia a la tracción, el límite elástico, la ductilidad y la rigidez del material (Beer, 2020).

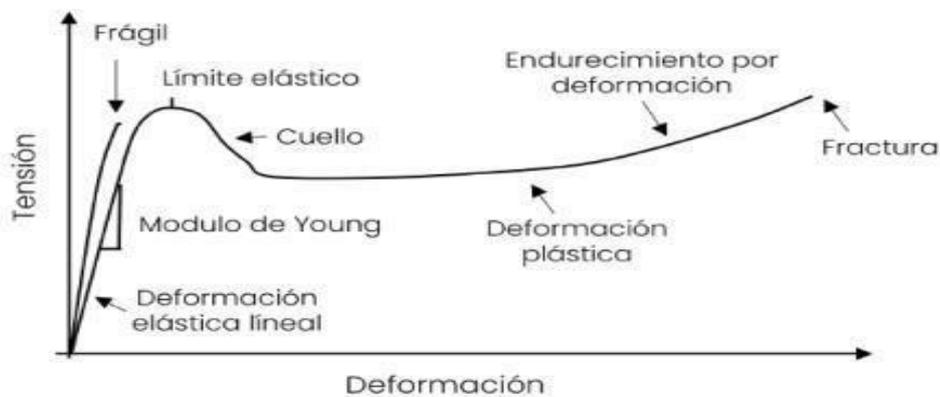


Figura 3. Curva de deformación

Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

**Erwin doble grieta:** es un método experimental utilizado para analizar la propagación de fracturas en materiales, especialmente en aquellos que son frágiles. Consiste en

introducir dos grietas iniciales en una muestra de material y someterla a esfuerzos mecánicos. Esto permite observar cómo se propagan las fracturas desde ambas grietas y cómo interactúan entre sí, proporcionando información valiosa sobre la resistencia del material, su comportamiento frente a esfuerzos y su capacidad para disipar energía. Este tipo de prueba es especialmente útil para estudiar la mecánica de fractura y la influencia de la geometría de las grietas en la resistencia estructural (ASTM, 2017).

**Ensayo de Fractura (EWF, por sus siglas en inglés):** la teoría de EWF se basa en la descomposición de la energía involucrada en un proceso de fractura dúctil ( $W_f$ ) en dos componentes: el trabajo esencial ( $W_e$ ), que representa la energía requerida para la propagación de la grieta, y el trabajo plástico o no esencial ( $W_p$ ), que abarca otras fuentes de energía, como la disipación de calor, utilizadas durante el desarrollo del proceso de fractura (Balas, 2001).

$$W_f = W_e + W_p \quad (1)$$

#### 4.4. Materiales de ingeniería.

**Polímeros:** Son moléculas grandes compuestas por la repetición continua de una o más unidades químicas, conectadas entre sí a través de enlaces covalentes. Según su procedencia, los polímeros pueden dividirse en naturales o sintetizados. Los polímeros sintetizados están compuestos generalmente por uno a tres tipos de unidades repetitivas, mientras que los naturales, también conocidos como biopolímeros, presentan estructuras considerablemente más complejas. En la actualidad, los polímeros sintéticos gozan de un mayor interés comercial, por lo que nos centraremos en ellos (Beltrán, 2012).

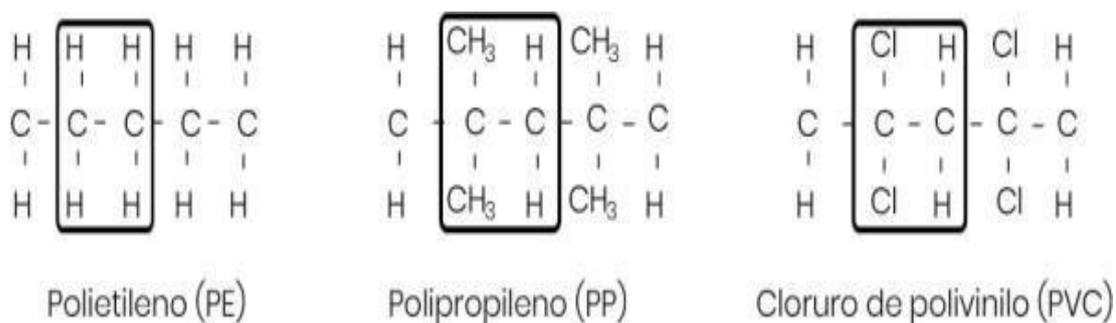


Figura 4. Polipropileno.

Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

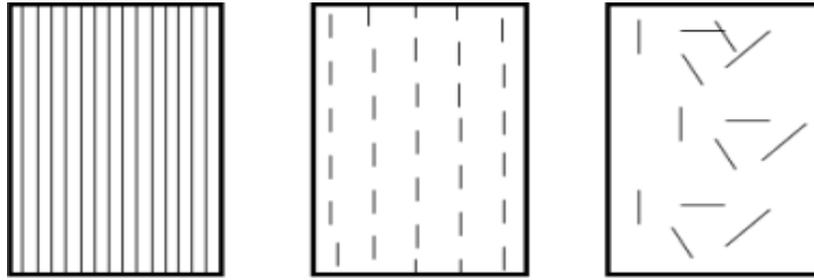
**Ejemplos de monómeros en diferentes polímeros:** los polímeros se distinguen entre sí por diversas características, como el tipo de monómero utilizado, la cantidad de monómeros presentes, el tipo de enlace que los une, la distribución a lo largo de la cadena polimérica, el grado de ramificación y el proceso de fabricación empleado (Reynoso, 2021).

Los componentes son obtenidos a través de distintos orígenes de materiales primos,

aunque la mayor parte proviene de derivados del gas natural o del petróleo crudo como su componente principal. El petróleo crudo es la fuente más común, ya que, al someterse a un proceso de destilación, se obtiene nafta, la cual posteriormente pasa por un proceso químico llamado craqueo o cracking. Este proceso descompone las moléculas de la nafta para obtener componentes sencillos.

**Polímeros reforzados:** Los polímeros pueden mejorarse añadiendo aditivos o materiales de refuerzo, lo que da lugar a compuestos con características más avanzadas que las de la resina original. Estas modificaciones deben estar relacionadas con características mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas o con la mejora de la procesabilidad. Para realizar estas modificaciones utilizan partículas en escalas nano y micro, fibras, o mezclas y aleaciones con otros polímeros. Estos materiales adicionales se integran a la matriz polimérica durante un proceso de extrusión, conocido como compounding (Caicedo, 2017).

Los refuerzos pueden emplearse para abaratar costos, dado que algunos son más accesibles económicamente que el polímero principal y pueden sustituir una fracción de su volumen. Además, estas combinaciones ayudan a disminuir el peso y permiten la creación de formas más complejas en componentes que antes se fabricaban con metales (Díaz, 2015).



**Figura 5.** Esquema de tipos de refuerzos.

Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

Este procedimiento, que implica la incorporación de aditivos al plástico para obtener un material homogéneo, se conoce como proceso de composición, aunque es más comúnmente denominado por su término en inglés, *compounding*. Por lo general, el proceso inicia con una mezcla en seco y concluye con el uso de una extrusora, que completa la mezcla y produce los gránulos de resina plástica con los aditivos distribuidos de manera uniforme.

#### **4.5. Herramientas usadas para la producción y análisis de los especímenes.**

**Esteriomicroscopio:** el estereomicroscopio es un microscopio de laboratorio que brinda una visión tridimensional de aquello que se quiere examinar, una función con la que los microscopios compuestos no cuentan, esto se logra gracias a que cuenta con dos lentes para cada ojo (Agudelo, 2021).

**Máquina de ensayos universal:** Un equipo de pruebas universal es un instrumento crucial en ingeniería para estudiar las propiedades mecánicas de los materiales mediante la aplicación controlada de fuerzas. Este aparato somete a las muestras de materiales como metales, plásticos y cerámicas a cargas de tracción, compresión o flexión, lo que posibilita la evaluación de características clave como la resistencia, elasticidad, ductilidad y más. Los ensayos realizados con una máquina de ensayos universal ofrecen datos precisos sobre el comportamiento estructural y las capacidades de carga de los

materiales, desempeñando un papel fundamental en el diseño y la validación de componentes utilizados en diversas industrias (Kuhn, 2000).

**Impresora 3D The Mark Two de Markforged®:** la impresora 3D Markforged® es un dispositivo de fabricación aditiva que emplea la tecnología de deposición de filamentos compuestos para producir piezas con alta precisión y resistencia, esta tecnología permite reforzar las impresiones con materiales como la fibra de vidrio, lo cual posibilita la creación de componentes que exhiben propiedades mecánicas avanzadas y específicas según las necesidades de diseño (Lipson, 2013).

**Rectificadora plana:** Una rectificadora plana es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados de alta precisión en superficies planas. Su principal función es eliminar pequeñas cantidades de material de una pieza para obtener un acabado superficial liso y uniforme. Esto se logra mediante el uso de una muela abrasiva que gira a alta velocidad, removiendo material de la superficie de la pieza mientras esta se desplaza bajo la herramienta (Groover, 2015).

**Máquina de corte laser:** una máquina de corte por láser es un dispositivo que utiliza rayos láser de alta potencia para cortar, marcar y grabar textos en varios materiales, para su uso se enfoca el láser sobre la superficie de la pieza y utilizando un láser de alta temperatura para fundir o evaporar el material, de este modo el corte se realiza cortes precisos y detallados (TOOL, 2023).

**Máquina de corte con agua:** una máquina de corte con agua a presión es un dispositivo que utiliza agua a altas velocidades y presión para cortar varios materiales, para su uso se enfoca la punta de la boquilla sobre la superficie de la pieza, mediante el

uso de agua a presión elevada, se corta el material a lo largo de la superficie de la pieza, logrando así cortes detallados y precisos.

## 5. HIPÓTESIS

Comprender la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I de materiales estructurales ligeros es esencial para analizar y optimizar su desempeño a la capacidad de resistencia. Este enfoque implica la realización de pruebas especializadas que comparan las propiedades de diferentes materiales, examinando su habilidad para frenar la expansión de fisuras. Los polímeros reforzados con fibra de vidrio son frecuentemente empleados en la industria y la construcción debido a su excepcional relación entre resistencia y peso.

En este estudio, se realizarán ensayos para evaluar el comportamiento de estos materiales bajo cargas que inducen el modo I, el cual provoca la mayor tasa de fractura. Además, se investigarán los mecanismos que afectan la resistencia de los mismos. Los ensayos en polímeros reforzados con fibra de vidrio siguen demostrando su potencial para profundizar en el conocimiento de la mecánica de las fracturas.

Este enfoque de investigación proporciona datos detallados y específicos que previamente no se disponían, lo que permite una mejor comprensión del comportamiento tanto de la matriz polimérica como de la estructura fibrosa en el modo I. Esta información es clave para optimizar el diseño y la fabricación de productos compuestos, mejorando su desempeño y confiabilidad en aplicaciones complejas, así como su seguridad en distintos ambientes y actividades.

## 6. MARCO METODOLÓGICO

### 6.1. Introducción

El enfoque de evaluación se centra en investigar la resistencia a la abertura interlaminar tipo I de productos fabricados con fibra de vidrio continua mediante impresión 3D, a través de ensayos y análisis exhaustivos. Para llevar a cabo este estudio, se diseñaron y fabricaron especímenes interlaminares utilizando la tecnología de impresión 3D, incorporando una técnica de diseño que utiliza configuraciones híbridas de fibras entre capas, fundamentadas en la rigidez a la flexión del material.

Mediante ensayos avanzados y un análisis detallado de la curva R (resistencia a la propagación de fracturas), se establece la relación entre la resistencia a la fractura y el crecimiento de las grietas durante las pruebas. El comportamiento de fractura interlaminar en los compuestos de fibra de vidrio es bien conocido. Al ser analizado en la interfaz de fractura microestructural a través de microscopía electrónica de barrido, este enfoque proporciona información relevante sobre las propiedades interlaminares de las fibras de vidrio, así como las limitaciones inherentes a estos materiales.

Además, la estratificación de los compuestos brinda datos esenciales para la optimización de estos materiales en aplicaciones de alto rendimiento, permitiendo ajustar sus características para mejorar su desempeño en diversas condiciones operativas.

Finalmente, fue necesario llevar a cabo una serie de trabajos preliminares que fueron fundamentales para la preparación de los ensayos. A continuación, se detallarán estas etapas para explicar cada fase del proceso investigativo.

## **6.2. Producción de especímenes**

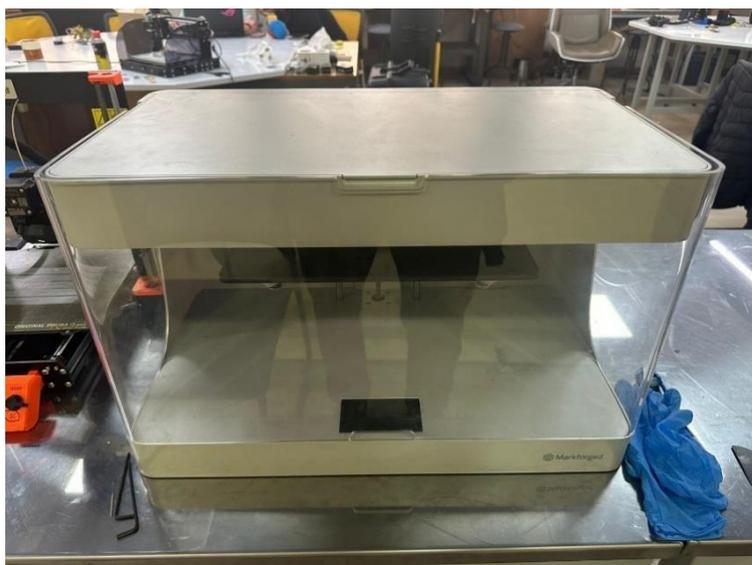
Lo primero que se realiza para la fabricación de las probetas en la investigación consistió en la obtención de los materiales fundamentales, que incluyeron filamentos de fibra continua de vidrio compatibles con la impresora Markforged<sup>®</sup>, un escariador con diámetro de  $\varnothing = 3$  mm, una barra de acero inoxidable de 15 mm de longitud y  $\varnothing = 3$  mm, así como una placa de aluminio con dimensiones de 150mm x 150mm x 3 mm.

### **6.2.1. Fabricación de las piezas de aluminio.**

La fabricación de las piezas de aluminio se llevó a cabo mediante corte por chorro de agua a alta presión, logrando obtener piezas de 150 mm x 150 mm. Posteriormente, se realizaron los agujeros necesarios utilizando el escariador y taladro adecuados, en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.

### **6.2.2 Producción de las probetas de fibra continua de vidrio.**

El procedimiento de creación de un modelo de filamento de vidrio a través de impresión 3D inicia con la creación de un diseño en un programa CAD. Tras completar el diseño, este se exporta a un archivo STL (estereolitografía), formato ideal para ser procesado por las impresoras Markforged<sup>®</sup>.



**Figura 6.** Impresora Markforged® The Mark Two™.

El plano se sube en el programa Eiger™, donde se configuran parámetros como la velocidad de impresión, el calor y la posición de las fibras de vidrio. Es relevante destacar que estos parámetros están preestablecidos en el software y no pueden ser alterados por el usuario. Además, la impresora está diseñada para producir materiales compuestos, depositando al mismo tiempo capas de polímero y fibras de vidrio conforme al plano seleccionado.

Durante la impresión, el material polimérico se deposita capa por capa, incorporando fibras de vidrio en posiciones específicas para fortalecer la estructura. Este enfoque estratificado asegura una distribución adecuada de las fibras, optimizando las propiedades mecánicas del material. La impresora tiene control total sobre la cantidad y la orientación de las fibras de vidrio, factores esenciales para garantizar una alta resistencia a la fractura y una tenacidad superior.

La probeta diseñada para el ensayo, siguiendo la normativa pertinente, se imprime en un total de 40 capas, que incluyen tanto capas de polímero como una capa interna de

material compuesto, según lo especificado por la configuración en el software Eiger™. A continuación, se presenta una descripción general del procedimiento de producción de probetas:

### **Etapas de validación del proceso de impresión.**

- 1) Se fabricaron tres probetas de prueba utilizando Onix™ con el propósito de verificar la precisión del diseño y evaluar el estado operativo de la máquina de impresión.



**Figura 7.** Probeta de ajuste de parámetros en Onix™.

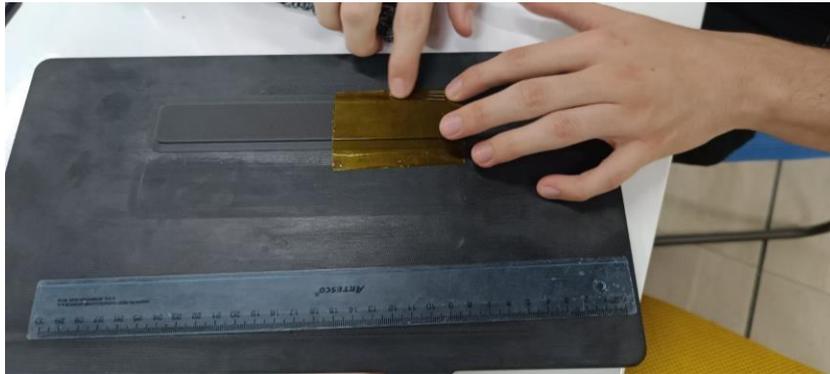
### **Etapas de fabricación de las probetas definitivas.**

- 1) Ya configurada la impresora, se inicia la fabricación con fibra continua de vidrio. Antes de iniciar, se debe aplicar una capa de adhesivo especializado sobre la plataforma de impresión de la impresora 3D. Este procedimiento es crucial, ya que facilita la extracción de la probeta una vez completado el proceso de impresión y previene posibles fracturas durante su retiro.



**Figura 8.** Aplicación de la capa homogénea de pegamento sólido en barra.

- 2) Las primeras cinco capas de la probeta se imprimen con Onix™ para crear una base firme que asegure una correcta adherencia a la superficie de impresión. Este método no solo incrementa la estabilidad durante el proceso de impresión, sino que también garantiza que, al retirar la probeta, la fibra de vidrio no quede pegada a la base de la impresora, lo que podría poner en riesgo la integridad de la muestra.



**Figura 9.** Impresión de las primeras capas de Onix™.

- 3) Ya impresas las primeras cinco capas de Onix™, se coloca una cinta térmica (Kapton™) con dimensiones de 175 x 20 mm. Esta cinta cumple la función de separar las capas de Onix™ de las fibras de vidrio, evitando que se mezclen los materiales y garantizando la integridad del proceso de fabricación.



**Figura 10.** Colocación de la capa de cinta térmica entre los dos constituyentes.

- 4) Algo esencial durante el proceso de impresión es retirar las capas de Onix™ de la impresora. Este procedimiento impide que ambos materiales se fusionen, garantizando

que las muestras de prueba estén compuestas únicamente de fibra de vidrio.



**Figura 11.** Remoción del Onix™

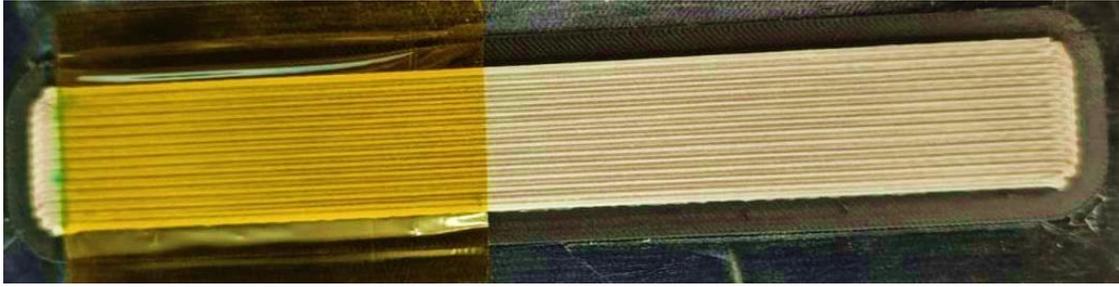
- 5) Una vez aplicada la cinta térmica, se ajusta nuevamente la base de la impresora 3D para comenzar con la impresión de las primeras 15 capas de fibra de vidrio.



**Figura 12.** Primeras capas de fibra de vidrio

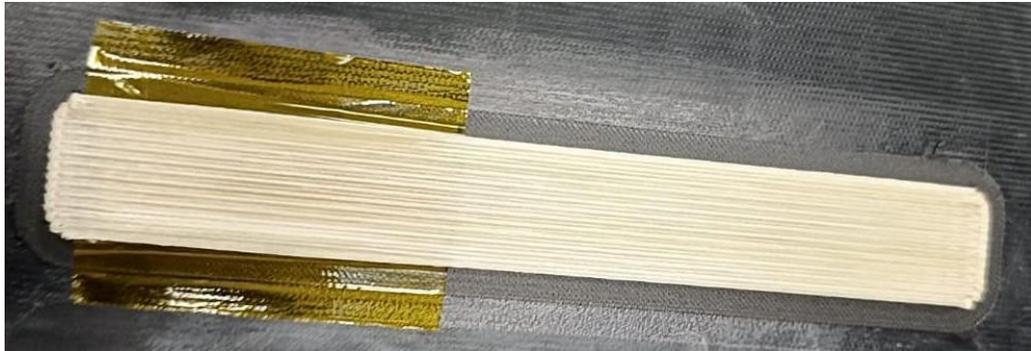
- 6) Al depositar las primeras capas de fibra de vidrio, se coloca una segunda capa de cinta térmica a lo largo de los laterales de la probeta, como se ilustra en la Figura 13. Este paso tiene como propósito promover la formación de una grieta inicial al finalizar la impresión. Es crucial no recortar la cinta térmica al aplicarla, ya que una colocación incompleta podría ocasionar deformaciones en la probeta, bloquear el flujo de filamento en la boquilla y generar fallos durante

la impresión.



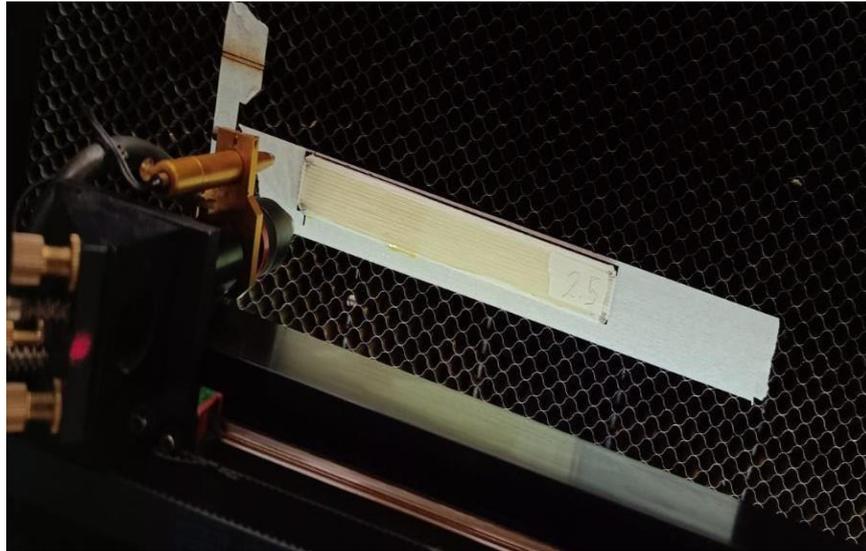
**Figura 13.** Aplicación de la segunda capa de cinta térmica para generar la pre-grieta.

- 7) Una vez aplicada la segunda capa de cinta térmica, se procede a la impresión de las últimas 15 capas de fibra de vidrio.



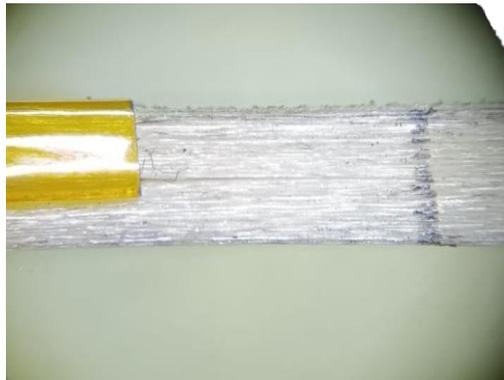
**Figura 14.** Finalización de la impresión de la probeta conforme normativa.

- 8) Después de finalizar la impresión de la muestra de fibra de vidrio, se debe retirar la plataforma de la impresora 3D con el uso de una espátula adecuada.
- 9) Una vez completada la impresión de las muestras de fibra de vidrio, continuamos al corte utilizando la máquina SMARCSHOP modelo LASERIEEX. Este método se selecciona porque los cortes realizados con CNC o discos de carburo de tungsteno afectaban la estructura de las probetas y alteraban sus propiedades mecánicas.



**Figura 15.** Corte con láser de la probeta impresa conforme medidas del ensayo.

- 10) Se procede a visualizar y marcar la grieta utilizando un estereomicroscopio BOECO, modelo BSZ-405.



**Figura 16.** Marcado de la grieta mediante observación en estereomicroscopio.

- 11) Una vez finalizada la producción, las muestras deben guardarse en una caja de humedad de la marca Markforged® para evitar su exposición a la humedad y al polvo. Si no se realiza este paso, las propiedades mecánicas podrían verse afectadas, lo que impactaría directamente en los resultados de los ensayos.

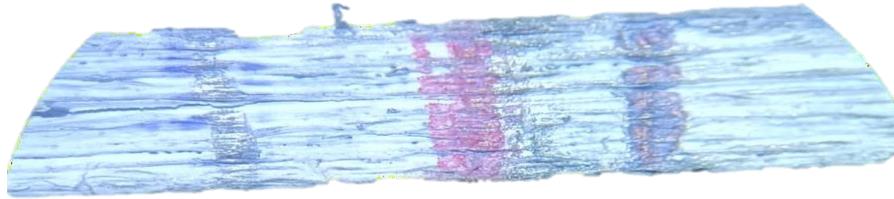


**Figura 17.** Dry Box con bolsas desecantes para capturar humedad.

### **6.3. Preparación de ensayos.**

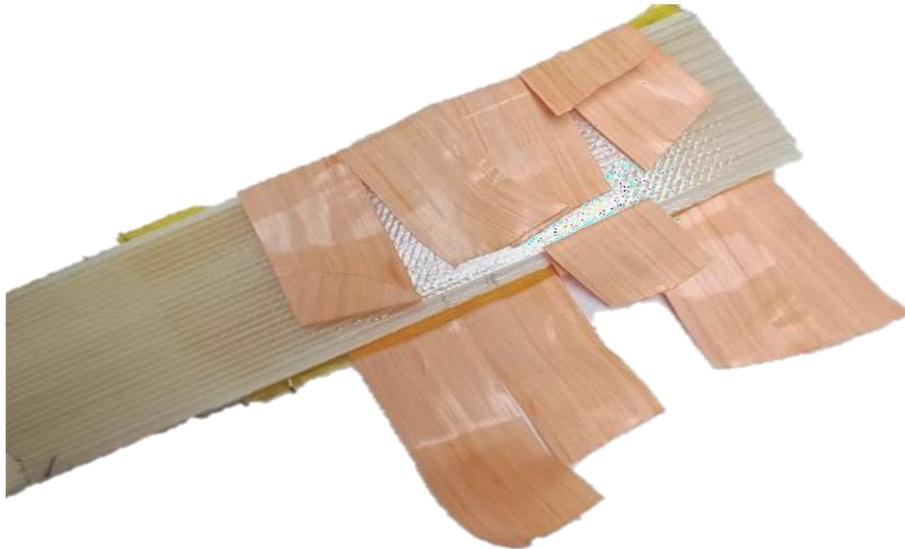
Para preparar las muestras destinadas al ensayo de fractura en modo I, es esencial seguir un proceso preciso que garantice la consistencia y fiabilidad de los resultados obtenidos. Después, se presentará una explicación detallada y paso a paso de cómo se realiza este ensayo de fractura en modo I:

- 1) El proceso inicia identificando el punto de la grieta previamente marcado, para lo cual se pinta de blanco la zona afectada, facilitando su visualización. A continuación, se dibuja una línea roja a 3 mm de este punto y una línea negra a 5 mm. Este proceso facilita una observación más precisa de la pre-grieta durante el ensayo, tal como se ilustra en la imagen obtenida mediante microscopía óptica.



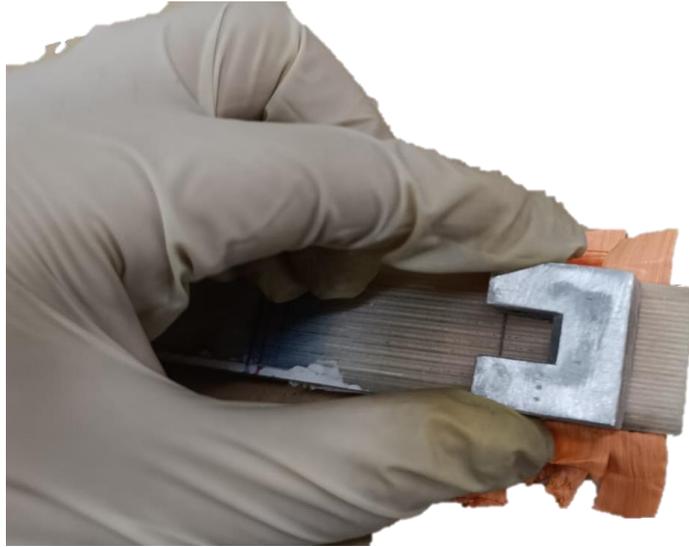
**Figura 18.** Posicionamiento de la pre-grieta y señalización con líneas verticales de dos colores.

- 2) El siguiente paso es colocar teflón industrial entre las separaciones de los brazos de la viga de la probeta. Esta acción se realiza para evitar que las capas se peguen entre sí durante el proceso de adhesión, lo cual podría comprometer la validez de los resultados del ensayo.



**Figura 19.** Colocación del teflón industrial entre los brazos de viga la probeta.

- 3) A continuación, se ensamblan los bloques de carga utilizando el adhesivo Loctite® Super Bonder Flex Gel, colocándolos a una distancia de 50 mm del punto de la grieta previamente marcado.



**Figura 20.** Pegado de los bloques de carga en aluminio.

- 4) Después de que las piezas de aluminio se fijan a la probeta, se deben dejar secar durante un periodo de 24 horas bajo presión, utilizando una prensa manual para sujeción. Este paso es crucial para garantizar una adhesión efectiva y evitar que las partes se separen durante las pruebas posteriores.



**Figura 21.** Prensa manual durante el proceso de curado del pegamento.

- 5) Luego, se ajusta la máquina universal de ensayos SHIMADZU AGS-X Series, con celdas de 20kN, para realizar la prueba de pre-fractura mediante apertura controlada.



**Figura 22.** Máquina de ensayos universal.

- 6) A continuación, se coloca la probeta ya preparada en la máquina de ensayos universal para llevar a cabo la prueba.



**Figura 23.** Ensayo de pre-fractura a apertura controlado.

- 7) Con el uso de una cámara profesional Nikon™, modelo D7500, equipada con un lente micro AF-S de alta resolución, es posible realizar una inspección minuciosa para localizar con precisión la grieta y asegurarse de que haya llegado a la línea roja, la cual indica el término del ensayo.



**Figura 24.** Cámara profesional Nikon™ captando el avance del frente de grieta durante el ensayo.

- 8) Al finalizar el ensayo de pre-fractura, se emplean unas entenallas de mesa para deshacer las uniones de las piezas de aluminio con la probeta, lo que facilita el paso al siguiente ensayo.
- 9) Después de retirar los componentes de aluminio del sistema de transmisión de carga se emplean para inspeccionar la muestra con un estereomicroscopio, con el objetivo de analizar el desarrollo de la pre-grieta y marcar su propagación.



**Figura 25.** Marcando del alcance de la pre-grieta mediante observación óptica.

Después de que las muestras han sido preparadas con la pre-grieta, se someten a un análisis mediante equipos especializados que aplican cargas de manera controlada. En este procedimiento, se monitoriza cuidadosamente tanto la carga aplicada como el avance de la grieta, con el objetivo de estudiar las propiedades de tenacidad a la fractura multidireccional en modo I del material compuesto de fibra de vidrio. Este enfoque minucioso y riguroso garantiza que los resultados obtenidos sean válidos y útiles para analizar correctamente el rendimiento mecánico del material bajo situaciones de carga específicas. Ahora se detallan los procedimientos para llevar a cabo el ensayo por apertura:

- 1) Para iniciar el procedimiento, la probeta debe ser colocada en el aparato de agarre de la máquina de ensayos, donde se prepara para aplicar la fuerza de apertura (Figura 23).
- 2) A continuación, se configuran las condiciones de carga del equipo, tales como la velocidad de deformación y el rango de fuerza que se ejercerá sobre la muestra de fibra de vidrio continua. En este caso, se establece un rango de carga que cumple con los parámetros establecidos en la norma correspondiente al ensayo. (EN 6033, 2015).
- 3) A continuación, se aplica una carga de apertura controlada a la muestra a una velocidad constante, mientras se registran tanto las fuerzas aplicadas como las deformaciones generadas durante el proceso.
- 4) Cuando la gráfica de fuerza/apertura (N/mm) deje de presentar un aumento lineal, se considera que el ensayo ha concluido. Seguidamente, se desmonta la probeta y se guarda en la Drybox para prevenir su exposición a la humedad o al

polvo, garantizando su conservación para un análisis posterior en el SEM.

#### **6.4. Reducción numérica de datos experimentales**

La reducción numérica de los datos generados durante el ensayo de fractura en modo I juega un papel crucial en el análisis detallado del comportamiento mecánico de los materiales sometidos a cargas críticas. En la prueba de fractura por apertura en el plano, se analiza y mide cómo se extiende la grieta en el material bajo cargas determinadas, lo que ofrece datos precisos sobre su resistencia y tenacidad frente a la fractura.

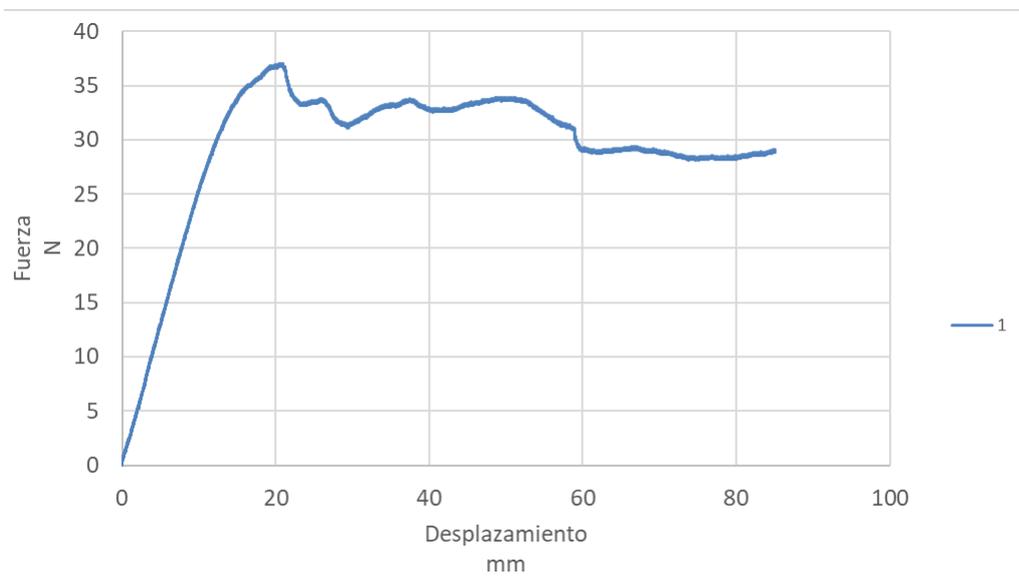
El empleo de técnicas numéricas facilita la simulación y modelado del proceso de fractura, lo cual es esencial para el diseño de componentes estructurales más seguros y eficientes. Al comprender cómo factores clave, como la energía absorbida y la propagación de la pre-grieta, se comportan durante el proceso de fractura, es posible mejorar el diseño de materiales y estructuras, aumentando su resistencia y longevidad. Esto no solo disminuye los costos al reducir la necesidad de realizar ensayos físicos, sino que también proporciona una evaluación más exhaustiva y exacta del comportamiento del material.

Asimismo, la reducción numérica de los datos permite llevar a cabo comparaciones objetivas entre distintos materiales y configuraciones de diseño, identificando los que ofrecen un mejor desempeño en términos de resistencia a la fractura en modo I. En conclusión, este enfoque numérico representa un avance importante en el desarrollo de materiales de alto rendimiento y en la creación de estructuras más confiables y seguras para diversas aplicaciones industriales.

A continuación, se describe de manera concisa el procedimiento realizado para la

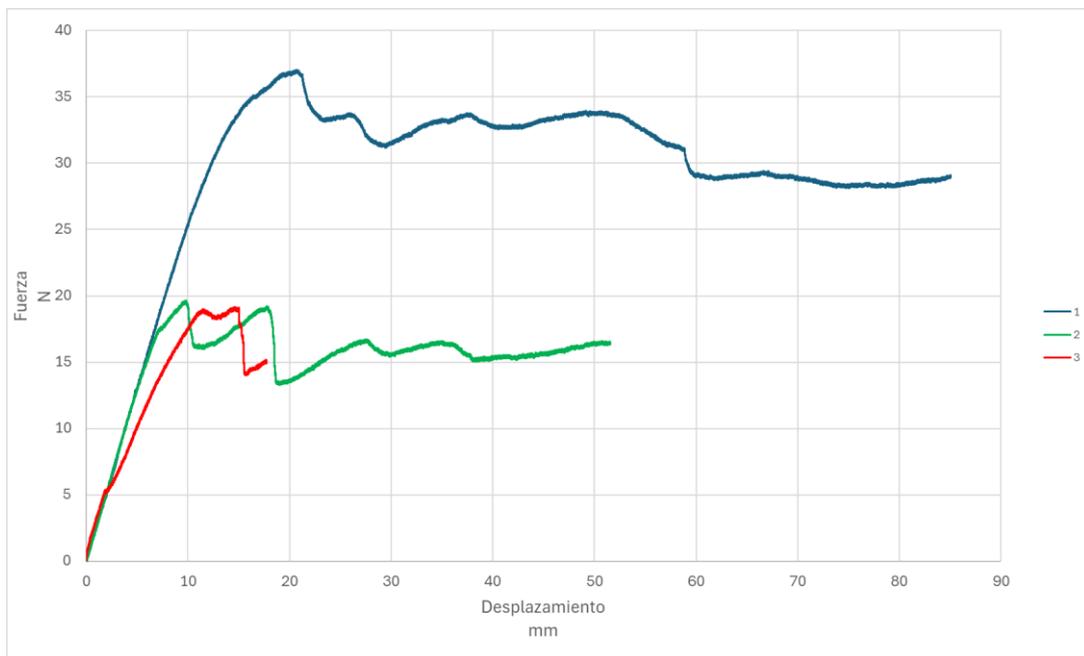
reducción numérica:

- 1) A lo largo del ensayo, el sistema informático realiza un seguimiento exhaustivo de los datos relacionados con la fuerza aplicada y la apertura lateral observada en la probeta. Al terminar el ensayo, se crea un reporte con detalles junto con un archivo en Microsoft Office Excel™ que incluye toda la información recopilada, ofreciendo un registro completo de los datos obtenidos durante el ensayo, como se muestra en los anexos.
- 2) A partir de los datos recopilados, se procede a generar el gráfico de fuerza/apertura (N/mm), proporcionando una representación más clara y precisa de los resultados obtenidos en el ensayo. Este gráfico facilita el análisis y la interpretación de los comportamientos observados en la probeta durante el transcurso de la prueba.



**Figura 26.** Gráfica fuerza/apertura (N/mm) de una muestra ensayada.

3) Finalmente, se lleva a cabo un análisis interpretativo de los resultados mediante una comparación de las gráficas generadas para cada probeta, junto con la carga máxima que resistieron. Este análisis brinda una comprensión más profunda del comportamiento del material de fibra de vidrio en los ensayos de tenacidad a la fractura multidireccional en modo I, permitiendo evaluar cómo estos resultados pueden influir en su aplicación práctica en estructuras reforzadas.



**Figura 27.** Compendio de gráficas fuerza/apertura de las 3 probetas ensayadas.

Los resultados de la interpretación de la fuerza máxima reportada en el ensayo se indican en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Fuerzas máximas del lote de probetas ensayadas.

Probeta	Máxima (N)
1	36,69
2	19.26
3	18.86

## 6.5. Reducción estadística de datos representativos

El proceso de reducción de datos en Excel™ consiste en una serie de pasos fundamentales para transformar los datos brutos del experimento en información precisa y útil. Primero, se importan los registros provenientes de la máquina de ensayos universal, los cuales contienen información sobre la fuerza aplicada, la deformación de la muestra y el tiempo transcurrido durante la prueba.

Una vez importados, los datos de tiempo, apertura y fuerza se trasladan a la hoja de trabajo diseñada para el análisis. Luego, se identifica la fuerza máxima aplicada a lo largo del ensayo utilizando las funciones de Excel™ para localizar con exactitud su valor. Posteriormente, se mide el ancho de cada probeta con un calibrador, lo que permite calcular su resistencia a la fractura. Finalmente, a partir de los tres ensayos realizados, se obtiene un valor promedio de la tenacidad a la fractura en modo I,  $G_{IC}$ , el cual se utiliza para determinar la resistencia a la fractura del material de fibra continua de vidrio. Las mediciones realizadas con el calibrador se promedian para obtener un valor más representativo.

Tabla 2. Medidas de la probeta

<b>Medidas finales de la probeta</b>			
Ancho 1 (mm)	24,43	Espesor 1 (mm)	3,43
Ancho 2 (mm)	24,46	Espesor 2 (mm)	3,37
Ancho 3 (mm)	24,53	Espesor 3 (mm)	3,41
<b>Promedio (mm)</b>	24,47	<b>Promedio (mm)</b>	3,40

I. Usando los datos obtenidos, determinamos de la resistencia a la fractura del compuesto

reforzado con fibra de vidrio continua, utilizando los datos obtenidos del experimento. Este cálculo permite evaluar la capacidad del material para impedir la propagación de la grieta bajo condiciones de carga definidas.

Tabla 3. Cálculo de la  $G_{IC}$

Parámetros de reducción de datos	
Fuerza máxima (N)	36,69
Apertura máximo (mm)	8,30
Longitud grieta (mm)	33
Longitud (mm)	98
$G_{IC}$ (J/m <sup>2</sup> )	1253,18

### 6.6. Análisis de la superficie de fractura de la probeta en el SEM.

En el análisis de la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura multidireccional en modo I de la fibra continua de vidrio, la utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM) proporciona diversas ventajas y beneficios clave:

- **Análisis microestructural:** el SEM proporciona una visión detallada de la microestructura de las muestras de fibra de vidrio, con una resolución elevada que permite identificar aspectos sutiles de la superficie, la morfología de las fibras y su disposición y orientación dentro de la matriz polimérica. Esta información es clave para entender cómo las características microestructurales afectan las propiedades mecánicas y el desempeño de las muestras bajo carga.
- **Identificación de defectos y mecanismos de fractura:** Tras los ensayos de fractura, el SEM ofrece la posibilidad de inspeccionar las superficies fracturadas

con un alto grado de detalle, permitiendo detectar defectos, delaminaciones, microgrietas y otros mecanismos de fallo. Este análisis detallado facilita la correlación entre los datos obtenidos de las pruebas y los mecanismos de fractura identificados ofrecen una visión más detallada de los procesos que conducen a la ruptura en las muestras reforzadas con fibra de vidrio.

- **Validación de resultados experimentales:** el análisis con SEM proporciona una validación y un complemento a los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, ya que, al examinar las características superficiales y las fracturas interlaminares a nivel microscópico, se puede verificar la presencia de fenómenos particulares que influyen en la resistencia a la fractura. Este enfoque fortalece la validez y fiabilidad de las conclusiones y sugerencias sobre la aplicación de fibra de vidrio en la mejora de estructuras históricas.

En resumen, el SEM se presenta como una herramienta esencial en esta investigación, permitiendo un análisis minucioso de las muestras y una comprensión profunda de los comportamientos estructurales y los mecanismos de fallo a nivel microestructural. Este enfoque es clave para el éxito del estudio y para la aplicabilidad de los resultados obtenidos. A continuación, se detallan de manera breve los pasos necesarios para utilizar el SEM:

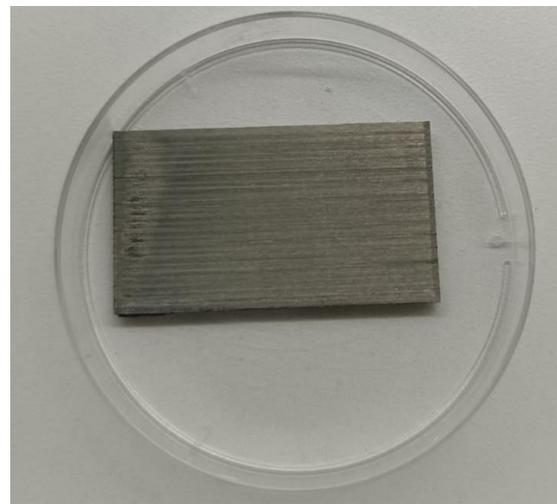
- 1) El proceso comienza con la fragmentación de la superficie de las muestras ensayadas, iniciando desde los 10 mm de la pre-grieta, para observar tanto la mecánica de fallo como la morfología de la fractura, sin modificar las condiciones originales del ensayo. También es necesario tener en cuenta el tamaño de la muestra en el portaobjetos del equipo SEM. Para realizar este

procedimiento, es crucial usar guantes de látex al manipular la probeta, para prevenir cualquier tipo de contaminación.

- 2) Después de cortar la probeta, se aplica un recubrimiento de oro utilizando el equipo Cressington Sputter Coater modelo 108 Auto. Este proceso mejora la conductividad eléctrica de la probeta, favoreciendo el movimiento de electrones durante el análisis. Esta fase es crucial para lograr una visualización clara y detallada en el SEM.



a)

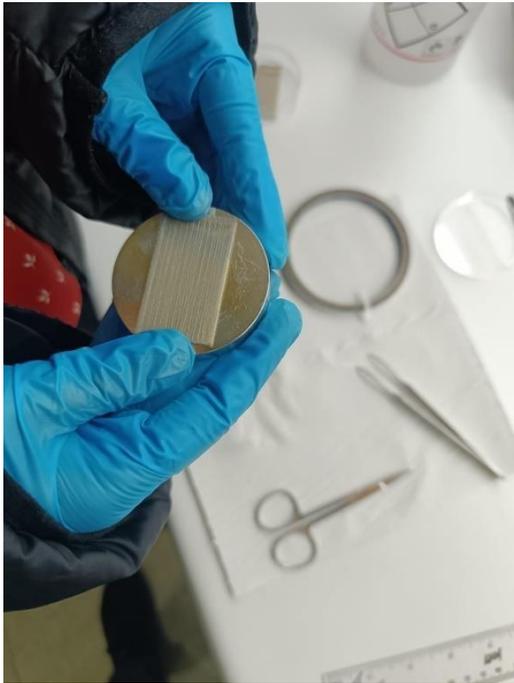


b)

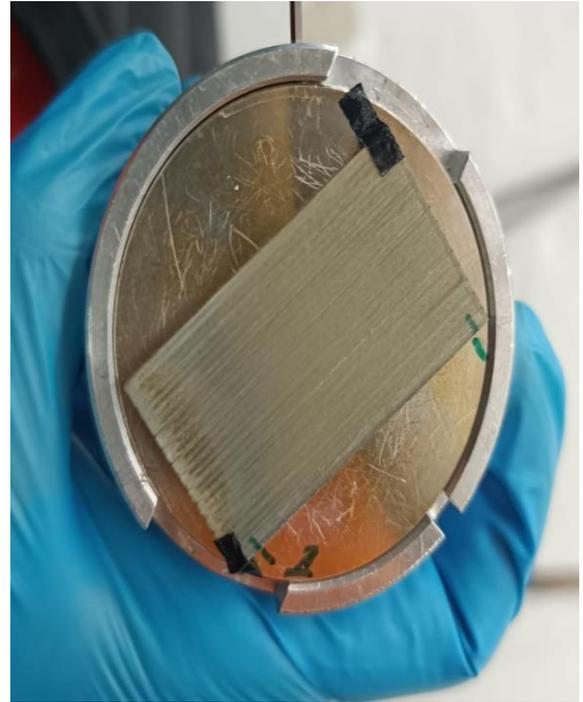
**Figura 28.** Recubrimiento de oro a la probeta

a) Máquina de recubrimiento de oro y b) Probeta recubierta de oro

- 3) El siguiente paso consiste en colocar la probeta recubierta de oro en el porta muestras del SEM, utilizando cinta de carbono. Este procedimiento garantiza una conexión eléctrica adecuada entre la probeta y el porta muestras, asegurando que la muestra esté correctamente posicionada y sujeta durante el análisis en el SEM.



a)



b)

**Figura 29.** Ensamblaje de la muestra

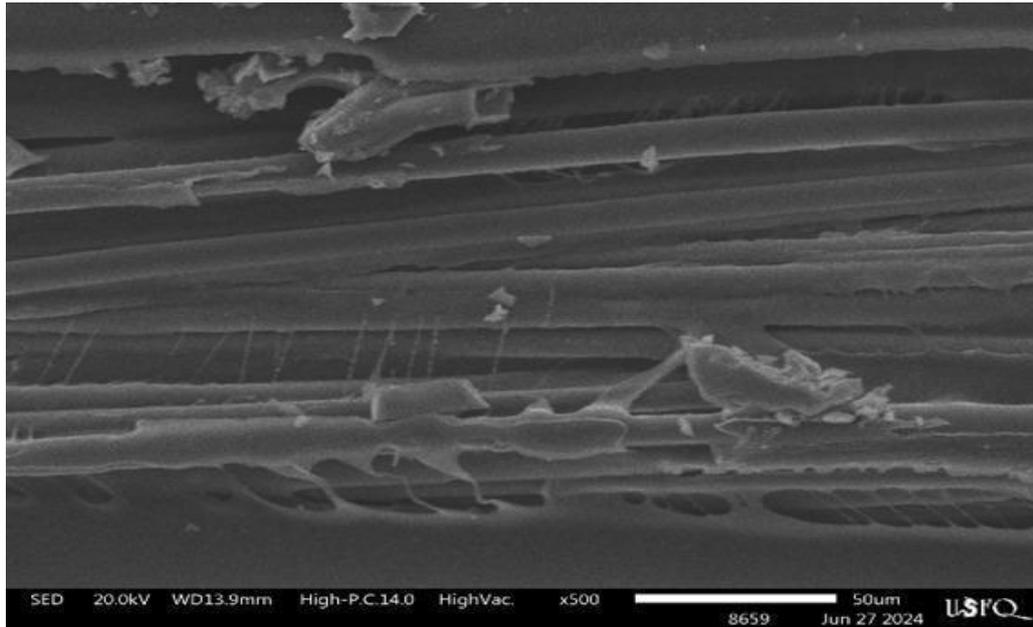
a) Colocación de la cinta de carbono y b) Probeta montada en el porta muestras

- 4) Una vez que la muestra está montada, se coloca en el SEM. Para realizar el análisis, se ajusta el microscopio a un aumento de 500x y se lleva a cabo el deslizamiento de fibras en la muestra.



**Figura 30.** SEM marca Jeol, modelo IT300

- 5) El proceso de búsqueda de deslizamientos de fibras es extenso y detallado. Es importante considerar que, durante esta búsqueda, la máquina puede desenfocarse en varias ocasiones. Por ello, es fundamental mantener calibrado el joystick de enfoque del SEM para realizar ajustes rápidos y asegurar una imagen clara durante el análisis.
- 6) Cuando se identifica un área con deslizamiento de fibras, se ajusta el enfoque, se anotan las coordenadas exactas del lugar y se toma una fotografía detallada de la falla para su posterior evaluación.



**Figura 31.** Captura de la superficie de fractura mediante SEM a x500 de magnificación.

- 7) Tras localizar la zona de deslizamiento de fibras, se ajusta el SEM a un aumento de 20x y se captura una imagen más precisa de la región afectada por la falla. Se utilizan ambas pantallas del sistema para llevar a cabo un análisis más profundo.



**Figura 32.** Foto de la zona de fractura de la muestra mediante SEM a x20 de amplificación.

- 8) Finalmente, una vez que se han capturado todas las imágenes necesarias para el análisis, se retira la muestra del SEM. Se desmonta con delicadeza y se coloca

en un recipiente plástico, que posteriormente se guarda en un desecador. Este proceso asegura que la muestra se conserve en un ambiente fresco y completamente libre de humedad.

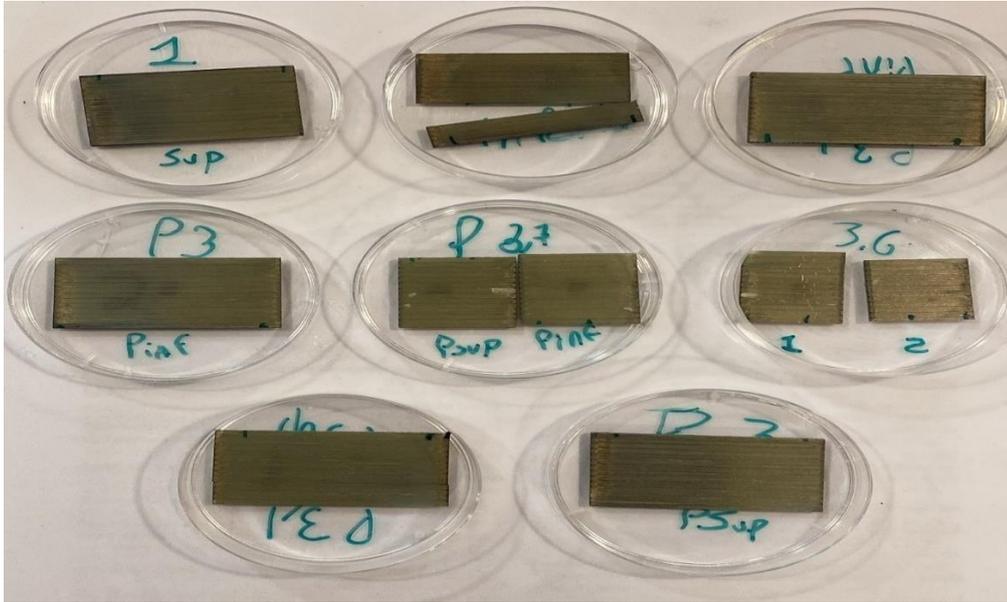


Figura 33. Muestras guardadas en el desecador.

## 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 6.3. Análisis de las gráficas de fuerza apertura

El gráfico que muestra la relación entre la fuerza y la apertura para las tres probetas ensayadas proporciona una visión clara del comportamiento de la fibra de vidrio bajo tensiones de apertura. A continuación, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de cada curva, evaluando el efecto de la carga máxima que cada probeta soportó en la caracterización mecánica de la fibra de vidrio en modo I, como se detalla en la Figura 39.

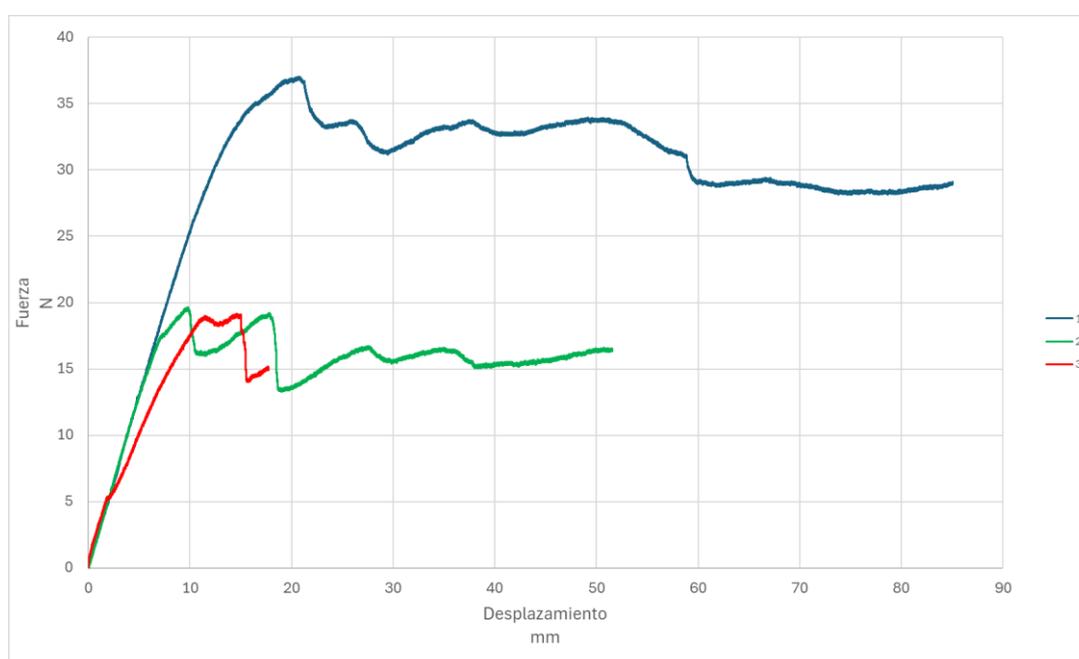


Figura 34. Gráfica fuerza/apertura (N/mm) del lote de probetas ensayadas.

#### Análisis del comportamiento individual de las curvas:

En el caso de la Probeta 1, se observa que alcanza una carga máxima de aproximadamente 36 N, con una apertura máxima cercana a los 10 mm. Este comportamiento, inicialmente lineal y seguido por una disminución gradual en la pendiente, sugiere que la fibra de vidrio tiene una excelente capacidad para resistir la propagación de la grieta antes de que su resistencia disminuya considerablemente.

Por otro lado, la Probeta 2 presenta una carga máxima de alrededor de 19 N, con una apertura máxima de aproximadamente 9 mm.

La Probeta 3 alcanza una carga máxima de aproximadamente 18 N y una apertura máxima cercana a los 11 mm. Las diferencias en la carga máxima entre las tres probetas pueden atribuirse a variaciones en la microestructura o la calidad del material utilizado en cada una.

#### **Resistencia a la apertura:**

- Las probetas que tuvieron resultados con mayor fuerza resistida tuvieron una mejor reacción a la fuerza de apertura vertical, sugiriendo una mejor interconexión entre las fibras y una transferencia eficiente de carga.
- Por el contrario, las probetas con cargas máximas más bajas (2 y 3) muestran una resistencia disminuida, posiblemente debido a una menor calidad en la adhesión entre las fibras o a la presencia de defectos estructurales que comprometen la integridad del material, pero la pendiente de las 3 muestras escogidas presenta una proyección similar.

#### **Calidad del enlace interfacial de fibras:**

Las diferencias en la resistencia máxima y el comportamiento no lineal después de alcanzar la carga máxima podrían estar relacionadas con la calidad de la unión entre las fibras. Aquellas probetas que presentan una mejor adhesión entre las fibras son capaces de soportar cargas más altas y ofrecer mayor resistencia ante las cargas de apertura.

Al combinar los datos obtenidos de las gráficas de fuerza/apertura con las observaciones del SEM, se puede obtener una comprensión más profunda y precisa de las características

mecánicas de la fibra de vidrio en modo I. Las probetas que alcanzan mayores cargas y aperturas máximas evidencian una mayor capacidad para resistir la propagación de grietas, además de mostrar una adecuada ductilidad. Esto sugiere que tienen una microestructura más robusta y una excelente adhesión entre las fibras. Por el contrario, las probetas que presentan menores resistencias y aperturas máximas probablemente reflejan la presencia de defectos o una interacción deficiente entre las fibras, lo que resulta en un comportamiento más frágil cuando se les aplica carga de apertura.

Estos resultados destacan la relevancia de optimizar tanto la calidad de los materiales utilizados como los procesos de fabricación para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos de fibra de vidrio. Esta mejora no solo favorece la resistencia a la fractura, sino también la durabilidad y confiabilidad de los materiales en aplicaciones estructurales exigentes.

## **7.2. Análisis de las cargas máximas**

La Tabla 1 muestra la carga máxima que cada muestra de fibra de vidrio pudo resistir durante el ensayo de apertura.

Esta tabla ofrece una perspectiva cuantitativa sobre la resistencia a la apertura de las probetas de fibra de vidrio, permitiendo observar las variaciones entre las diferentes muestras. La notable variabilidad resalta la relevancia de la calidad del material y del proceso de fabricación en la evaluación mecánica del compuesto. Los resultados obtenidos, junto con las observaciones del SEM y los gráficos de fuerza/desplazamiento, ofrecen una comprensión completa del comportamiento mecánico de la fibra de vidrio en modo I. Esto resalta áreas clave para la mejora y optimización del material, lo cual es

crucial para mejorar su rendimiento en aplicaciones estructurales.

### **7.3. Análisis de los resultados del SEM**

#### **Análisis zona 1**

##### **1) Deslizamiento de fibras**

La imagen revela cómo el material compuesto experimenta un comportamiento mecánico que pone en evidencia la separación y desalineación de las fibras dentro de la matriz polimérica. Esto sugiere que hay un desplazamiento significativo entre las fibras y la matriz. Este deslizamiento ocurre cuando la carga aplicada supera la capacidad de adhesión entre ambos componentes, lo que favorece la propagación de microgrietas y aumenta la fricción interlaminar. Las superficies rugosas y fracturadas que se observan en la imagen actúan como indicadores claros de este deslizamiento y de las microfracturas generadas durante la prueba.

Este deslizamiento de las fibras desempeña un rol crucial en la disipación de energía, lo que a su vez contribuye a incrementar la tenacidad a la fractura del material, ya que absorbe la energía que de otro modo podría resultar en una fractura catastrófica. Sin embargo, un deslizamiento excesivo puede poner en riesgo la estabilidad estructural del material. La calidad de la interfase y la resistencia de la unión entre la matriz y las fibras son aspectos fundamentales para controlar este deslizamiento y evitar efectos perjudiciales en las propiedades mecánicas del material.

Gracias al análisis detallado de las imágenes obtenidas a través del SEM, es posible evaluar la efectividad de la interfase en la transferencia de cargas y cómo el material compuesto responde ante la propagación de grietas bajo carga en modo I. El entendimiento

y la cuantificación del deslizamiento de las fibras son esenciales para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos de fibra de vidrio. Los resultados obtenidos con el SEM proporcionan información crítica que puede utilizarse para optimizar tanto el diseño como el proceso de fabricación, así como la selección de materiales, con el objetivo de mejorar la tenacidad a la fractura y la durabilidad de las estructuras reforzadas con fibra de vidrio.

## **2) Fragmentación y rotura de fibras:**

Las fracturas y rupturas de las fibras vistas en la micrografía SEM de las probetas de fibra de vidrio sometidas a un ensayo de apertura en modo I brindan información esencial sobre el comportamiento del material bajo estrés intenso. Las imágenes revelan fibras que han sufrido rupturas, lo que indica que las cargas aplicadas durante la prueba excedieron la resistencia máxima de las fibras. Este tipo de fallo es típico en los materiales compuestos expuestos a aperturas elevadas, mostrando vulnerabilidades tanto en la matriz como en la interfaz entre la fibra y la matriz, que es donde ocurre la transmisión de cargas.

La ruptura de las fibras puede funcionar como un mecanismo que disipa energía, generando nuevas superficies fracturadas, lo que aumenta la tenacidad del material. Sin embargo, cuando las fracturas son excesivas y múltiples fibras se rompen, se observa una significativa pérdida de capacidad de carga y un deterioro de la integridad estructural del compuesto. Este fallo es generalmente catastrófico, pues la carga no puede distribuirse de manera efectiva entre las fibras restantes, lo que lleva a una ruptura rápida y potencialmente destructiva del material.

El examen minucioso de las rupturas de las fibras en las imágenes SEM es crucial para entender los mecanismos de fallo y mejorar las características del material compuesto. Esta

información es útil para optimizar tanto el diseño como los procesos de fabricación, con el fin de mejorar la resistencia a la fractura y la durabilidad de las estructuras reforzadas con fibra de vidrio. Además, identificar las zonas específicas donde ocurren estos fallos puede guiar el desarrollo de tratamientos superficiales y mejoras en la interfaz fibra-matriz, aumentando así la capacidad del material para soportar cargas en aplicaciones estructurales exigentes.

Por último, la delaminación observada podría haber facilitado la apertura de las fibras, ya que una interfaz débil permite el movimiento relativo entre la fibra y la matriz, lo que aumenta la probabilidad de fractura.

### **3) Interpretación de resultados**

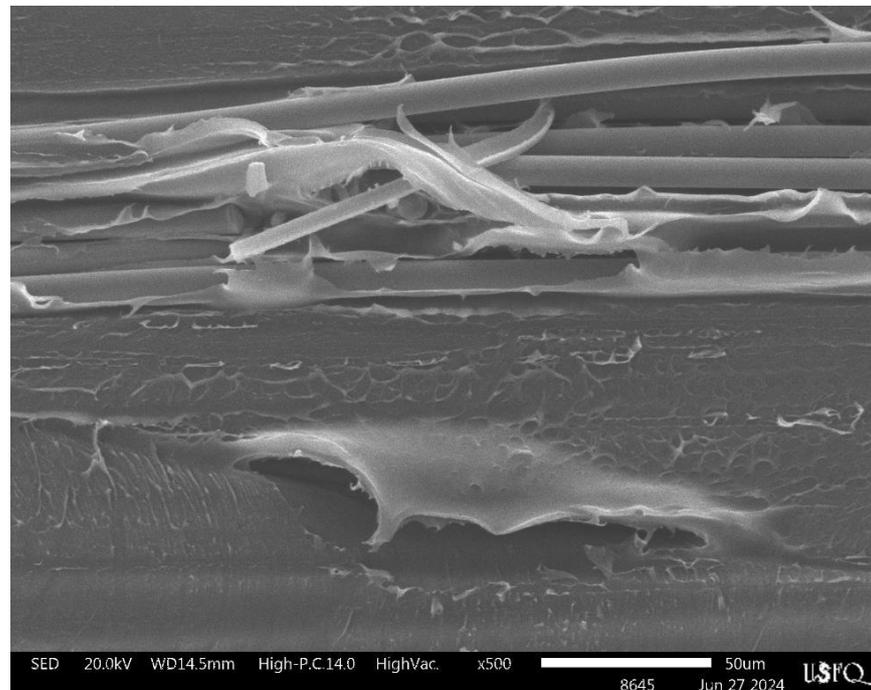
El material fue sometido a importantes esfuerzos de apertura, lo que provocó la separación y el movimiento relativo de las fibras. Identificar con precisión las áreas de apertura es crucial, ya que resalta la habilidad del material para disipar energía y redistribuir las tensiones, aspectos esenciales que ayudan a aumentar la resistencia y tenacidad del compuesto.

Además, las fibras fracturadas y las superficies rugosas observadas en la imagen del SEM indican que la fractura no ocurrió de manera uniforme. Estas rupturas probablemente fueron causadas por la acumulación de tensiones en puntos específicos, lo que llevó a la fractura de las fibras de manera individual. La rugosidad visible en las fibras sugiere una interacción compleja entre las fibras y la matriz, en la que la energía de fractura se dispersa a través de mecanismos como la tracción, apertura y separación en la interfaz.

Este análisis es clave para entender la mecánica de fractura del material, lo que facilita el diseño de compuestos más resistentes y duraderos. Al identificar las zonas específicas

donde ocurre la apertura, es posible mejorar los procesos de fabricación y ajustar la composición del material para minimizar defectos y mejorar la integridad estructural del compuesto. La información obtenida también puede servir para desarrollar modelos predictivos que ayuden a anticipar el comportamiento del material bajo distintas condiciones de carga.

En resumen, las imágenes capturadas mediante el SEM no solo proporcionan un análisis exhaustivo de la microestructura del material, sino que también actúan como una herramienta valiosa para optimizar y perfeccionar los compuestos de fibra de vidrio en aplicaciones de ingeniería avanzada.



**Figura 35.** Zona de inspección 1 mediante SEM a x500 de amplificación.

La fibra de vidrio se presenta como una opción destacada para reforzar las estructuras antiguas. Su capacidad para absorber energía mediante mecanismos como el deslizamiento interfacial y la fractura controlada de las fibras muestra un gran potencial para aumentar tanto la resistencia como la flexibilidad de los edificios existentes. Las micrografías

obtenidas con SEM muestran una interacción compleja entre las fibras y la matriz, indicando que el material es capaz de resistir cargas sísmicas al disipar energía de forma eficiente y redistribuir los esfuerzos. Estos factores son clave para reducir los daños durante eventos sísmicos.

Además, su resistencia a la fractura bajo condiciones extremas de carga y su comportamiento predecible ante distintos modos de fractura refuerzan su idoneidad para la restauración y el fortalecimiento de las estructuras en esta zona patrimonial. La fibra de vidrio no solo mejora la integridad estructural, sino que también ofrece una solución eficaz para preservar edificaciones antiguas o históricas, asegurando la seguridad y durabilidad a largo plazo de las edificaciones históricas.

## **Análisis visual de la zona 2**

### **Presencia de fisuras y daños superficiales:**

Se observan grietas y deterioros en la superficie de las fibras, lo que sugiere que el material ha sufrido fracturas parciales debido a la concentración de tensiones en áreas específicas. Las irregularidades visibles, junto con las partículas adheridas a las fibras, podrían ser fragmentos de material que se desprendieron durante el ensayo, indicando que la carga aplicada superó la capacidad de resistencia del material en esos puntos, favoreciendo la propagación de fisuras. Este comportamiento resalta la importancia de evaluar la distribución de tensiones y la calidad de las interfaces en los materiales compuestos para mejorar su desempeño bajo condiciones de carga.

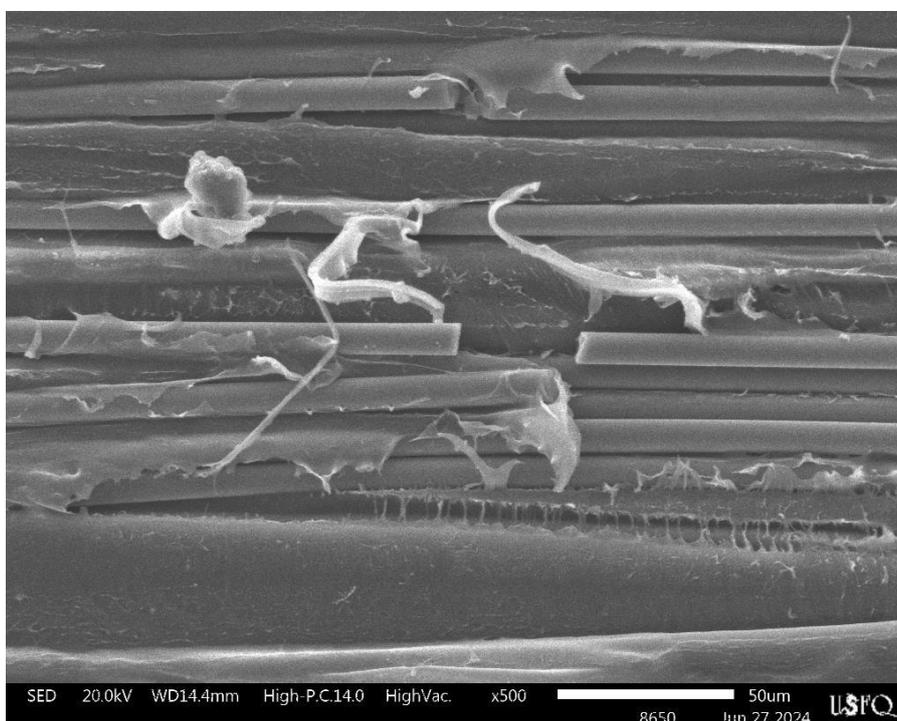
### **Interacciones de fibras:**

La conexión entre fibras adyacentes desempeña un papel fundamental en la transferencia de carga en materiales compuestos. En este contexto, la imagen muestra cómo estas fibras se relacionan entre

sí, afectando directamente la resistencia y el desempeño general del material.

### **Calidad del enlace interfacial de fibras:**

Para evaluar adecuadamente el desempeño mecánico del material compuesto, es fundamental examinar la calidad del enlace entre las fibras. Una mayor resistencia a la apertura y una transferencia de carga más eficiente dependen de una unión fuerte entre las fibras y la matriz, lo que mejora la resistencia del material y su capacidad para resistir cargas elevadas sin fallos catastróficos.



**Figura 36.** Zona de inspección 2 mediante SEM a x500 de amplificación.

El análisis de la microestructura destaca que la calidad de la unión entre las fibras, influenciada por su grado de adherencia y separación, es fundamental para la efectividad del material en aplicaciones estructurales. Los resultados resaltan no solo la relevancia de una adhesión interfacial adecuada para mejorar la resistencia a la apertura, sino también la necesidad de optimizar la matriz y los procesos de fabricación para minimizar defectos y

maximizar la transferencia de carga. En resumen, estos hallazgos evidencian la complejidad del comportamiento mecánico de la fibra de vidrio y ofrecen pautas importantes para mejorar el diseño y la fabricación de materiales compuestos más eficientes y resistentes.

## 8. CONCLUSIONES

Se fabricó especímenes de fibra de vidrio cumpliendo con todo el procedimiento establecido a través de las herramientas utilizadas en este proceso de investigación, se logró realizar y ensayar con éxito 5 especímenes los cuales 3 presentaron resultados positivos concluyentes, mientras que de las otras 2 probetas obtuvimos datos dispersos en el respectivo ensayo.

A través de los especímenes ensayados fue posible obtener como resultado las fuerzas máximas que puede llegar a tener el material, lo cual fue de 36 N, lo que permite concluir que este material si es apropiado para refuerzos estructurales por su capacidad de resistencia y flexibilidad.

El comportamiento morfológico superficial presento cierta separación entre las fibras y el desgarramiento de estas, sugiriendo una transferencia de carga eficiente durante el proceso de degradación del material a lo largo del ensayo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Belouar, A., et al. (2013). Structural performance of square concrete columns wrapped with CFRP sheets. Elsevier, 54, 9.

Katalagarianakis, A., et al. (2023). Mode I, mode II and mixed mode I-II delamination of carbon fibre-reinforced polyamide composites 3D-printed by material extrusion. Elsevier, 173, 107655.

Caicedo, C., et al. (2017). Propiedades termo-mecánicas del polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento. Dialnet, 18(3), 8.

Díaz, D., et al. (2015). Comportamiento mecánico de fibras henequén cubano e interfase con polímeros termoplásticos del tipo poliolefina. Scielo, 18(3), 157.

Santos, J., et al. (2023). Análisis numérico y experimental de la tenacidad a la fractura interlaminar modo I en composites termoplásticos multidireccionales impresos en 3D reforzados con fibra de carbono continua. Polymers, 15(10), 27.

Santos, J., et al. (2023). Experimental characterization and analysis of the in-plane elastic properties and interlaminar fracture toughness of a 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced composite. MPDI, 14(3), Polymers.

Xiang, J., et al. (2023). Interlaminar and translaminar fracture toughness of 3D-printed continuous fiber-reinforced composites. SPE, 45(5), 3883–3900.

Ashby, M., & Jones, D. (2012). Engineering materials 2: An introduction to microstructures, processing and design (International Series on Materials Science and Technology). Pergamon Press.

Balas, D. (2001). Aplicación del método del trabajo esencial de fractura al estudio de films de polipropileno y de copolímeros propileno-etileno en bloques. Universitat Politècnica de Catalunya.

Callister, W., & Rethwisch, D. (2014). Materials science and engineering: An introduction. Wiley.

Callister, W., et al. (2016). Ciencia e ingeniería de los materiales. Cengage Learning.

Groover, M. (2015). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. Wiley.

Hibbeler, R. (2017). Mecánica de materiales. Pearson.

Kuhn, H., & Medlin, D. (2000). ASM Handbook Volume 8: Mechanical testing and evaluation. ASM.

Lipson, H., & Kurman, M. (2013). Fabricated: The new world of 3D printing. Wiley.

Reynoso, S. (2021). Los polímeros plásticos: Los conceptos básicos que debes conocer durante y al salir de la universidad. Sara L Reynoso.

Beer, P., et al. (2020). Mecánica de materiales. McGraw-Hill.

Popov, E. (2000). Mecánica de sólidos. Pearson Educación.

Vázquez, L. (2022). Mecánica de fractura. UAM, Unidad Azcapotzalco.

ASTM. (2017). Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture.

EN 6033. (2015). Aerospace series: Carbon fibre reinforced plastics - Test method - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode II - GIIC. Eesti Standardikeskus.

Agudelo, G. (2021, 16 de junio). El estereomicroscopio y su potente vista 3D. Intekgroup. Recuperado de <https://intekgroup.com.co/el-estereomicroscopio-y-su-potente-vista-3d/>

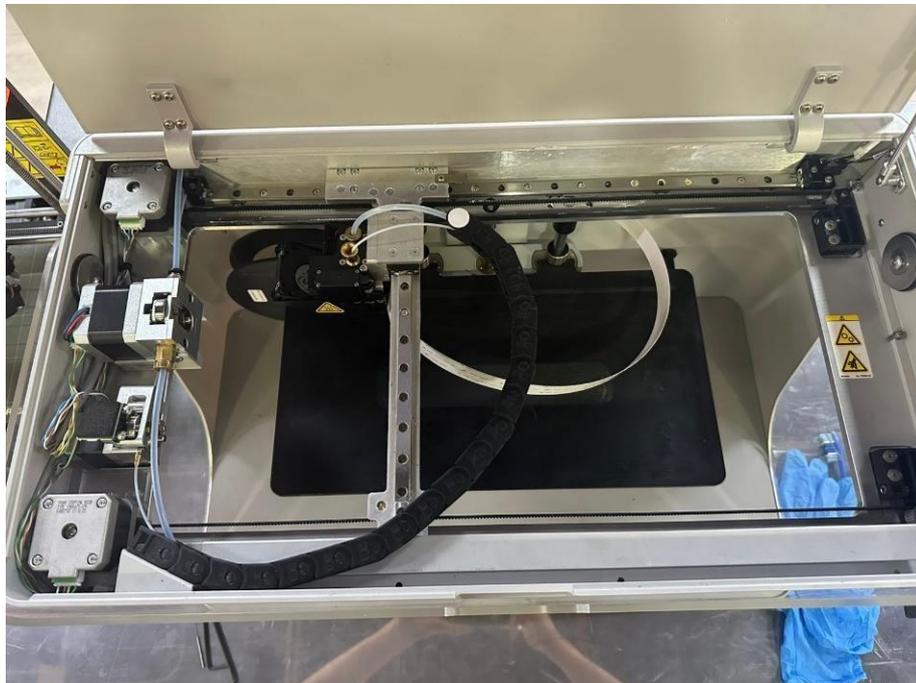
TOOL, A. M. (2023, 23 de julio). Máquina de corte por láser: Una guía completa. ADH Machine Tool. Recuperado de <https://www.adhmt.com/es/cortadora-guia-laser/>

Torres, J. (2020, 3 de enero). La Media Inglesa. Recuperado de <https://lamediainglesa.com/>

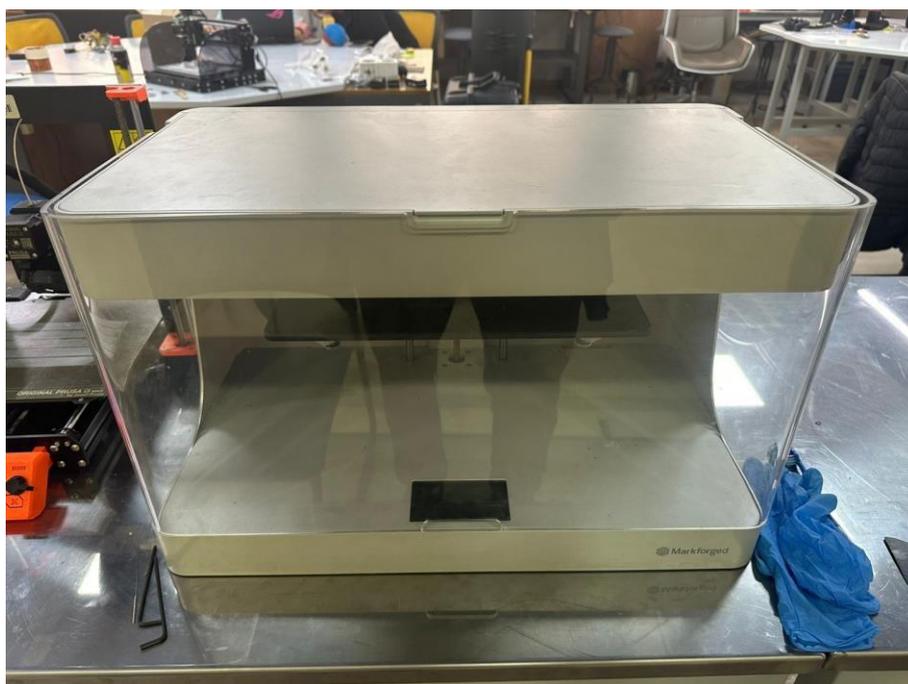
## 10. ANEXOS



10.1. Taladro vertical



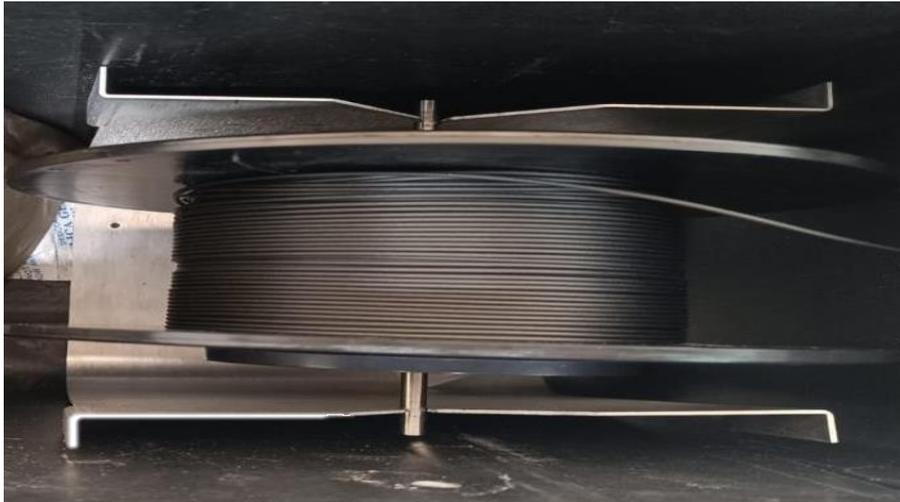
10.2. Impresora 3D vista superior



**10.3.** Impresora 3D vista frontal



**10.4.** Cinta térmica



**10.5.** Filamento de Onix™ dentro de la Drybox



**10.6.** Drybox



**10.7.** Estereomicroscopio



**10.8.** Trípode



10.9. Cámara Nikon™



10.10. Calibrador digital de precisión.



10.11. Entenalla de precisión



10.12. Entenalla de precisión



**10.13.** Probeta colocada en la base del SEM



**10.14.** Rectificadora plana



**10.15.** Equipos de visualización del SEM



**10.16.** Desechado



10.17. SEM