



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

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

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

AUTOR: MATEO NICOLÁS BERREZUETA ARIAS

TUTOR: ING. JONNATHAN DARÍO SANTOS BENÍTEZ, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mateo Nicolás Berrezueta Arias con documento de identificación N° 0107278905, 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, 16 de julio del 2024

Atentamente,



Mateo Nicolás Berrezueta Arias

0107278905

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

Yo, Mateo Nicolás Berrezueta Arias con documento de identificación N° 0107278905, 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 en modo II 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, 16 de julio del 2024

Atentamente,



Mateo Nicolás Berrezueta Arias

0107278905

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 EN MODO II DE MATERIALES ESTRUCTURALES LIGEROS DE INGENIERÍA, realizado por Mateo Nicolás Berrezueta Arias con documento de identificación N° 0107278905, 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, 16 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. Jonnathan Dario Santos Benítez MSc.

0105088058

DEDICATORIA

A mi familia y amigos por haberme apoyado siempre y por haber estado a mi lado. Su amor y respaldo han sido una gran ayuda a lo largo de estos años.

*Agradezco a mi hermano **David** por ser un gran ejemplo y una gran inspiración, a mis primos **Pablo, Juan** y **Josué** por haberme siempre dado su amistad y amor incondicional, a mis primos **Santi** y **Ricky** por hacerme reír con sus ocurrencias y cariño y a mis primos **Juanito** y **Santiago** por su cariño. A mis tíos y a mis abuelitos que me han tratado como un hijo más dando su amor y apoyo desde el día que nací. También agradezco a mis padres por ser un gran ejemplo de amor y trabajo duro*

Gracias a todos por su apoyo a lo largo de los años, a su amor, paciencia y ejemplo para ser mejor cada día.

Mateo Nicolás Berrezueta Arias

AGRADECIMIENTO

Mi familia siempre ha sido mi mayor apoyo, sin ellos no sería quien soy hoy. A mis padres, quienes me criaron de la mejor manera posible, dándome todo su apoyo y amándome incondicionalmente, les agradezco profundamente.

*Mis tíos, **Fausto, Santiago y Santiago** que han sido como unos padres para mí, ellos fueron un apoyo incondicional y un gran ejemplo para mi educación, mis tías, **Fabiola y Diana** con las que siempre conté con su apoyo y cariño.*

*A mis abuelitos, **Flavio, Marlene, Lautaro y Piedad** los cuales me han dado todo su amor y apoyo incondicional sin buscar nada a cambio más que mi felicidad.*

*Mis primos, **Juan mi compadre y hermano del alma, Pablo mi padrino, Josue, Santi, Ricky, Santiago y Juanito mi ahijado**, todos han sido como mis hermanos, siempre han estado a mi lado, ya sea en las buenas o en las malas, todos esos momentos que pasamos juntos han significado mucho para mí, nunca me sentí solo porque ustedes siempre estuvieron cuando los necesite.*

*Quiero agradecer a mi mamá **Catty** por haber sido la madre más amorosa, trabajadora, comprensiva que pude a ver tenido y mi papá **Fabian** que ha sido un ejemplo de trabajo duro y honestidad, gracias por haberme educado con sus valores, porque gracias a ustedes soy como soy, los aprecio demasiado, por su trabajo. Los quiero mucho.*

*También quiero agradecer a mis amigos, **Dennis Ordoñez, Carlos Gomez, Mateo Gordillo, David Garcia, Justin Minchala, Javier Viñanzaca, Samantha Coronel, Johanna Zambrano** y demás amigos que he hecho en estos años. Por todas las risas, tardes de juego, noches de estudio, las salidas, aceptarme como soy y los chistes. cuando la estaba pasando mal ustedes siempre me apoyaron y estuvieron ahí para sacarme una sonrisa.*

*Igualmente quiero agradecer a mi estimado **Fernando Crespo** por haberme ayudado a lo largo del ciclo en el desarrollo de la tesis, he pasado más tiempo contigo este último ciclo que con mi familia, al Ingeniero **Jonnathan Santos** por su apoyo y ayuda, en verdad agradezco su compromiso y amistad cuando lo necesitaba, a **Alexander Torres** por tu apoyo en el proyecto y aunque casi nos peleamos al final lo importante es la amistad y a todos los miembros del grupo de investigación.*

*Agradezco a los ingenieros **David Ochoa** por tu amistad y haberme prestado la impresora, además de ayudarme con un lugar para trabajar en mi tesis, al ingeniero **Mauricio Villacís** por facilitarme el uso del CNC y a los ingenieros **Josué García y Krutskaya Yépez** por cómo me trataron en Quito y su asistencia con el uso del SEM.*

*Para concluir con los agradecimientos quiero dar las gracias a la persona más importante de mi vida, mi hermano **David Berrezueta** la persona que más admiro, quiero y respeto en este mundo.*

Se que la vida no ha sido buena contigo, pero tú siempre respondes con una sonrisa y das el 110% para que las cosas mejoren, no sabes cuanto admiro eso de vos, hasta hoy me sorprende como eres capaz de siempre verle lo positivo a todo, entre esas cosas a mí y pese a que las cosas no salen como planeas nunca te escondes y con una sonrisa sales adelante.

Tu eres mi principal inspiración para seguir adelante y mi motivación para acabar la carrera, siempre que siento que ya no puedo más me acuerdo de ti y de como todos los días luchas y te esfuerzas al máximo contra tu enfermedad, pese al dolor y los malestares que te provoca nunca te quejas y haces lo posible para sacarnos una sonrisa a todos, eres la mejor persona que he conocido, mi admiración y cariño hacia ti no sabes cuan grande es.

Para acabar te quiero mencionar una frase que siempre que la leo me acuerdo de ti “Si aparece el nubarrón de la apatía despéjalo con el sol de tu sonrisa” (Torres, LMI, 2020), nunca pares de sonreír David, te quiero mucho.

Muchas gracias por todo

Mateo Nicolas Berrezueta Arias

RESUMEN

En este estudio se investigará de manera experimental, las propiedades mecánicas y la tenacidad a la fractura interlaminar de un compuesto continuo reforzado con fibra continua de vidrio construido en la impresora 3D Markforged MarkTwo®. El principal problema de investigación es la nula información disponible sobre las propiedades mecánicas de este material. Esto motivo a la realización del presente estudio, para caracterizar de manera experimental la tenacidad a la fractura interlaminar en el ensayo de fractura en el modo II. El proceso para determinar la caracterización de la tenacidad a la fractura interlaminar, para comenzar se realizó la impresión y ensayo de probetas de fibra de vidrio; se compararon los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos del modo de fractura II, proporcionando información valiosa para ulteriores investigaciones y aplicaciones en la industria de la impresión 3D para la fabricación de componentes estructurales.

La presente investigación concluye con el análisis del modo de fallo de la probeta, con la ayuda del microscopio electrónico de barrido SEM (Scanning Electron Microscope, por sus siglas en inglés). Esto permitió analizar la microestructura de fibra de vidrio, observar a detalle el deslizamiento de las fibras y las fracturas interlaminares a nivel microscópico, identificando defectos, delaminaciones y posibles fallos mecánicos observados en la superficie de fractura.

Palabras claves: fibra de vidrio, microscopio electrónico de barrido (SEM), impresora Markforged MarkTwo®, tenacidad a fractura en modo II

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties and interlaminar fracture toughness of a continuous glass fiber reinforced composite built with the Markforged MarkTwo[®] 3D printer will be experimentally investigated. The primary research issue is the lack of available information on the mechanical properties of this material. This prompted the current study to experimentally characterize the interlaminar fracture toughness in Mode II fracture testing. The process to determine the interlaminar fracture toughness characterization began with the printing and testing of glass fiber specimens. The results from Mode II fracture mechanical tests were compared, providing valuable insights for further research and industrial applications in the 3D printing industry for manufacturing structural components. This research concludes with the analysis of specimen failure mode using a Scanning Electron Microscope (SEM). This facilitated the examination of the glass fiber microstructure, detailed observation of fiber sliding, and interlaminar fractures at the microscopic level, identifying defects, delaminations, and potential mechanical failures observed on the fracture surface.

Keywords: glass fiber, scanning electron microscope (SEM), Markforged MarkTwo[®] printer, mode II fracture toughness

ÍNDICE GENERAL

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

6.2.1. Fabricación de las piezas de aluminio	36
6.2.2 Producción de las probetas de fibra continua de vidrio	41
6.3. Preparación de ensayos.....	49
6.4. Reducción numérica de datos experimentales	58
6.5. Reducción estadística de datos representativos	61
6.6. Análisis de la superficie de fractura de la probeta en el SEM	62
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	69
7.1. Análisis de las gráficas de fuerza desplazamiento.....	69
7.2. Análisis de las cargas máximas	71
7.3. Análisis de los resultados del SEM.....	73
7.4. Comparativa con la fibra de carbono	82
8. CONCLUSIONES	86
9. BIBLIOGRAFÍA	88
10. ANEXOS.....	90
10.1. Bloques de aluminio en estado de suministro.....	90
10.2. Bloques de aluminio CNC fabricando el bloque del utillaje.	90
10.3. Taladro vertical.....	91
10.4. Bloque de carga manufacturado	91
10.5. Bloques de carga	92
10.6. Impresora 3D vista superior	92
10.7. Impresora 3D vista frontal.....	93

10.8. Cinta térmica.....	93
10.9. Filamento de Onix™ dentro de la Drybox	94
10.10. Probeta falla durante procedimiento manufactura.....	94
10.11. Probeta falla capa 20	94
10.12. Probeta falla capa 15	95
10.13. Probeta falla capa 20	95
10.14. Probeta de Onix™	95
10.15. Probeta de fibra continua de vidrio durante pruebas de corte láser.....	96
10.16. Drybox.....	97
10.17. Estereomicroscopio	97
10.18. Visualización de la grieta.....	98
10.19. Visualización de la grieta.....	98
10.20. Pegado de la probeta y bloques de carga.....	99
10.21. Curado del pegado de la probeta con prensa manual.	100
10.22. Trazado de las líneas de pre-grieta para el ensayo.....	101
10.23. Colocación de la probeta en la máquina de ensayos universal.	102
10.24. Probeta con los bloques de carga retirados	103
10.25. Cámara óptica para observación durante los ensayos	103
10.26. Probeta sometida a carga catastrófica.....	104
10.27. Trípode	104
10.28. Cámara Nikon	105

10.29. Calibrador digital de precisión.....	105
10.30. Entenalla de precisión	106
10.31. Espesores rectificadores varios.....	106
10.32. Entenalla de precisión	107
10.33. Apoyos para 3 puntos a flexión normados.....	107
10.34. Probeta colocada en la base del SEM.....	108
10.35. Lamina de oro para recubrimiento en oro.	108
10.36. Cinta de carbono	109
10.37. Probetas recubiertas de oro para observación.	109
10.38. Equipos de visualización del SEM.....	110
10.39. Desecador	110
10.40. Ficha técnica del ensayo de cizallamiento en el plano.	111

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. Máquina CNC semi-industrial LEADWELL V-2.....	37
Figura 7. División de la placa de aluminio.....	38
Figura 8. Mecanización de pieza de carga uno.....	38
Figura 9. Mecanización de la pieza de carga dos	39
Figura 10. Mecanizado CNC del bloque de carga.....	39
Figura 11. Uso taladro EA TAR, modelo T4.	40
Figura 12. Piezas de aluminio fabricadas.....	41
Figura 13. Impresora Markforged® The Mark Two™.	41
Figura 14. Probeta de ajuste de parámetros en Onix™.	43
Figura 15. Aplicación de la capa homogénea de pegamento sólido en barra.....	43
Figura 16. Impresión de las primeras capas de Onix™.....	44
Figura 17. Colocación de la capa de cinta térmica entre los dos constituyentes.	44
Figura 18. Remoción del Onix™ del extrusor de la impresora.	45
Figura 19. Primeras capas de fibra de vidrio.....	45
Figura 20. Aplicación de la segunda capa de cinta térmica para generar la pre-grieta.....	46
Figura 21. Finalización de la impresión de la Probeta conforme normativa.	46
Figura 22. Remoción de la Probeta impresa de la base de impresión.	47
Figura 23. Corte con láser de la Probeta impresa conforme medidas del ensayo.....	48
Figura 24. Marcado de la grieta mediante observación en estereomicroscopio.	48

Figura 25. Dry Box con bolsas desecantes para capturar humedad.	49
Figura 26. Posicionamiento de la pre-grieta y señalización con líneas verticales de dos colores.	50
Figura 27. Colocación del teflón industrial entre los brazos de viga la probeta.	50
Figura 28. Pegado de los bloques de carga en aluminio.	51
Figura 29. Prensa manual durante el proceso de curado del pegamento.	51
Figura 30. Probeta con bloques de carga y utillaje de transferencia de carga.	52
Figura 31. Máquina de ensayos universal.	52
Figura 32. Ensayo de pre-fractura a desplazamiento controlado.	53
Figura 33. Cámara profesional Nikon captando el avance del frente de grieta durante el ensayo.	53
Figura 34. Remoción manual de los bloques de carga.	54
Figura 35. Marcando del alcance de la pre-grieta mediante observación óptica.	55
Figura 36. Probeta montada en la máquina de ensayos universal.	56
Figura 37. Probeta sometida a carga con deformación permanente.	57
Figura 38. Ensayo finalizado ante fallo catastrófico de la muestra.	57
Figura 39. Gráfica fuerza/desplazamiento de una muestra ensayada.	59
Figura 40. Compendio de gráficas fuerza/desplazamiento de las 4 probetas ensayadas.	60
Figura 41. Ruptura manual de las probetas en el plano de fractura.	64
Figura 42. Recubrimiento de oro a la probeta.	64
Figura 43. Ensamblaje de la muestra.	65
Figura 44. SEM de marca Jeol, modelo IT300.	66
Figura 45. Captura de la superficie de fractura mediante SEM a x500 de magnificación.	67
Figura 46. Captura de la zona de fractura de la muestra mediante SEM a x20 de amplificación.	67
Figura 47. Muestras guardadas en el desecador.	68
Figura 48. Gráfica fuerza/desplazamiento (N/mm) del lote de probetas ensayadas.	69
Figura 49. Zona de inspección 1 mediante SEM a x20 de amplificación.	73

Figura 50. Zona de inspección 1 mediante SEM a x500 de amplificación.	78
Figura 51. Zona de inspección 2 mediante SEM a x20 de amplificación.	80
Figura 52. 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_{IIC}	62
Tabla 4. Resistencia a la fractura de la fibra de carbono	83
Tabla 5. Compendio de valores de G_{IIC} de la fibra continua de vidrio.	83

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En 1923, Griffiths, basándose en el Primer Principio de la Termodinámica, postuló que cuando un sistema pasa de un estado de no equilibrio a uno de equilibrio, experimenta una reducción en su energía total. Investigó las condiciones de fractura en sólidos frágiles con grietas, sentando las bases de la Mecánica de la Fractura. Su teoría establece que una grieta puede formarse o crecer solo si esto resulta en una disminución o constancia de la energía total del sistema (Vázquez, 2022). La primera evidencia cuantitativa del efecto de la concentración de tensiones en grietas fue dada por Griffith, quien analizó agujeros elípticos en placas planas.

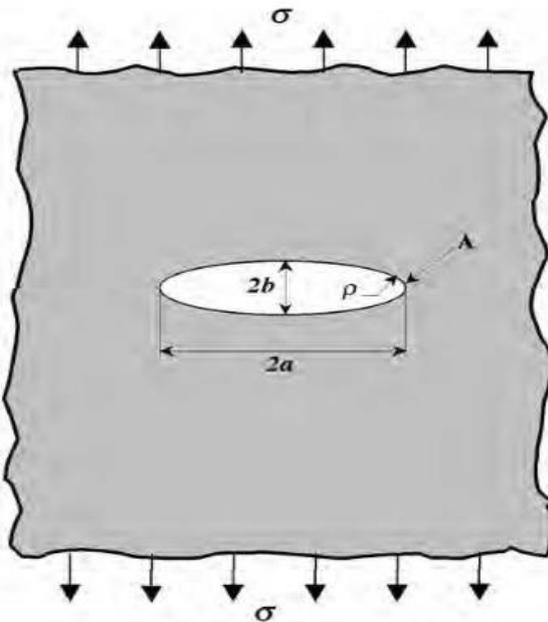


Figura 1. Agujero elíptico en placa plana
Imagen extraída de (Vázquez, 2022)

La investigación de Griffiths estableció una conexión entre la tensión aplicada y el tamaño de un defecto mediante el análisis de tensiones en defectos elípticos. Este análisis mostró

que la resistencia real a la tensión en materiales frágiles era menor de lo teóricamente previsto debido a roturas microscópicas en la estructura del material (Griffiths, 1995).

En la década de 1950, La investigación de Irwin amplió el modelo de Griffith para abarcar materiales que mostraban deformación plástica en los extremos de la grieta, introduciendo el concepto de tasa de liberación de energía. Usando la aproximación de Westergaard, Irwin demostró que las tensiones y desplazamientos cerca de la punta de la grieta podían expresarse mediante una constante, ahora conocida como el factor de intensidad de tensiones (K) (Vázquez, 2022)

Una vez establecidos los principios de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM, por sus siglas en inglés), se investigó la plastificación cerca de la punta de la grieta, en 1961. Wells propuso el desplazamiento de las caras de la grieta como un criterio de diseño cuando había plastificación significativa. Esto condujo al desarrollo del parámetro conocido como desplazamiento de apertura del frente de la grieta (J. Arana & J. González, 2002).

En 1968, Rice introdujo la integral de contorno, J , para materiales más dúctiles, considerando la deformación plástica como deformación elástica no lineal, desarrollando así la Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM) (Vázquez, 2022).

La evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales es esencial para comprender su comportamiento bajo diferentes cargas. Recientemente, el uso de fibras como refuerzo en probetas de polímeros ha mostrado ser una técnica prometedora para mejorar sus características (A. Katalagianakis et al, 2023). Añadir fibras a la matriz de polímero aumenta su resistencia y tenacidad bajo tensiones y deformaciones diversas. A

través de pruebas de tracción, flexión y compresión, se puede medir cómo estas fibras influyen en las propiedades mecánicas de los polímeros, permitiendo adaptar los materiales compuestos a diversas aplicaciones industriales y optimizando los procesos de fabricación.

El empleo de fibras como refuerzo ha revolucionado el ámbito estructural, proporcionando una alternativa rentable para fortalecer las estructuras sin comprometer la calidad (A. Belouar et al, 2013), señalan que las imperfecciones en estructuras de concreto han provocado envejecimiento y riesgos, por tanto, requiere de reforzamiento.

Actualmente, las fibras de carbono en materiales estructurales son utilizadas con gran confiabilidad, dados sus resultados de los ensayos en polímeros y su caracterización mecánica. En la actualidad, la inclusión de fibras como refuerzo en estructuras ha demostrado resultados promisorios. Un ejemplo destacado es la incorporación de fibras de carbono en materiales estructurales (A. Katalagianakis et al, 2023) evidenciando un avance positivo a partir de ensayos en polímeros y su caracterización mecánica.

A pesar de la abundante literatura sobre la aplicación experimental de diversos materiales ligeros como refuerzo, el conocimiento sobre la aplicación de fibra de vidrio sigue siendo limitado. Aunque se han realizado varios estudios sobre la tenacidad de fractura en modo I y modo II de compuestos impresos en 3D y reforzados con materiales ligeros, aún no se ha demostrado la aplicabilidad de esta técnica en compuestos polímeros con fibra de vidrio.

La fibra de vidrio es una alternativa asequible y ampliamente utilizada en aplicaciones estructurales que podría beneficiarse de la fabricación aditiva para obtener geometrías

complejas y refuerzos de fibra local. Es por esta razón, que la falta de datos experimentales sobre la resistencia a la fractura por delaminación de estos polímeros en modo I y modo II, compuestos con fibra de vidrio impresos en 3D representan el objeto de estudio abordado en este trabajo de investigación.

Las fibras de carbono continuas representan mejoras significativas a las propiedades de las piezas de polímero fabricadas mediante impresión 3D por extrusión de materiales. No obstante, al igual que otros compuestos laminados, las piezas impresas en 3D son susceptibles a daños por delaminación (A. Katalagianakis et al, 2023).

El desafío central del presente trabajo parte de la ausencia de datos experimentales que permitan comprender y utilizarlos en la tenacidad a la fractura en modo II que se manifiesta en materiales estructurales ligeros de ingeniería. Dicho vacío de datos, se evidencian especialmente en la escasez de estudios y literatura que respalden el uso eficaz de la fibra de vidrio como refuerzo en polímeros, a pesar de las sugerentes propiedades mecánicas del vidrio, por lo tanto, la escasa información de análisis comparativos con materiales polímeros reforzados con carbono ha restringido la comprensión sobre el comportamiento y sus potenciales ventajas en los polímeros reforzados con fibra de vidrio (J. Santos et al, 2023).

2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA

Entender la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo II es crucial para determinar si la fibra de vidrio impresa con impresora Markforged MarkTwo[®], es capaz de soportar niveles de carga y evitar la generación y propagación de grietas estables o inestables, cuando las piezas son manufacturadas con tecnología FDM (Fused Deposition Modeling, por sus siglas en inglés).

Cuando estas piezas son sometidas a una carga perpendicular a su plano, se debe considerar el comportamiento del polímero reforzado con fibra de vidrio, éstas permitirían diseñar estructuras seguras y prever su respuesta ante cargas. Además, investigar la tenacidad a la fractura en modo II puede conducir al desarrollo de nuevos materiales compuestos con propiedades mejoradas, lo que podría resultar en diseños más resistentes y livianos, mejorando el rendimiento económico de las aplicaciones estructurales futuras.

Finalmente, al llevar a cabo ensayos en los polímeros reforzados con fibra de vidrio, se contribuye al avance del conocimiento científico en el campo de la mecánica de la fractura lineal elástica, proporcionando información que hasta el momento es limitada en la actualidad.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

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

3.2. Objetivos Específicos

- Producir especímenes para la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo II del polímero reforzado con fibra de vidrio.
- Caracterizar la tenacidad a la fractura en modo II del polímero reforzado con fibra de vidrio mediante ensayo cuasiestático.
- Analizar el rendimiento estructural con materiales ligeros en el mercado.

4.MARCO TEÓRICO

Se presenta los conceptos generales y esenciales para la introducción al tema abordado de la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo II de materiales estructurales ligeros de ingeniería:

4.1. Conceptos esenciales de mecánica de sólidos

Esfuerzo cortante: el esfuerzo cortante se refiere a las fuerzas internas generadas dentro de un material debido a cargas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal, se evalúa la resistencia al corte del material, los esfuerzos cortantes máximos que puede soportar y los modos de falla asociados con la deformación por corte (Popov, 2000).

Impacto: el impacto en la caracterización de materiales alude a la habilidad de un material para soportar fuerzas tanto internas como externas sin experimentar deterioros notables. Esta capacidad se examina mediante diversas pruebas y análisis, que pueden abarcar desde evaluaciones de resistencia mecánica hasta mediciones de dureza y análisis de fatiga, entre otros métodos. La evaluación del impacto es esencial para determinar si un material es adecuado para ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción hasta la fabricación de dispositivos médicos (W. Callister et al, 2016).

Caracterización a flexión: la caracterización a flexión es el conjunto de métodos y técnicas empleadas para determinar las propiedades mecánicas de un material sometido a cargas de flexión, incluyendo resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y comportamiento de deformación bajo estas condiciones (Hibbeler, 2017).

Dureza: la dureza es la capacidad de un material para resistir la deformación permanente o el daño superficial bajo condiciones específicas de carga, la dureza se determina

generalmente mediante pruebas estandarizadas que implican la aplicación de una carga controlada a un penetrador sobre la superficie del material y la medición de la profundidad de la penetración (W. Callister & D. Rethwisch, 2014).

Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés): el microscopio electrónico de barrido, SEM se encuentra diseñado para estudiar las superficies de materiales sólidos utilizando un haz de electrones que estimula la emisión de electrones dispersados de alta energía y electrones secundarios de baja energía de la superficie de la muestra. La muestra debe ser eléctricamente conductora; de lo contrario, no se obtendría una imagen nítida. La conductividad generalmente se logra evaporando una película de metal, como el oro, de 50-100 angstroms de espesor sobre la muestra por vacío (A. Katalagarianakis et al, 2023)

4.2. Fundamentos de la mecánica de la fractura

- **Modo I: fractura por apertura**

En el Modo I, la carga aplicada es perpendicular a la grieta, lo que resulta en una apertura de la grieta, de este modo se caracteriza por un esfuerzo de tracción que tiende a abrir la grieta en la dirección perpendicular a la superficie de la grieta (J. Xiang et al, 2023).

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

En el Modo II, la carga aplicada es paralela a la dirección de la grieta y perpendicular a la superficie de la grieta, lo que resulta en un deslizamiento relativo de las superficies de la grieta (J. Xiang et al, 2023).

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

En el Modo III, la carga aplicada es perpendicular a la dirección de la grieta y paralela a la superficie de la grieta, lo que resulta en un deslizamiento relativo de las superficies de la grieta en una dirección lateral (J. Xiang et al, 2023).

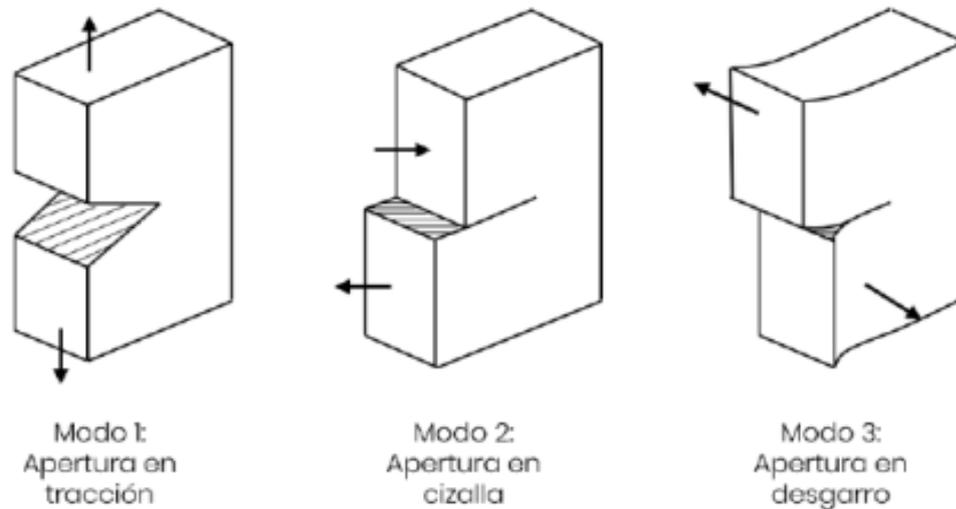


Figura 2. Representación esquemática de los tres modos de fractura
Imagen extraída de (Vázquez, 2022)

4.3. Ensayos esenciales de caracterización mecánica

Ensayo tensión en el plano: el ensayo de tensión en la caracterización mecánica de un material es una prueba diseñada para evaluar el comportamiento del material cuando se aplica una carga gradualmente creciente en dirección opuesta a lo largo de su eje longitudinal, durante el ensayo se registran y se analizan las deformaciones de las fuerzas aplicadas para determinar la resistencia a la tracción, el límite elástico, la ductilidad y la rigidez de nuestro material (P. Beer et al, 2020).

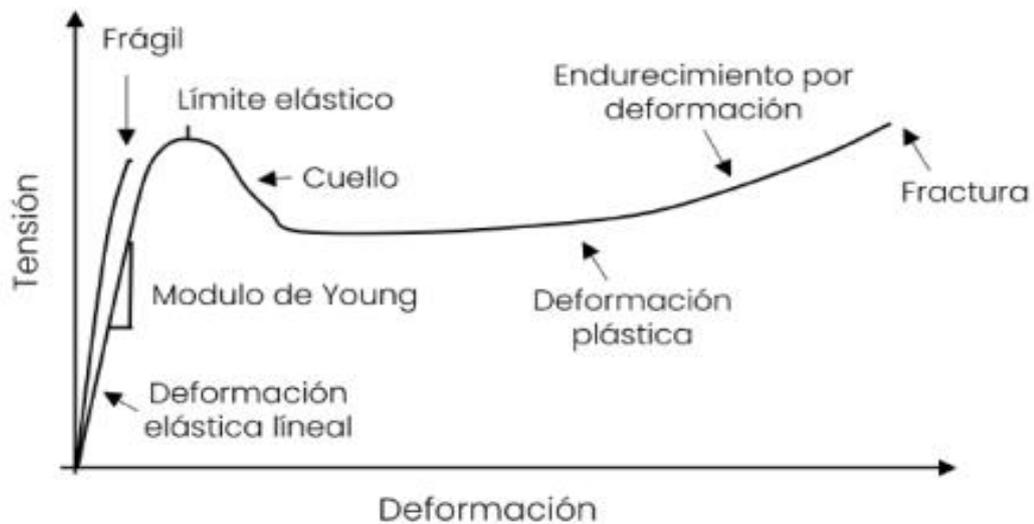


Figura 3. Curva de deformación
Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics, por sus siglas en inglés): se aplica en casos donde la fractura ocurre dentro del rango del comportamiento elástico; se base en la hipótesis de que la energía requerida para que se lleve a cabo la fractura se invierte propagación de la grieta (Fuentes, 1982).

EPFM (Elastic-Plastic Fracture Mechanics, por sus siglas en inglés): se aplica a los sistemas en los que la deformación plástica delante de la grieta absorbe una considerable cantidad de energía y se basa en el concepto de la integral J, la cual expresa la energía necesaria para generar nuevas superficies de fractura, desarrollado por Rice (J. Arana & J. González, 2002)

Erwin doble grieta: el ensayo de doble grieta es una metodología empleada en la caracterización mecánica de materiales para determinar su resistencia a la fractura en situaciones de tensión. En este procedimiento, se generan dos grietas específicas en una muestra de material y se somete a carga para que se propaguen, la medición de la fuerza

requerida para que estas grietas se expandan ofrece datos sobre la capacidad del material para resistir la fractura (ASTM, 2017).

Ensayo de Fractura (EWF, por sus siglas en inglés): la teoría de EWF se basa en la división de energía involucrada en un proceso de fractura dúctil (W_f) en dos términos: el trabajo esencial (W_e), que involucra la energía de propagación de la grieta, y el trabajo plástico o no esencial (W_p), que agrupa otras fuentes de energía, como la disipación de calor, por ejemplo, utilizadas durante el desarrollo del proceso de fractura (Balas, 2001).

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

4.4. Materiales de ingeniería

Polímeros: los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetida de una o varias moléculas unidas por enlaces covalentes, dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, mientras que los naturales o biopolímeros presentan estructuras mucho más complejas. Los polímeros sintéticos tienen, hoy por hoy, mayor interés desde el punto de vista comercial, por lo que, en general, nos referiremos casi exclusivamente a ellos (M. Beltrán & A. Marcilla, 2012).

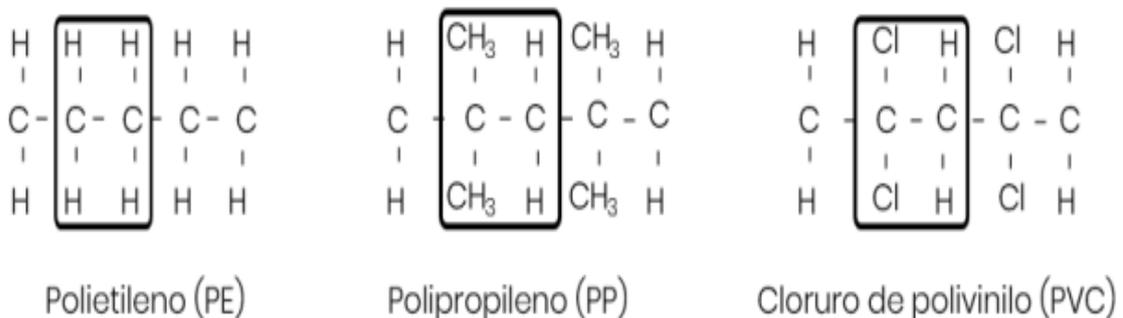


Figura 4. Polipropileno.

Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

Ejemplos de monómeros en diferentes polímeros: Los polímeros se distinguen entre sí por una serie de características, como el tipo de monómero utilizado, la cantidad de monómeros, el tipo de enlace entre ellos, la distribución en la cadena polimérica, el grado de ramificación y el método de fabricación (Reynoso, 2021).

Estos materiales pueden obtenerse a partir de diversas fuentes de materia prima, pero la mayoría utiliza como componente principal un derivado del gas natural o del petróleo crudo. Este último constituye la principal fuente de materia prima, ya que la destilación del petróleo crudo produce nafta, que luego se somete a un proceso químico conocido como craqueo o cracking, mediante el cual se rompen sus moléculas para producir compuestos simples como los monómeros.

Polímeros reforzados: los polímeros pueden ser mejorados mediante la adición de aditivos o refuerzos, lo que permite obtener compuestos con propiedades más superiores que las de la resina pura. Estas mejoras pueden ser en términos mecánicos, térmicos, eléctricos, ópticos o para mejorar la procesabilidad. Para llevar a cabo estas modificaciones, se utilizan partículas a escala nano y micro, fibras o partículas, y mezclas o aleaciones con otros polímeros. Estos materiales adicionales se incorporan a la matriz polimérica durante un proceso de extrusión, un método conocido como *compounding* (C. Caicedo et al, 2017).

Los materiales de refuerzo también pueden emplearse para disminuir costos, dado que algunos de ellos son más económicos que el polímero base y pueden sustituir parte de su volumen. Además, estas combinaciones contribuyen a reducir el peso y posibilitan la creación de formas más complejas en componentes que anteriormente se fabricaban con metales (D. Díaz et al, 2015).

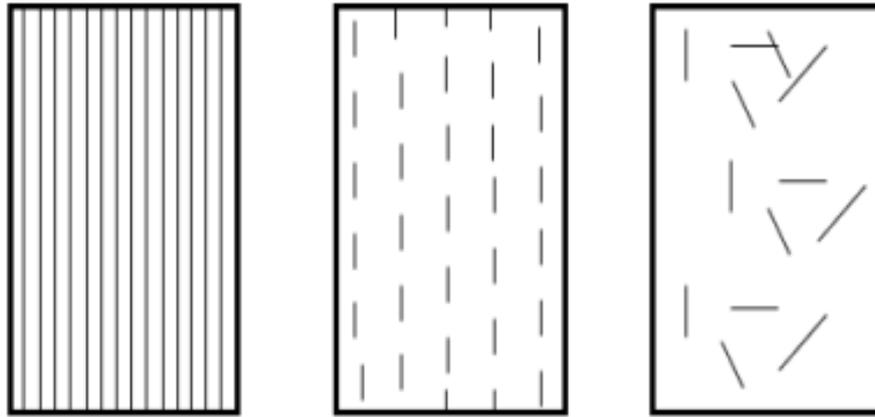


Figura 5. Esquema de tipos de refuerzos.
Imagen extraída de (Cervantes, 2022).

A este proceso de mezclar aditivos en el plástico para crear un material homogéneo se le llama proceso de composición, pero es más conocido por su nombre en inglés, *compounding*. El proceso normalmente comienza con algún tipo de mezcla en seco y termina con una extrusora, que completa la mezcla y produce los gránulos de resina plástica que llevan los aditivos distribuidos uniformemente.

Fibra de vidrio: la fibra de vidrio es un material compuesto constituido por filamentos de vidrio extremadamente finos, utilizados para reforzar una matriz y formar materiales compuestos. Este material se caracteriza por su elevada resistencia a la tracción, baja densidad y sobresaliente resistencia a la corrosión, atributos que lo hacen ideal para aplicaciones en ingeniería estructural. En el ámbito de la ingeniería estructural la fibra de vidrio se emplea predominantemente en la construcción de elementos de refuerzo. (W. Callister & D. Rethwisch, 2014).

Onix™: es una variante criptocristalina del cuarzo, específicamente una forma de calcedonia que se caracteriza por sus bandas paralelas de colores contrastantes, este material es conocido por su alta dureza, resistencia a la abrasión y atractivo estético, lo

que lo hace especialmente útil en aplicaciones tanto decorativas como estructurales. En el ámbito estructural se usa en revestimiento de elementos decorativos debido a su resistencia a la abrasión (W. Callister & D. Rethwisch, 2014).

Aluminio: el aluminio es un metal de baja densidad y alto rendimiento que se caracteriza por su excelente conductividad térmica y eléctrica, así como por su resistencia a la corrosión, resultado de la formación de una capa pasiva de óxido en su superficie, este material presenta una destacada relación resistencia-peso, lo que lo hace ampliamente utilizado en diversas aplicaciones estructurales. En el ámbito estructural se usa para la construcción de elementos ligeros de alta resistencia y durabilidad (M. Ashby & D. Jones, 2012).

4.5. Herramientas usadas para la producción de los especímenes

Estereomicroscopio: 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: una máquina de ensayos universal es un dispositivo esencial en ingeniería utilizado para analizar las propiedades mecánicas de materiales mediante la aplicación controlada de fuerzas, este equipo aplica cargas de tracción, compresión o flexión a muestras de materiales como metales, plásticos y cerámicos permitiendo la evaluación de su resistencia, elasticidad, ductilidad y otras características clave. 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 (H. Kuhn & D. Medlin, 2000).

Impresora 3D 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 (H. Lipson & M. Kurman, 2013).

CNC (Computer Numerical Control, por sus siglas en inglés): una máquina CNC es un dispositivo automatizado de control numérico computarizado que permite la fabricación de componentes precisos mediante la interpretación de instrucciones codificadas en un programa informático, Utiliza herramientas rotativas o de corte para dar forma a materiales como metales, plásticos, madera y cerámica, según especificaciones detalladas de diseño. Este proceso de fabricación se caracteriza por su alta precisión, repetibilidad y eficiencia en la producción industrial y personalizada (S. Kalpakjian & S. Schmind, 2013).

Fresadora vertical: una fresadora es una herramienta esencial en la manufactura industrial, diseñado para mecanizar piezas mediante el movimiento rotativo de una herramienta de corte conocida como fresa, este dispositivo realiza operaciones de fresado en una variedad de materiales como metales, plásticos y madera, permitiendo la creación de superficies planas, perfiles complejos, así como la formación de ranuras y roscas. La fresadora posee la capacidad de controlar de manera precisa el movimiento simultáneo de la herramienta y la pieza de trabajo a lo largo de múltiples ejes, lo cual garantiza la

versatilidad necesaria para producir componentes de elevada precisión y calidad en la manufactura moderna (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).

5. HIPÓTESIS

La caracterización de la tenacidad a la fractura en modo II de materiales estructurales ligeros es fundamental para entender y mejorar su respuesta ante fuerzas complejas, este proceso incluye ensayos específicos que simulan condiciones de carga en las que las capas del material tienden a deslizarse entre sí, evaluando su capacidad para resistir la propagación de grietas. Los polímeros reforzados con fibra de vidrio son utilizados en numerosas aplicaciones industriales y estructurales debido a su alta relación resistencia-
peso, en este proyecto se analizará mediante ensayos para determinar cómo se comportan bajo cargas que provocan fracturas en modo II, estos ensayos proporcionan no solo una medida cuantitativa de la tenacidad a la fractura, sino también una visión de los mecanismos que contribuyen a la resistencia del material frente a fallos.

Realizar estos ensayos en polímeros reforzados con fibra continua de vidrio promete expandir notablemente el conocimiento en el campo de la mecánica de fractura, este enfoque experimental genera datos detallados y específicos que antes no estaban disponibles, mejorando la comprensión de cómo interactúan la matriz polimérica y las fibras de vidrio bajo cargas de modo II.

Esta información es esencial para optimizar la composición y el diseño de materiales compuestos, mejorando su desempeño y fiabilidad en aplicaciones críticas, además, estos datos pueden ser utilizados para desarrollar modelos predictivos más precisos, que faciliten la innovación en el diseño de materiales avanzados, garantizando su eficacia y seguridad en diversos entornos y condiciones operativas.

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1. Introducción

La metodología de la investigación se enfoca en evaluar la tenacidad a la fractura interlaminar modo II de probetas de fibra continua de vidrio impresos en 3D mediante un enfoque experimental y analítico detallado, se diseñaron y prepararon especímenes interlaminares basados en impresión 3D, considerando una estrategia de diseño que incorpora configuraciones de fibra híbrida entre capas basadas en la rigidez a la flexión.

A través de ensayos a tracción y el análisis de curvas R (resistencia a la propagación de la fractura), estas nos muestran la relación entre la energía de fractura y la extensión de la grieta durante el ensayo. Se caracterizó el comportamiento de fractura interlaminar de los compuestos, mientras que el SEM se utilizó para investigar los mecanismos de falla en las interfaces de fractura de microestructura, este enfoque integral de la metodología permite comprender en profundidad las propiedades interlaminares de la fibra de vidrio y su resistencia a la delaminación, proporcionando información crucial para la optimización de estos materiales en aplicaciones estructurales avanzadas.

Para la realización de la metodología se dividió en varios paquetes de trabajo, los cuales serán puntualmente escritos en la presente sección.

6.2. Producción de especímenes

El primer paso en la producción de especímenes para el proyecto fue la adquisición de materiales esenciales, entre ellos: filamentos de fibra continua de vidrio para la impresora Markforged[®], un escariador de $\varnothing = 3$ mm, una barra de acero plata de 15mm con $\varnothing = 3$ mm y un corte de plancha de aluminio de 150 x 150 x 3mm.

El proceso de la fabricación de las piezas de aluminio fue alrededor de alrededor de 10 horas considerando todos los detalles, el cambio de tiempo que toma la impresión de una probeta es de alrededor de 5 horas por cada espécimen.

6.2.1. Fabricación de las piezas de aluminio

Utilizando el software AutoCAD® se diseñaron las mordazas necesarias para asegurar un adecuado sujeción y posicionamiento durante los ensayos que se usaran para realizar, estas piezas fueron específicamente diseñadas y programadas para que sean compatibles con el centro de mecanizado CNC Leadwell V-20i, el cual se empleó para fabricar las muestras de aluminio con alta precisión.

El diseño en AutoCAD® se transforma en un código G que el CNC es capaz de interpretar, a continuación, se asegura un bloque de aluminio en la mesa del CNC utilizando mordazas u otros mecanismos de sujeción para mantenerlo firmemente en su lugar durante el proceso de mecanizado, como se observa en la Figura 6.

El CNC emplea herramientas de corte, como fresas y taladros, montadas en un husillo que se desplaza en múltiples ejes (*X*, *Y* y *Z*) para cortar y dar forma al aluminio según el diseño programado, la máquina sigue las instrucciones del código G, moviendo la herramienta de corte con precisión para remover material y formar la pieza a la forma que fue diseñada.

La máquina opera a altas velocidades y con gran exactitud, asegurando que las dimensiones y tolerancias de la pieza se ajusten exactamente a las especificaciones del diseño, además, se aplica refrigerante para enfriar tanto la herramienta de corte como la pieza de trabajo, evitando el sobrecalentamiento y extendiendo la vida útil de las

herramientas, una vez completado el proceso de mecanizado, la pieza se retira de la máquina.



Figura 6. Máquina CNC semi-industrial LEADWELL V-2

El diseño detallado en AutoCAD® permitió optimizar las dimensiones y la geometría de las mordazas, asegurando que los especímenes de aluminio fueran mecanizados según las especificaciones exactas requeridas para los ensayos posteriores, este enfoque integral, que combinó la adquisición de materiales de alta calidad con el uso de herramientas de diseño y maquinaria avanzada, es fundamental para garantizar la precisión y reproducibilidad de las muestras requeridas.

Para manufacturar las piezas de carga en aluminio, se procede con los pasos descritos concisamente a continuación:

- 1) División la placa de aluminio en dos piezas de 27,5 x 25mm, como se observa en la Figura 7.

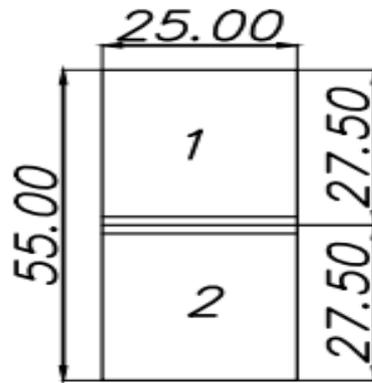


Figura 7. División de la placa de aluminio

- 2) Mediante el CNC se procede a mecanizar las piezas de aluminio, denominadas bisagras de carga, como se muestra en las Figuras 8 y 9.

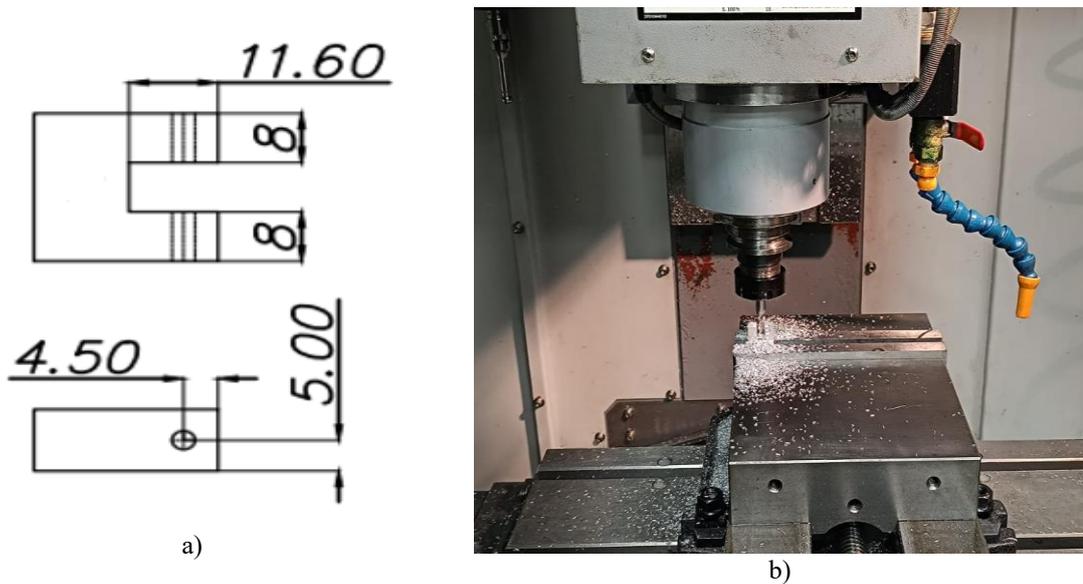
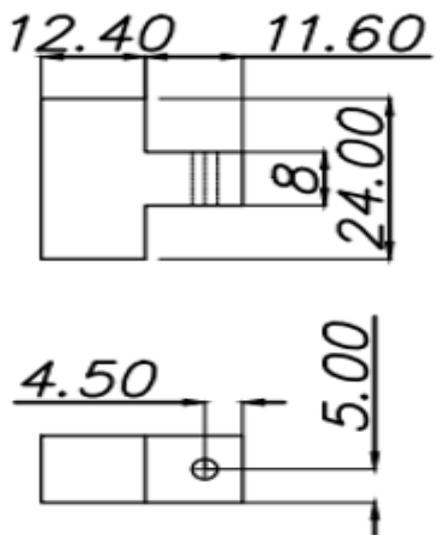
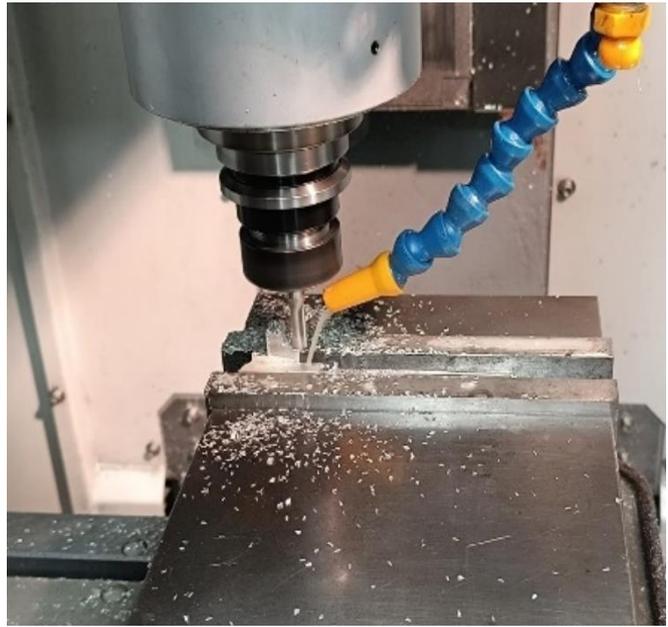


Figura 8. Mecanización de pieza de carga uno
a) Bosquejo de la imagen y b) Proceso de mecanizado de la bisagra



a)



b)

Figura 9. Mecanización de la pieza de carga dos

a) Bosquejo de la imagen y b) Proceso de mecanizado de la bisagra de carga

- 3) Una vez realizado el primer mecanizado, se procede mediante la máquina CNC para el redondeo de la parte superior a un diámetro de 5 mm, fabricación de los cantos, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Mecanizado CNC del bloque de carga

- 4) Luego del mecanizado de la pieza 2, se procede a taladrar el agujero de $\varnothing = 3$ mm en la parte superior del bloque de carga, con la ayuda del taladro de marca EA TAR, modelo T4. Este agujero permitirá el paso del eje de acero plata para la unión de las piezas, como se observa en la Figura 11.

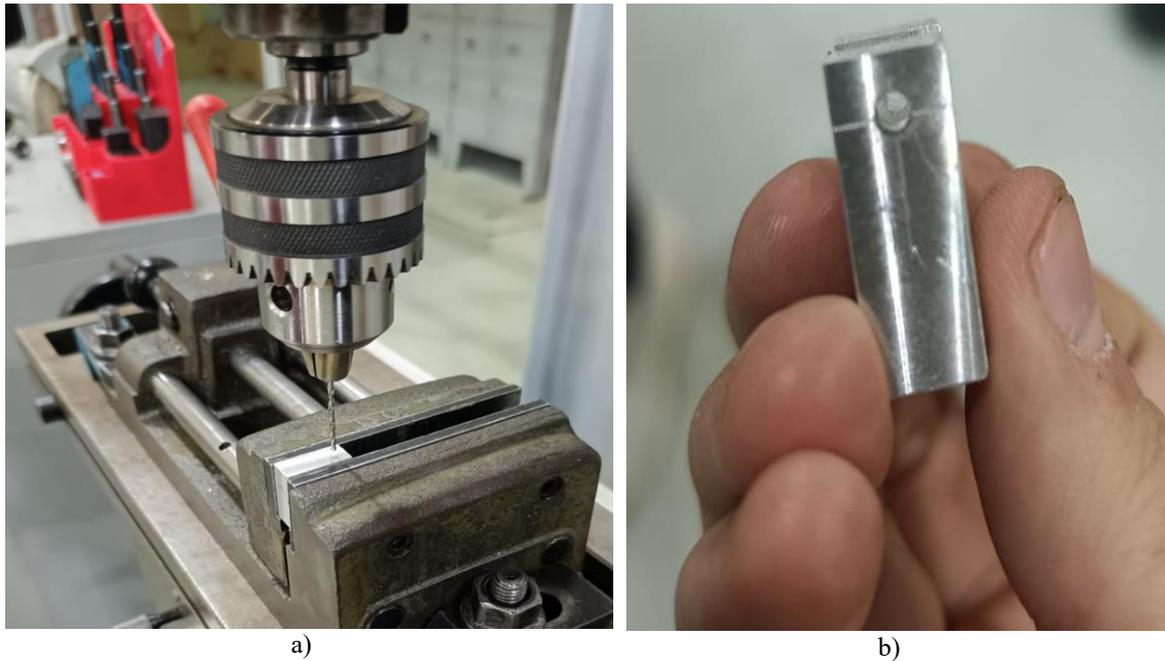


Figura 11. Uso taladro EA TAR, modelo T4.
a) Taladrado para construcción de agujeros y b) Pieza de aluminio con agujeros

- 5) Luego del mecanizado de las piezas de aluminio, se procede a limpiar las aristas vivas cortantes y a la contrastación de las medidas de precisión mediante calibrador digital y/o micrómetro.



Figura 12. Piezas de aluminio fabricadas

6.2.2 Producción de las probetas de fibra continua de vidrio

El proceso de fabricación de probetas de fibra de vidrio mediante impresión 3D comienza con la elaboración de un modelo digital utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), este modelo define con precisión las dimensiones y la geometría de las probetas. Una vez completado el diseño, se convierte en archivo STL (STereo Lithography, por sus siglas en inglés) compatible con la impresora Markforged®.

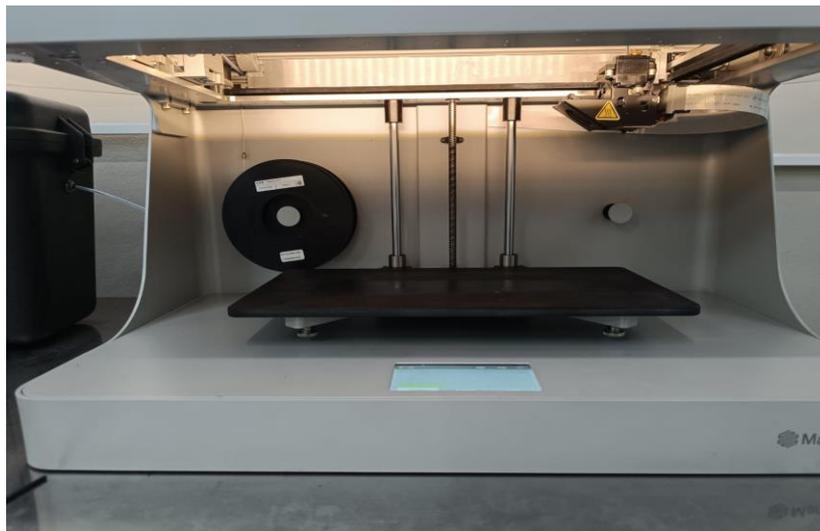


Figura 13. Impresora Markforged® The Mark Two™.

Dicho archivo se carga en el software de la impresora, llamado Eiger™ y se configuran los parámetros de impresión, tales como velocidad, temperatura y disposición de la fibra de vidrio dentro de la matriz polimérica. Los cuales vienen definidos por defecto en el software de corte de las muestras, Eiger™, y no es posible modificarlos por el usuario. Además, la impresora tiene la capacidad de imprimir materiales compuestos al depositar simultáneamente capas de polímero y fibra de vidrio siguiendo el diseño especificado.

Durante el proceso de impresión, la máquina deposita el material polimérico base en capas sucesivas, mientras que la fibra de vidrio se coloca estratégicamente dentro de estas capas para reforzar la estructura. Este método de fabricación aditiva permite crear probetas con una distribución óptima de la fibra, asegurando propiedades mecánicas mejoradas, la impresora controla de manera precisa la cantidad y orientación de la fibra de vidrio, lo cual, es crucial para alcanzar las características deseadas de resistencia y tenacidad a la fractura.

La impresión de la probeta definida para el ensayo conforme la normativa cuenta con un total de 40 capas, considerando capas de polímero y de compuesto en el núcleo. Lo último conforme la configuración preestablecida por el software Eiger™. A continuación, se detalla brevemente el proceso de impresión de las probetas:

Etapa de validación del proceso de impresión

- 1) Se imprimieron dos probetas de ajuste de parámetros de Onix™ para comprobar que el diseño sea correcto y verificación de las condiciones de la impresora, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Probeta de ajuste de parámetros en Onix™.

Etapas de fabricación de las probetas definitivas

- 1) Una vez definido el proceso de impresión con Onix™, se procede a manufacturar con fibra continua de vidrio. Para comenzar el proceso de impresión se debe colocar una capa de pegamento especializado para la impresora 3D, procedimiento previo, necesario para el fácil retiro de la probeta y evitar que se fracture en este proceso, como podemos observar en la Figura 15.



Figura 15. Aplicación de la capa homogénea de pegamento sólido en barra.

- 2) Las primeras 5 capas de la probeta serán de Onix™, esto se hace para que las mismas funcionen como una base para el espécimen, lo cual permite una adherencia adecuada en la mesa de impresión. Además de que al momento de retirarlo el Onix™ evite que la fibra de vidrio se quede adherida a la base de la impresora, invalidando la muestra.

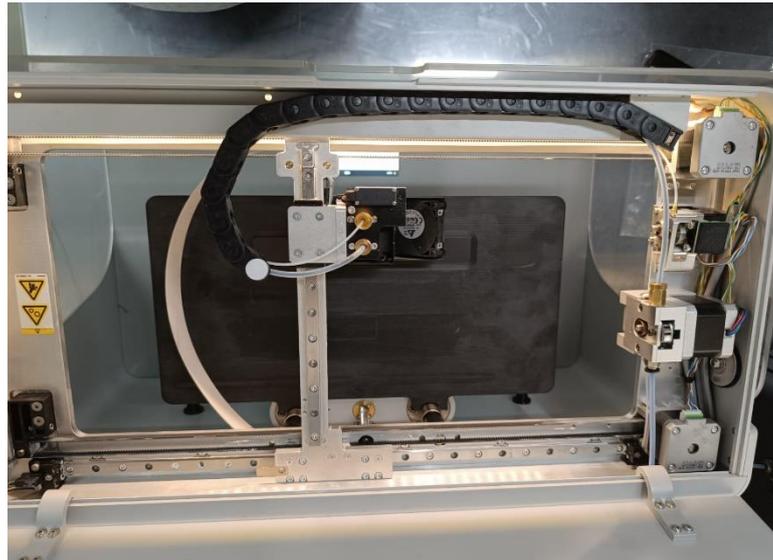


Figura 16. Impresión de las primeras capas de Onix™.

- 3) Una vez impreso las cinco capas de Onix™, se procede con la aplicación de la cinta térmica (Kapton™) con medidas de 175 x 20 mm. La cinta tiene como función, separar las capas de Onix™ con la fibra de vidrio, por tanto, garantizando la integridad de la manufactura sin mezcla de los materiales.

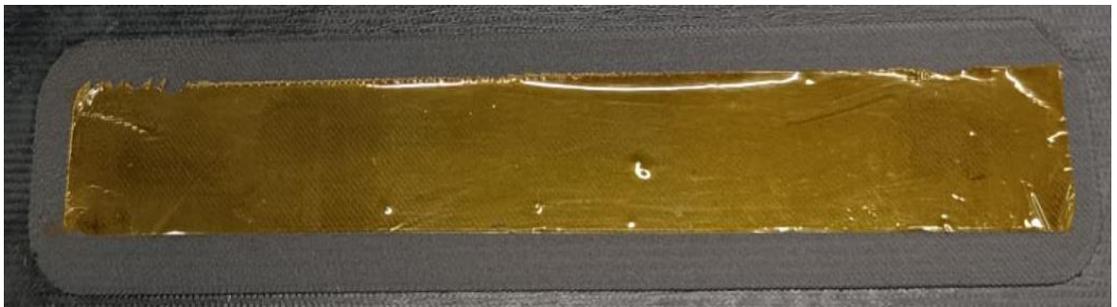


Figura 17. Colocación de la capa de cinta térmica entre los dos constituyentes.

- 4) Un paso importante al momento de imprimir es retirar el Onix™ de la impresora, esto se lo realiza para que los dos materiales no se mezclen y las probetas de ensayo sean íntegramente fibra de vidrio, como se ve en la Figura 18.



Figura 18. Remoción del Onix™ del extrusor de la impresora.

- 5) Al terminar de colocar la cinta térmica, se reposiciona la base de la impresora 3D para proceder con la impresión de las primeras 15 capas de fibra de vidrio.



Figura 19. Primeras capas de fibra de vidrio

- 6) Cuando las primeras capas de fibra de vidrio se depositan, se procede a aplicar la segunda capa de cinta térmica de forma lateral a la probeta, como se observa en la Figura 20. Esto se hace para inducir la formación de la primera grieta una vez que la impresión finalice. Se recomienda al momento de colocar la cinta térmica, no recortarla, debido a que, si la cinta no se aplica de manera completa, la probeta tiende a deformarse y la obstruir el flujo de filamento en la boquilla y provocar impresión fallida.

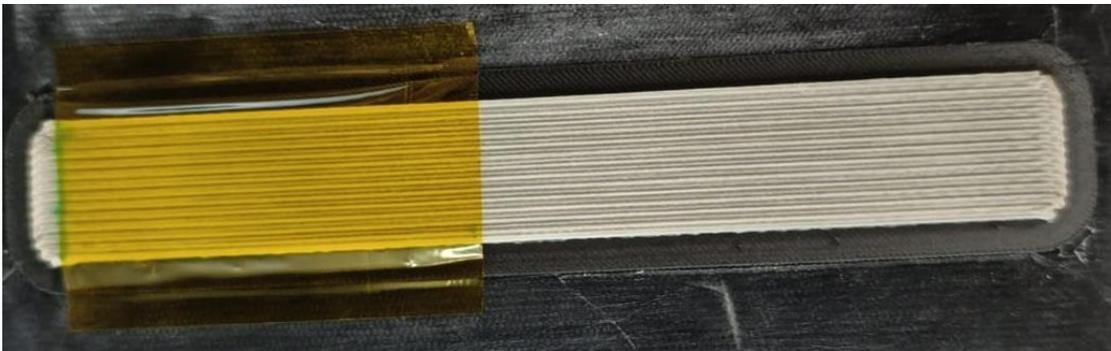


Figura 20. Aplicación de la segunda capa de cinta térmica para generar la pre-grieta.

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

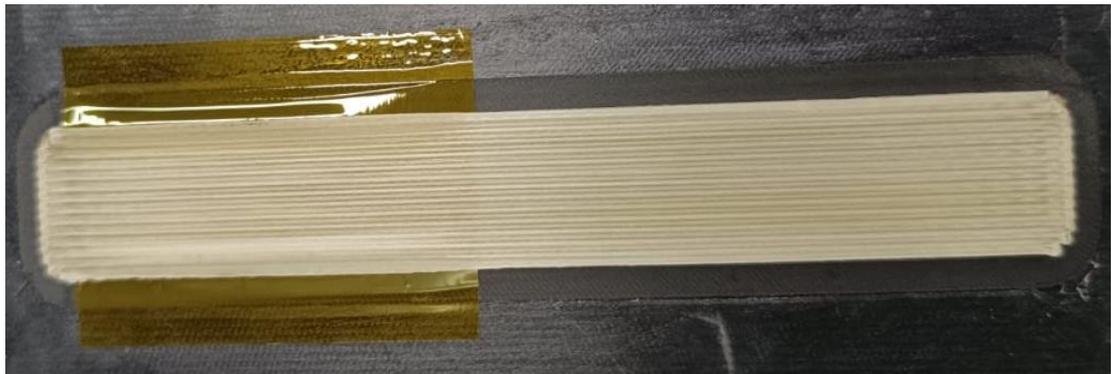


Figura 21. Finalización de la impresión de la probeta conforme normativa.

- 8) Cuando se ha completado la impresión de la probeta de fibra de vidrio, se debe retirar la plataforma de la impresora 3D utilizando una espátula adecuada, como se visualiza en la Figura 22.



Figura 22. Remoción de la probeta impresa de la base de impresión.

- 9) Al finalizar la impresión de las probetas de fibra de vidrio, se procede al corte de con máquina SMARCSHOP modelo LASERIEEX. Por cuanto, los cortes con CNC y disco de carburo de Tungsteno afectaban la estructura de la probeta y sus características mecánicas.

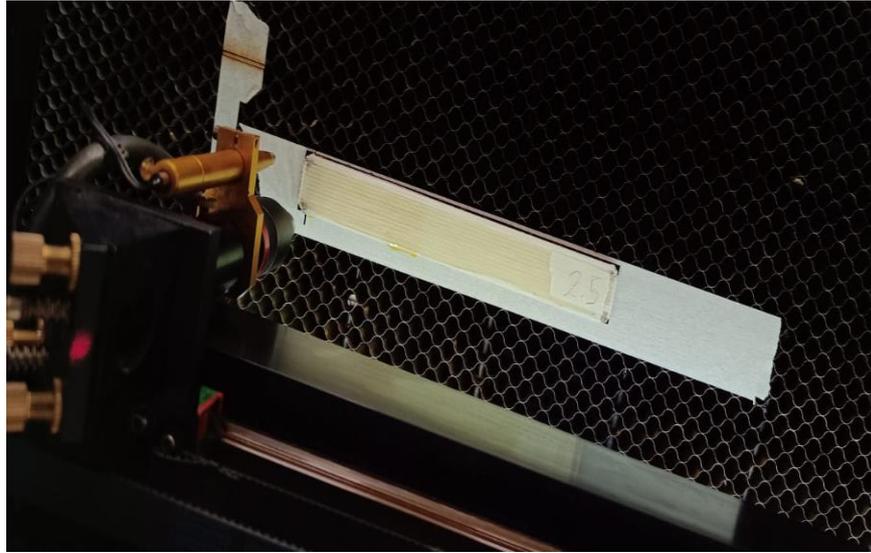


Figura 23. Corte con láser de la probeta impresa conforme medidas del ensayo.

- 10) Visualizar y marcar la grieta utilizando un estereomicroscopio de marca BOECO, modelo BSZ-405, como se ve en la Figura 24.

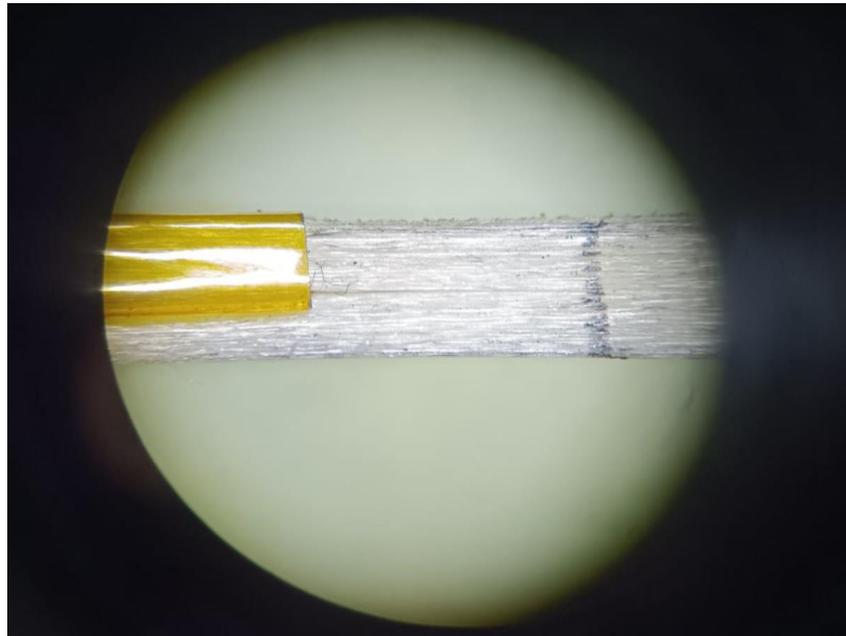


Figura 24. Marcado de la grieta mediante observación en estereomicroscopio.

- 11) Al concluir con la impresión, es necesario conservar las probetas en un *Dry Box* de marca Markforged® para evitar el contacto con la humedad o polvo. Caso

contrario, las propiedades mecánicas se alteran y el daño evidente es con los resultados del ensayo.



Figura 25. Dry Box con bolsas desecantes para capturar humedad.

6.3. Preparación de ensayos

Para preparar las probetas destinadas al ensayo de fractura en modo II, es necesario seguir un procedimiento riguroso que asegure la consistencia y fiabilidad de los resultados experimentales, a continuación, se explicara paso a paso cómo debe realizarse el ensayo de fractura modo II:

- 1) Se parte del punto de la grieta previamente marcada pintando de blanco la zona de grieta para poderla visualizar, luego, se traza una línea roja a una distancia de 3mm desde dicho punto y una línea negra a 5mm, este procedimiento facilitará la visualización de la pre-grieta durante la realización del ensayo como se muestra en la gráfica captada con microscopia óptica (Figura 26).

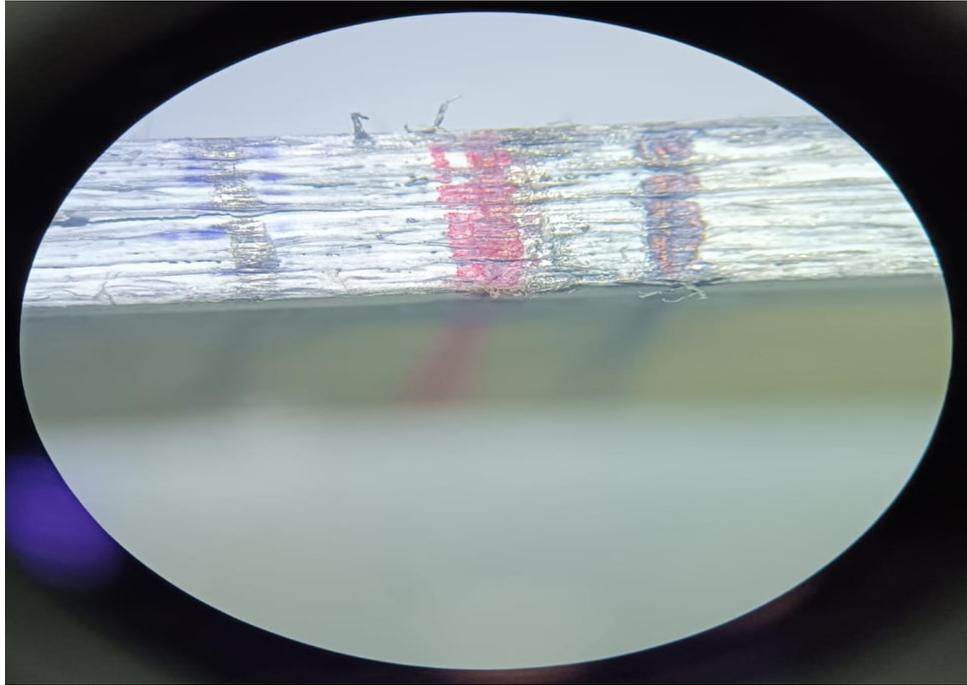


Figura 26. Posicionamiento de la pre-grieta y señalización con líneas verticales de dos colores.

- 2) El siguiente paso implica la colocación de teflón industrial entre las separaciones de los brazos de viga de la probeta. Con el fin de prevenir que las capas se adhieran durante el proceso de pegado, invalidando los resultados del ensayo.

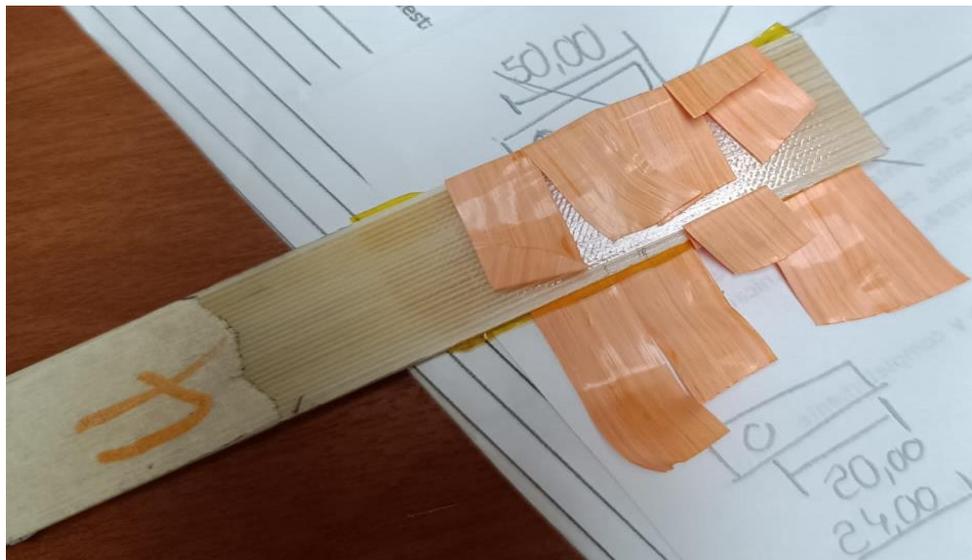


Figura 27. Colocación del teflón industrial entre los brazos de viga la probeta.

- 3) A continuación, se juntan los bloques de carga con la ayuda del adhesivo Loctite® Super Bonder Flex Gel a una distancia de 50 mm desde la grieta marcada previamente.



Figura 28. Pegado de los bloques de carga en aluminio.

- 4) Cuando las piezas de aluminio se han adherido a la probeta, se dejará secar durante 24 horas utilizando una prensa de sujeción manual, este procedimiento garantiza una óptima adhesión para prevenir el desprendimiento de las dos partes durante las pruebas.



Figura 29. Prensa manual durante el proceso de curado del pegamento.

- 5) Una vez transcurridas las 24 horas desde el proceso de pegado, el siguiente paso consiste en colocar un eje de acero plata, que por su calidad superficial y su forma redonda es ideal para unir las piezas de aluminio.

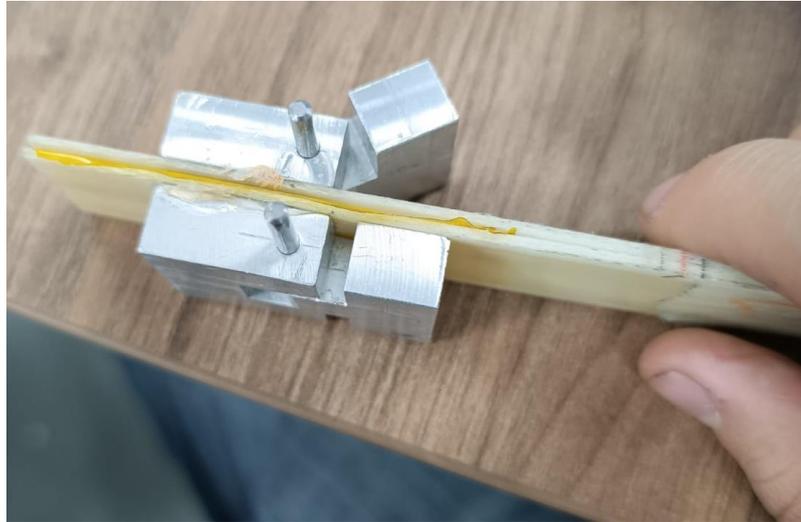


Figura 30. |Probeta con bloques de carga y utillaje de transferencia de carga.

- 6) Posteriormente, se prepara la máquina universal de ensayos SHIMADZU, para llevar a cabo el ensayo de pre-fractura mediante desplazamiento controlado.



Figura 31. Máquina de ensayos universal.

- 7) Se procede a colocar la probeta preparada en la máquina de ensayos universal para la realización del ensayo, cómo se puede observar en la Figura 32.

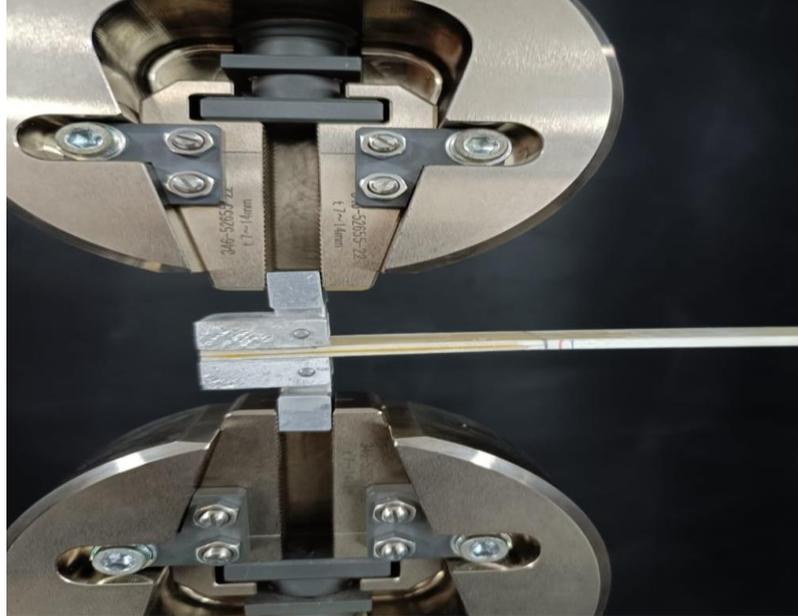


Figura 32. Ensayo de pre-fractura a desplazamiento controlado.

- 8) Con una cámara profesional Nikon, modelo D7500 equipada con un lente micro AF-S de mayor resolución, se puede realizar una observación más detallada para verificar la ubicación exacta de la grieta y asegurar que alcance a la línea roja, marcando así el final del ensayo.

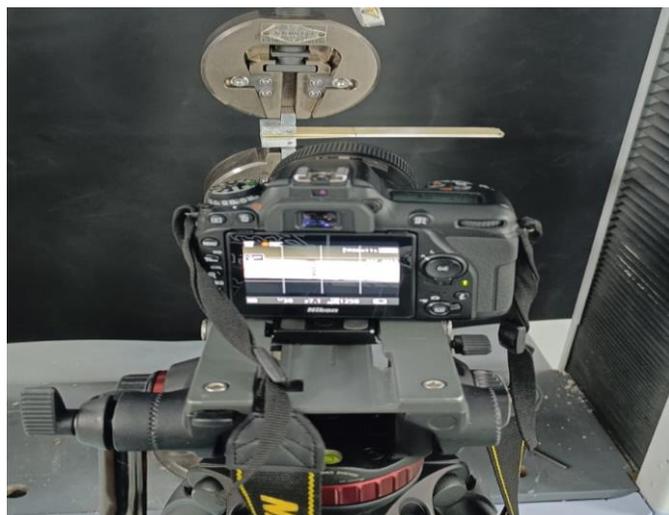


Figura 33. Cámara profesional Nikon captando el avance del frente de grieta durante el ensayo.

- 9) Una vez finalizado el ensayo de pre-fractura, con la ayuda de una entenalla de mesa, se retira las piezas de aluminio adheridas a la probeta, tal como se ve en la Figura 34, para proceder con el siguiente ensayo.



Figura 34. Remoción manual de los bloques de carga.

- 10) Una vez retiradas las piezas de aluminio del sistema de transferencia de carga, se procede a examinar la probeta bajo el estereomicroscopio para determinar el avance de la pre-grieta y marcar su extensión; este punto de referencia será crucial para el posterior ensayo de cizallamiento en el plano.

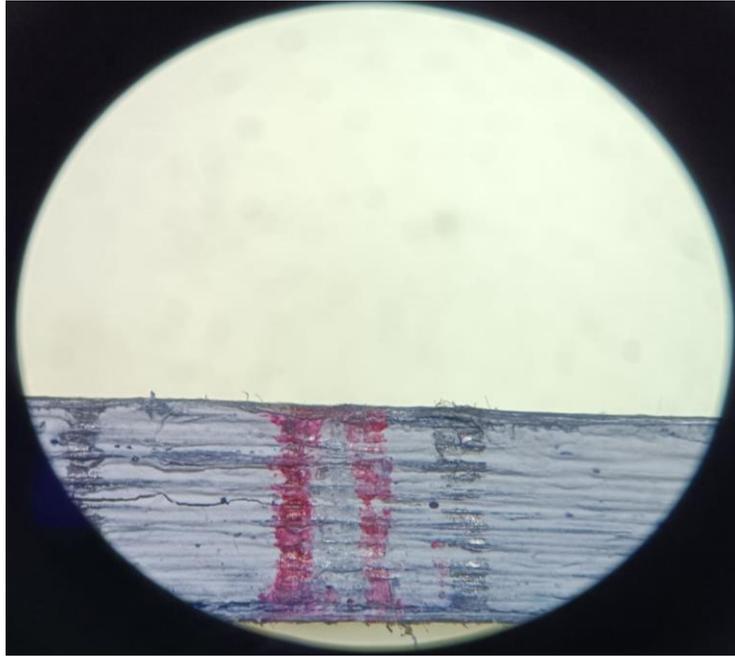


Figura 35. Marcando del alcance de la pre-grieta mediante observación óptica.

Una vez que las probetas tengan lista la pre-grieta, se someten al ensayo utilizando equipos especializados que aplican cargas controladas. Durante el procedimiento se registra minuciosamente la carga aplicada y la extensión de la grieta para determinar las propiedades de tenacidad a la fractura en modo II del material de fibra de vidrio, este proceso detallado y preciso asegura que los datos obtenidos sean confiables y puedan ser utilizados para evaluar de manera efectiva el comportamiento mecánico del material en condiciones específicas de carga. A continuación, se explica los pasos para realizar el ensayo de fractura por cizallamiento en el plano:

- 1) Para comenzar la muestra se debe colocar en el dispositivo de sujeción de la máquina de ensayos de modo que la dirección de la grieta coincida con la dirección de carga de cizalladura, fijando el percutor de manera que este nivelado y justo en la mitad de la probeta, conforme se ve en la Figura 36. Además, se

aplica una fuerza mínima para que el percutor quede fijo en el área establecida.
Se calcula las dimensiones respectivas para el ensayo.

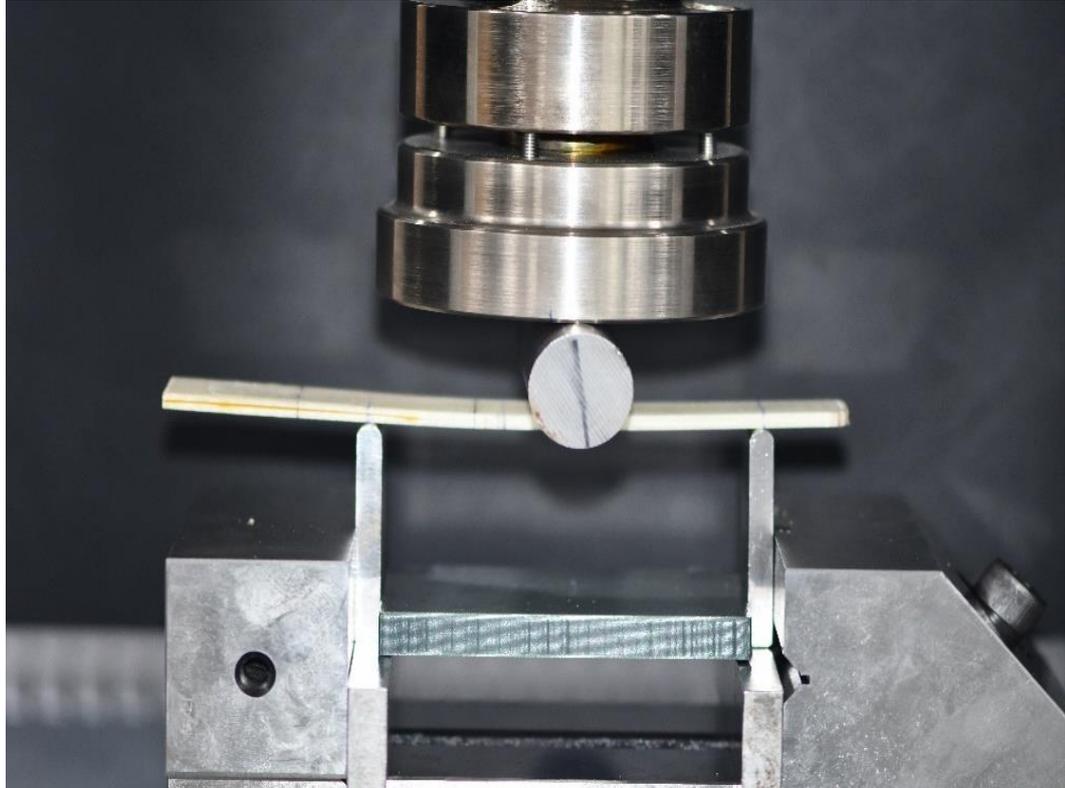


Figura 36. Probeta montada en la máquina de ensayos universal.

- 2) Después se ajusta las condiciones de carga del dispositivo como la velocidad de deformación y el rango de la fuerza que aplicaremos sobre nuestra probeta de fibra continua de vidrio. En este caso se aplica un rango de carga respetando el rango establecido en la norma del ensayo STANDARD, 2015 (STANDAR, 2015).
- 3) A continuación, se ejerce una carga de cizalladura controlada sobre la muestra a una velocidad constante, mientras se registran las fuerzas aplicadas y las deformaciones resultantes.

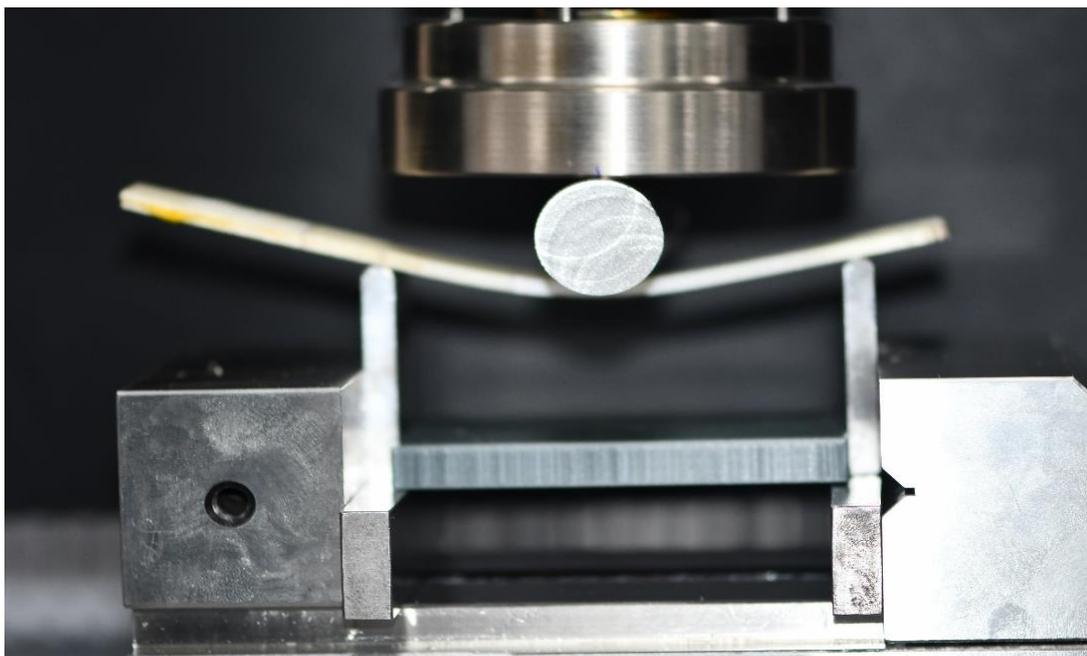


Figura 37. Probeta sometida a carga con deformación permanente.

- 4) Una vez la gráfica de fuerza/desplazamiento (N/mm) del ensayo deje de crecer linealmente, se da por finalizado el ensayo, para concluir se desmonta la probeta y se guarda en la Drybox para que no esté expuesta a la humedad o el polvo, para su posterior análisis en el SEM.

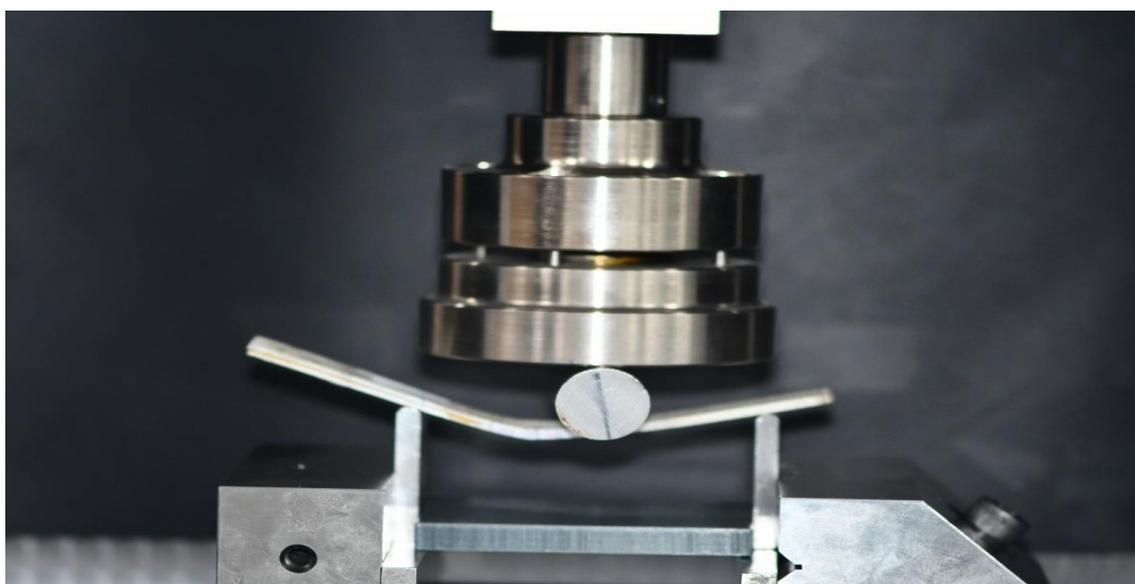


Figura 38. Ensayo finalizado ante fallo catastrófico de la muestra.

6.4. Reducción numérica de datos experimentales

La reducción numérica de los datos del ensayo de fractura en modo II es esencial para obtener una comprensión detallada del comportamiento mecánico de los materiales bajo cargas críticas a la cual es sometida en el ensayo de fractura por cizallamiento en el plano, este proceso permite analizar y cuantificar cómo se desarrolla la grieta en el material cuando está expuesta a cargas específicas, proporcionando datos precisos sobre su resistencia y tenacidad a la fractura.

La aplicación de métodos numéricos nos facilita modelar y simular el proceso de fractura, lo cual es crucial para diseñar componentes estructurales seguros y eficientes, al entender cómo varían factores claves durante la fractura, tal como la energía absorbida y la extensión de la pre-grieta, se puede optimizar el diseño de materiales y estructuras para mejorar su resistencia y durabilidad, esto no solo reduce los costos de desarrollo al minimizar pruebas físicas, sino que también ofrece una evaluación detallada y precisa del rendimiento del material.

Además, la reducción numérica de datos permite, comparar objetivamente diferentes materiales y configuraciones de diseño, identificando aquellos que ofrecen el mejor desempeño en términos de resistencia a la fractura en modo II. En síntesis, la reducción numérica de datos del ensayo de fractura en modo II representa un avance fundamental hacia el desarrollo de materiales más avanzados y estructuras más seguras y confiables en diversas aplicaciones industriales.

A continuación, se detallará concisamente el procedimiento realizado para la reducción numérica:

- 1) Durante el ensayo, la computadora registra meticulosamente los datos de fuerza aplicada y el desplazamiento lateral al que está sometida la probeta. Al finalizar la prueba, se genera una ficha técnica detallada y un archivo de Microsoft Office Excel™ con los datos recopilados, proporcionando un registro exhaustivo de los parámetros medidos durante el ensayo, como se indica en los anexos.
- 2) Con los datos obtenidos anteriormente, se procede a realizar la gráfica de fuerza/desplazamiento (N/mm), esto permite tener una visión más precisa y detallada de los resultados obtenidos durante el ensayo, facilitando el análisis y la interpretación de los comportamientos observados en la probeta.

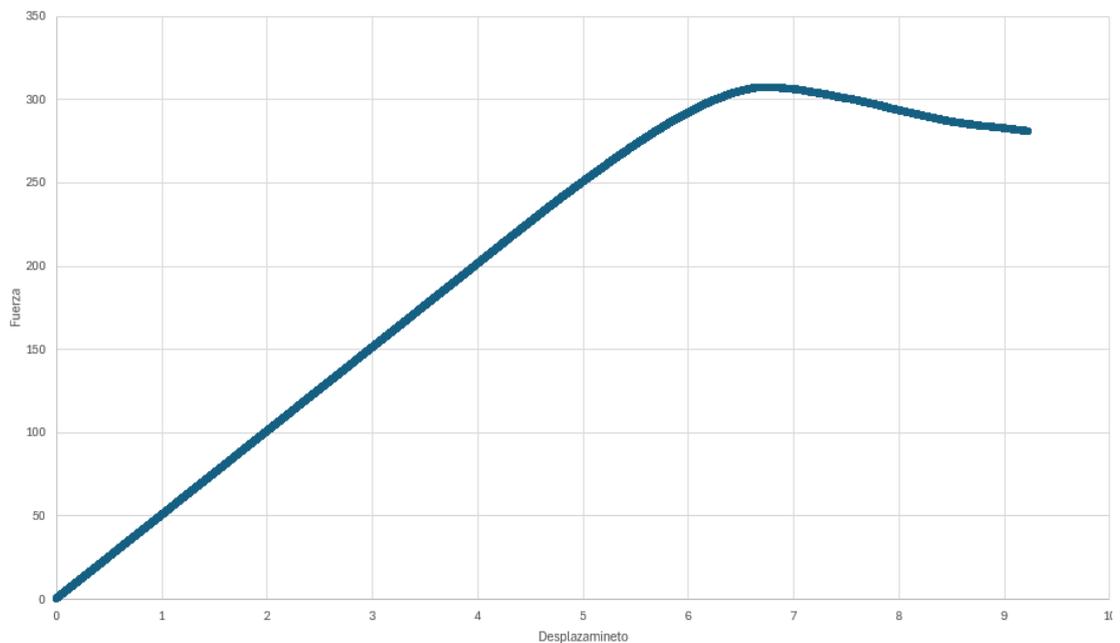


Figura 39. Gráfica fuerza/desplazamiento (N/mm) de una muestra ensayada.

- 3) Finalmente, se interpretan los resultados obtenidos, realizando un análisis comparativo de las gráficas obtenidas de cada una de las probetas, así como de la carga máxima que soportaron. Este análisis proporciona una visión más clara del

comportamiento de la fibra de vidrio en ensayos de tenacidad a la fractura en modo II y cómo estos resultados pueden influir en su aplicación práctica en estructuras reforzadas.

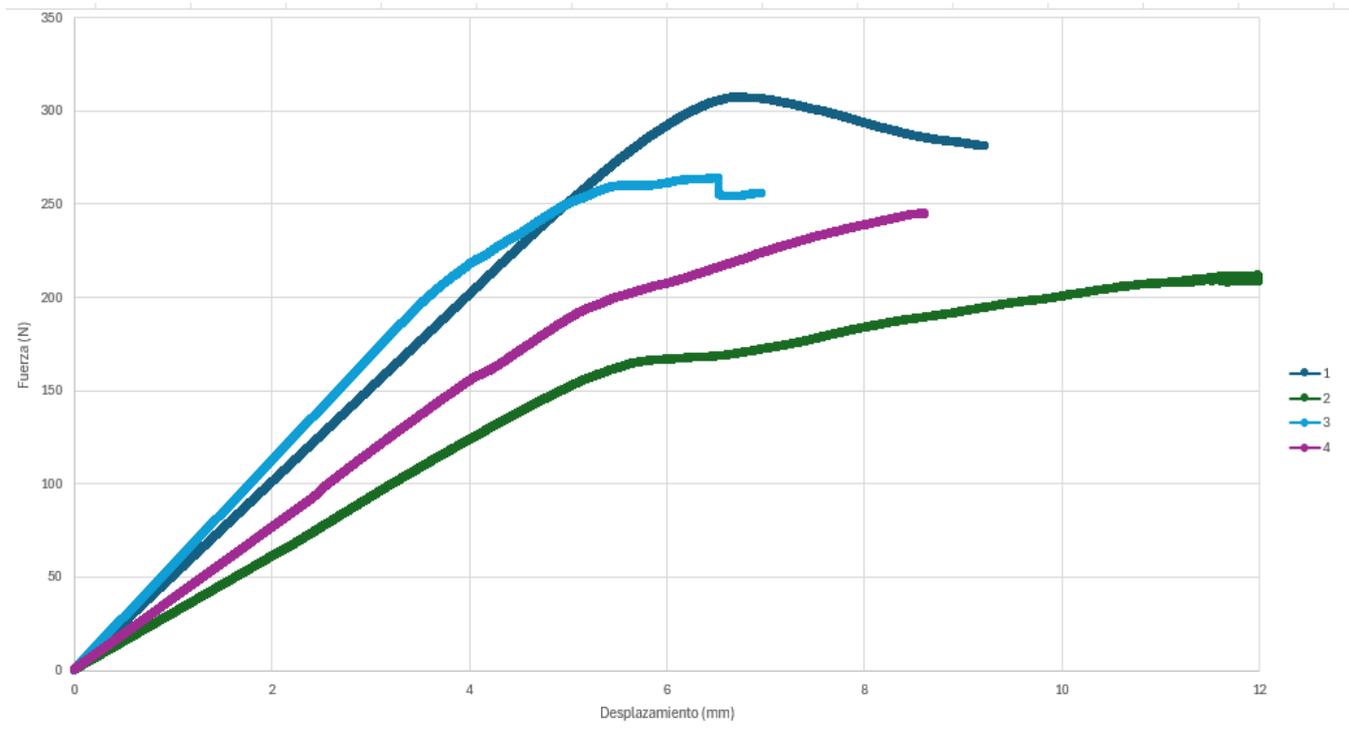


Figura 40. Compendio de gráficas fuerza/desplazamiento de las 4 probetas ensayadas.

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	307,19
2	212,80
3	264,03
4	244,79

6.5. Reducción estadística de datos representativos

La reducción de datos del ensayo en Excel™ requiere una serie de pasos críticos para convertir los datos brutos del experimento en información útil y precisa, primero, se importan los datos registrados por la máquina de ensayos universal, los cuales incluyen la fuerza aplicada, el desplazamiento de la probeta y el tiempo que transcurrió durante el ensayo.

Inicialmente, se trasladan los datos de tiempo, desplazamiento y fuerza a la hoja de cálculo donde haremos la reducción de datos. A continuación, se identifica la fuerza máxima aplicada durante el ensayo, utilizando funciones de Excel™ para determinar la posición exacta de este dato, después con la ayuda de un calibrador medimos el ancho de nuestras probetas. Con esta información, se calcula la resistencia a la fractura de cada probeta y para finalizar de las 4 probetas obtenemos un promedio de la tenacidad a la fractura en modo dos, G_{1lc} , para determinar la resistencia a la fractura de la fibra continua de vidrio.

- I. Con la ayuda del calibrador se toma las medidas a la probeta y se saca un promedio de estas.

Tabla 2. Medidas de la probeta

Medidas finales de la probeta			
Ancho 1 (mm)	24,42	Espesor 1 (mm)	3,47
Ancho 2 (mm)	24,45	Espesor 2 (mm)	3,41
Ancho 3 (mm)	24,57	Espesor 3 (mm)	3,36
Promedio (mm)	24,48	Promedio (mm)	3,41

- II. Con base en los datos recopilados, se procede al cálculo de la tenacidad a la fractura del compuesto de fibra de vidrio continua según los resultados obtenidos en el ensayo.

Tabla 3. Cálculo de la G_{IIC}

Parámetros de reducción de datos	
Fuerza máxima (N)	244,79
Desplazamiento máximo (mm)	8,60
Longitud grieta (mm)	35
Longitud (mm)	100
G_{IIC} (J/m ²)	1253,18

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

Para la investigación de la caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo II para la fibra continua de vidrio, la utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM) proporcionará varias ventajas y beneficios claves:

- **Análisis microestructural:** el SEM permitirá una observación detallada de la microestructura de las muestras de fibra de vidrio con alta resolución, se podrán identificar detalles finos de la superficie y la morfología de las fibras, así como su distribución y orientación dentro de la matriz polimérica, esta información es esencial para comprender cómo las características microestructurales influyen en las propiedades mecánicas y el comportamiento bajo carga de las muestras.
- **Identificación de defectos y mecanismos de fractura:** tras los ensayos de fractura, el SEM permitirá examinar las superficies de fractura con gran detalle, se podrán identificar defectos, delaminaciones, microgrietas y otros mecanismos de fallo. Esta observación detallada permitirá correlacionar los resultados de los ensayos con los mecanismos de fractura observados, proporcionando una comprensión más profunda de cómo y por qué se produce la fractura en las muestras reforzadas con fibra de vidrio.

- **Validación de resultados experimentales:** el análisis con SEM permitirá validar y complementar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, al observar directamente las características superficiales y las fracturas interlaminares a nivel microscópico, se podrá confirmar la presencia de fenómenos específicos que afectan la tenacidad a la fractura, esto reforzará la solidez y fiabilidad de las conclusiones y recomendaciones en cuanto al uso de fibra de vidrio en la mejora de estructuras históricas.

En resumen, la utilización del SEM en la presente investigación proporciona una herramienta útil para el análisis detallado de muestras, facilitando una comprensión completa de los comportamientos estructurales y los mecanismos de fallo a nivel microestructural, lo cual es fundamental para el éxito del estudio y la aplicabilidad de los hallazgos. A continuación, se detalla brevemente los pasos necesarios para usar el SEM:

- 1) Se inicia con la fragmentación de la superficie de las muestras ensayadas, a partir de los 10 mm de la pre-grieta, con la finalidad de observar la mecánica de fallo y morfología de fractura sin modificar sus condiciones ensayadas, además, considerando las dimensiones físicas de la prueba en el portaobjetos del equipo SEM. Para realizar este procedimiento, es imprescindible el uso de guantes de látex al momento de manipular la probeta y evitar su contaminación.

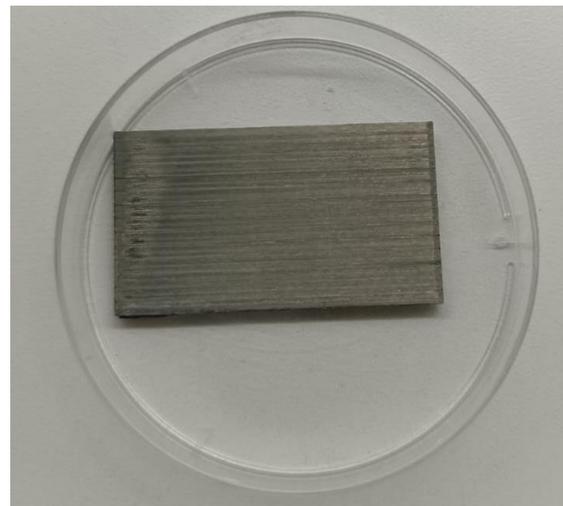


Figura 41. Ruptura manual de las probetas en el plano de fractura.

- 2) Una vez que la probeta ha sido cortada, se procede con el recubrimiento de oro utilizando la máquina Cressington Sputter Coater modelo 108 Auto. Este recubrimiento de oro se aplica para mejorar la conductividad eléctrica de la probeta, lo que facilita el movimiento de los electrones durante el análisis, esta etapa es crucial para asegurar una visualización clara y precisa en el SEM.



a)



b)

Figura 42. Recubrimiento de oro a la probeta

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

- 3) El siguiente paso consiste en montar la probeta recubierta de oro en el porta muestras del SEM utilizando cinta de carbono, para facilitar la conexión eléctrica entre probeta y porta muestras, asegurando así, que la muestra esté correctamente posicionada y fijada durante el análisis en el SEM.

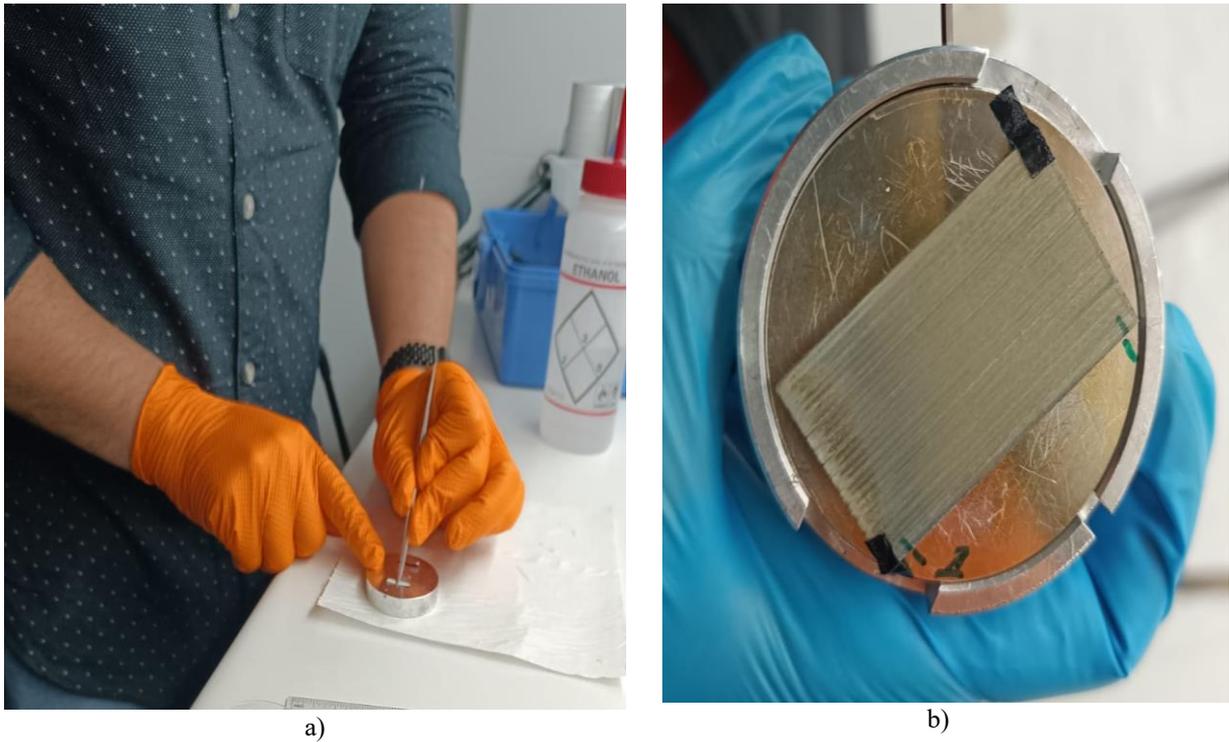


Figura 43. Ensamblaje de la muestra

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

- 4) Una vez la muestra esté montada se procede a colocarla en el SEM. Para el análisis deseado, se procede con el deslizamiento de fibras en la muestra utilizando un aumento de 500 en el microscopio.

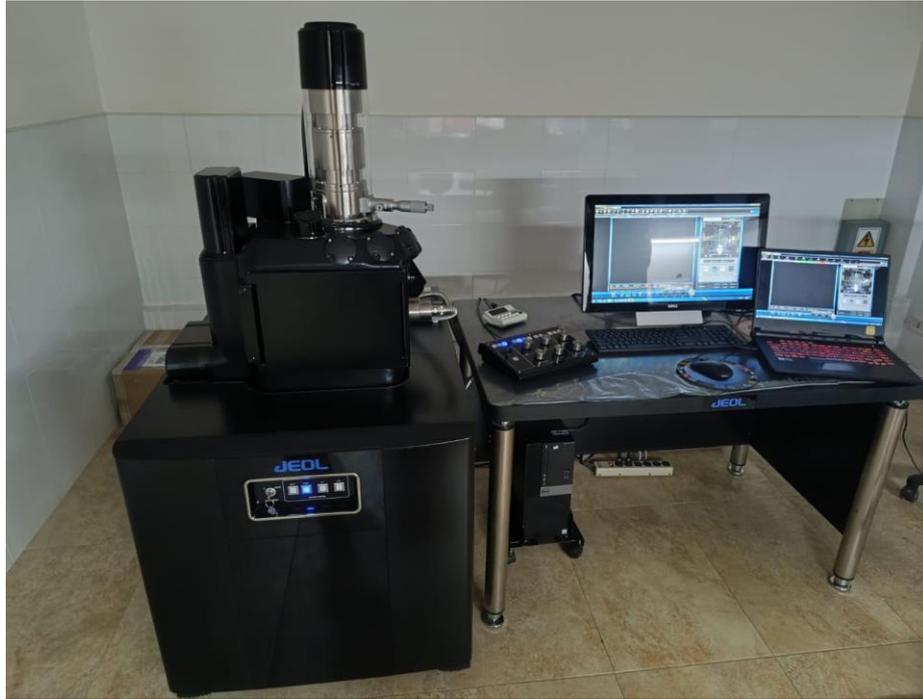


Figura 44. SEM de marca Jeol, modelo IT300

- 5) El procedimiento de búsqueda de deslizamientos de fibras es prolongado y laborioso, con un tiempo promedio de aproximadamente tres horas por muestra, es importante considerar que durante esta búsqueda la máquina puede desenfocarse en múltiples ocasiones, por ello es esencial tener calibrado el joystick de enfoque del SEM para ajustar rápidamente y mantener la claridad de la imagen durante el análisis.

- 6) Una vez que se identifique una zona que presente deslizamiento de fibras, se procede a enfocarla adecuadamente, se registran las coordenadas exactas de la ubicación y se captura una imagen detallada de la falla para su posterior análisis.

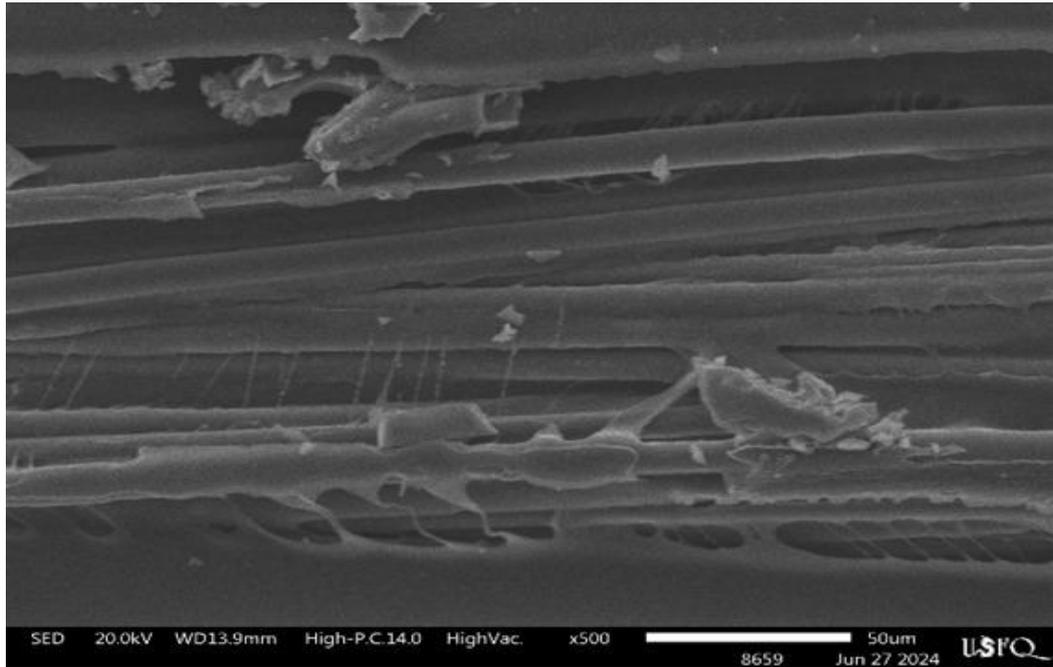


Figura 45. Captura de la superficie de fractura mediante SEM a x500 de magnificación.

- 7) Una vez que se identifique la zona con deslizamiento de fibras, se ajusta el SEM a un aumento de x20 y se captura una imagen más precisa la zona donde ocurrió la falla, aprovechando las dos pantallas integradas en el sistema para un análisis detallado.

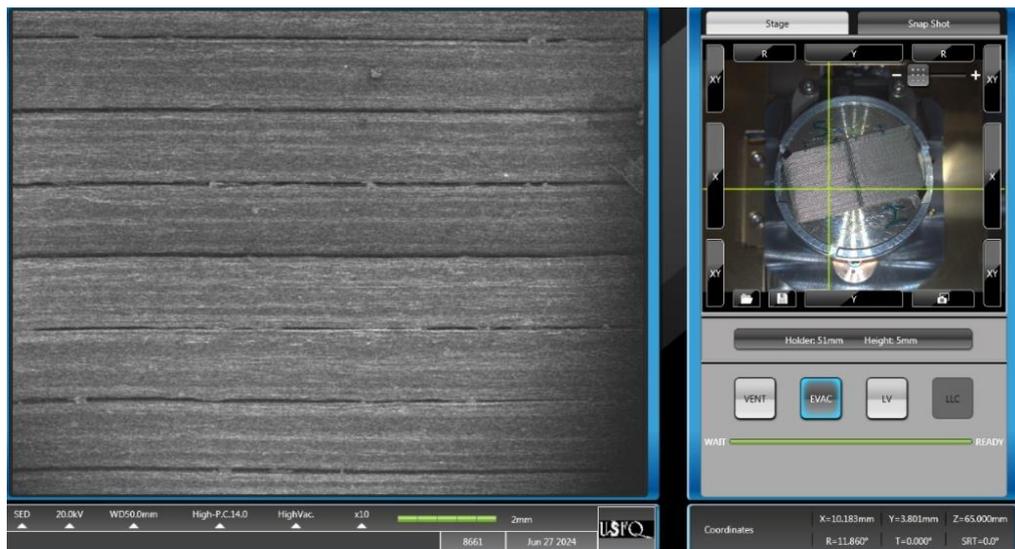


Figura 46. Captura de la zona de fractura de la muestra mediante SEM a x20 de amplificación.

- 8) Para finalizar, una vez se hayan capturado todas las imágenes necesarias para el análisis, se procede a retirar la muestra del SEM. Se desmonta cuidadosamente la muestra y se coloca en un envase plástico, el cual es guardado en un desecador. Este procedimiento asegura que la muestra se mantenga en un ambiente fresco y completamente libre de humedad.

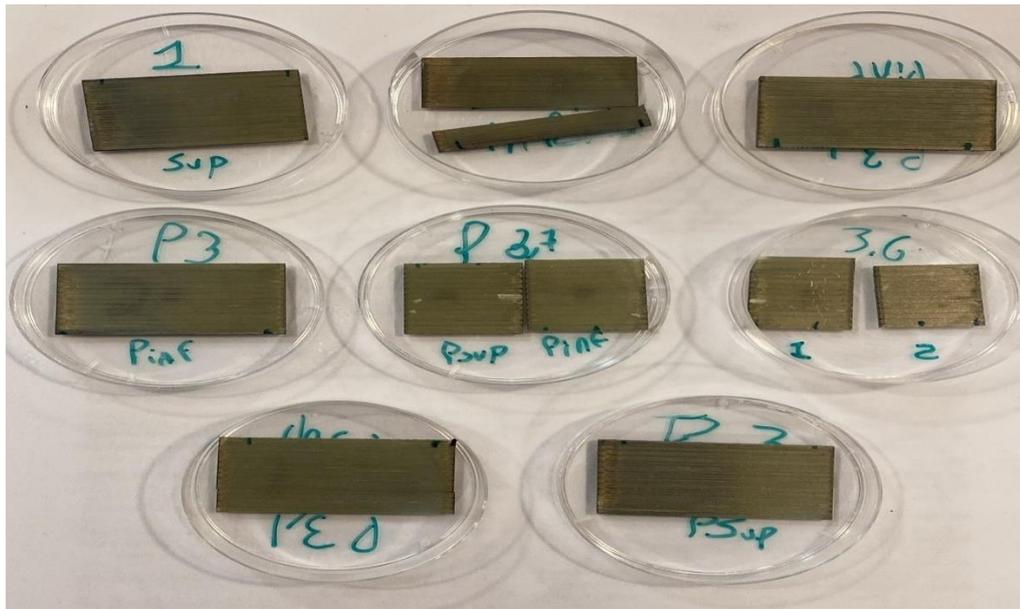


Figura 47. Muestras guardadas en el desecador.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1. Análisis de las gráficas de fuerza desplazamiento

La representación gráfica de fuerza versus desplazamiento para las cuatro probetas ensayadas ofrece una perspectiva clara del comportamiento de la fibra de vidrio bajo esfuerzos de cizallamiento, a continuación, se realiza un análisis detallado de cada curva y cómo la carga máxima soportada influye en la caracterización mecánica de la fibra de vidrio en modo II, como se observa en la Figura 49.

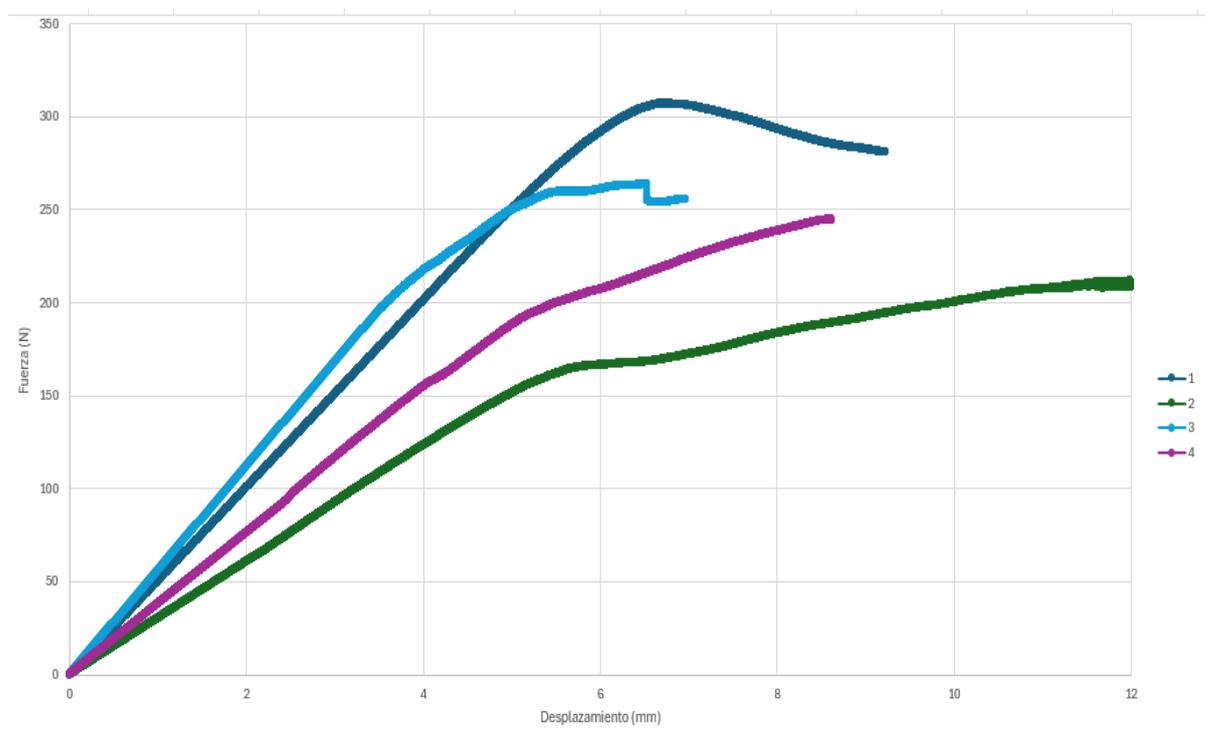


Figura 48. Gráfica fuerza/desplazamiento (N/mm) del lote de probetas ensayadas.

Análisis del comportamiento individual de las curvas:

Para la Probeta 1, se observa que alcanza una carga máxima cercana a los 300 N con un desplazamiento máximo de aproximadamente 9 mm, este comportamiento inicialmente lineal seguido de una disminución gradual de la pendiente sugiere una excelente capacidad

de deformación antes de la falla completa, la alta carga máxima indica una resistencia robusta al cizallamiento y una efectiva adhesión Inter fibras.

En cuanto a la Probeta 3, muestra una carga máxima cercana a los 250 N y un desplazamiento máximo de alrededor de 7 mm. Similar a la 3-1, exhibe una capacidad de carga destacada con una transición gradual hacia la falla, las diferencias en la carga máxima entre la 1 y la 3 podrían atribuirse a variaciones en la microestructura o la calidad del material.

La Probeta 4 alcanza una carga máxima cercana a los 240 N con un desplazamiento máximo de aproximadamente 8 mm, Aunque presenta una carga máxima menor, muestra un significativo desplazamiento antes de la falla, indicando una mayor ductilidad, pero una resistencia al cizallamiento más limitada en comparación con las anteriores.

Por otro lado, la Probeta 2 muestra una carga máxima cercana a los 200 N, debido a que su comportamiento fue el más alejado de los otros no se lo va a considerar para el análisis final

Resistencia al cizallamiento:

- Las probetas que alcanzan cargas máximas más elevadas (1 y 3) indican una mayor resistencia al cizallamiento, 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 4) exhiben una resistencia reducida, posiblemente debido a una menor calidad en la adhesión Inter fibras o a la presencia de defectos estructurales que debilitan el material.

Calidad del enlace inter facial de fibras:

Las variaciones en la resistencia máxima y el comportamiento no lineal después del punto máximo de carga pueden estar vinculadas a la calidad del enlace entre las fibras. Las probetas con una mejor adhesión Inter fibras mostrarán mayores fuerzas máximas y una resistencia más consistente ante cargas de cizallamiento.

En conclusión, la combinación de los resultados de las gráficas de fuerza/desplazamiento y las observaciones de SEM ofrece una comprensión detallada de la caracterización mecánica de la fibra de vidrio en modo II, las probetas que muestran mayores cargas y desplazamientos máximos indican una mayor resistencia al cizallamiento y una adecuada ductilidad, reflejando una microestructura más sólida y una mejor adhesión interfacial de fibras. Por el contrario, las probetas con menor capacidad de carga y desplazamiento sugieren la presencia de defectos y una interacción Inter fibras menos eficiente, resultando en un comportamiento más frágil bajo esfuerzos de cizallamiento, estos hallazgos destacan la importancia de optimizar tanto la calidad del material como los procesos de fabricación para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos de fibra de vidrio.

7.2. Análisis de las cargas máximas

La Tabla 1 que se presenta detalla la fuerza máxima que cada probeta de fibra de vidrio pudo soportar durante el ensayo de cizallamiento, los valores específicos son los siguientes:

Comparación de la resistencia al cizallamiento:

- La Probeta 1 exhibe la mayor resistencia al cizallamiento con una fuerza máxima de 307,1944 N, este resultado sugiere una excelente cohesión y adhesión interfacial de fibras, indicando una microestructura robusta y una eficiente transferencia de carga entre las fibras.

- Por otro lado, la Probeta 2 muestra la menor resistencia al cizallamiento entre las probetas ensayadas, con una fuerza máxima de 212,80 N, esto puede indicar la presencia de defectos o una menor calidad en la adhesión interfacial de fibras, reflejando una microestructura más débil y menos eficiente en la transferencia de carga.
- La Probeta 3 presenta una resistencia al cizallamiento intermedia, con una fuerza máxima de 264,0311 N, aunque no alcanza el nivel de la Probeta 1, muestra una buena cohesión con áreas potenciales de mejora en la microestructura.
- Similarmente, la Probeta 4 exhibe una resistencia intermedia de 244,79 N, ligeramente menor que la Probeta 2 pero superior a la Probeta 3, esto sugiere variaciones en la calidad del material o en el proceso de fabricación que afectan la resistencia al cizallamiento.

Resistencia al cizallamiento:

- La Probeta 1, con la mayor fuerza máxima, representa el estándar de mayor resistencia, indicando una óptima interacción entre las fibras y la matriz para resistir el cizallamiento.
- En contraste, la Probeta 2, con la menor fuerza máxima, resalta la variabilidad en la resistencia al cizallamiento que puede atribuirse a diferencias en la microestructura y calidad del material.

La tabla de fuerza máxima ofrece una visión cuantitativa de la resistencia al cizallamiento de las probetas de fibra de vidrio. La variabilidad observada subraya la importancia de la calidad del material y del proceso de fabricación en la caracterización mecánica, estos

resultados, junto con las observaciones de SEM y las gráficas de fuerza/desplazamiento, proporcionan una comprensión integral del comportamiento mecánico de la fibra de vidrio en modo II, señalando áreas clave para la mejora y optimización del material.

7.3. Análisis de los resultados del SEM

Análisis zona 1

La imagen proporcionada muestra una probeta de fibra de vidrio vista a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) a un aumento de 500x., esta revela detalles sobre la estructura de la fibra de vidrio y su comportamiento bajo el ensayo de fractura en modo II.

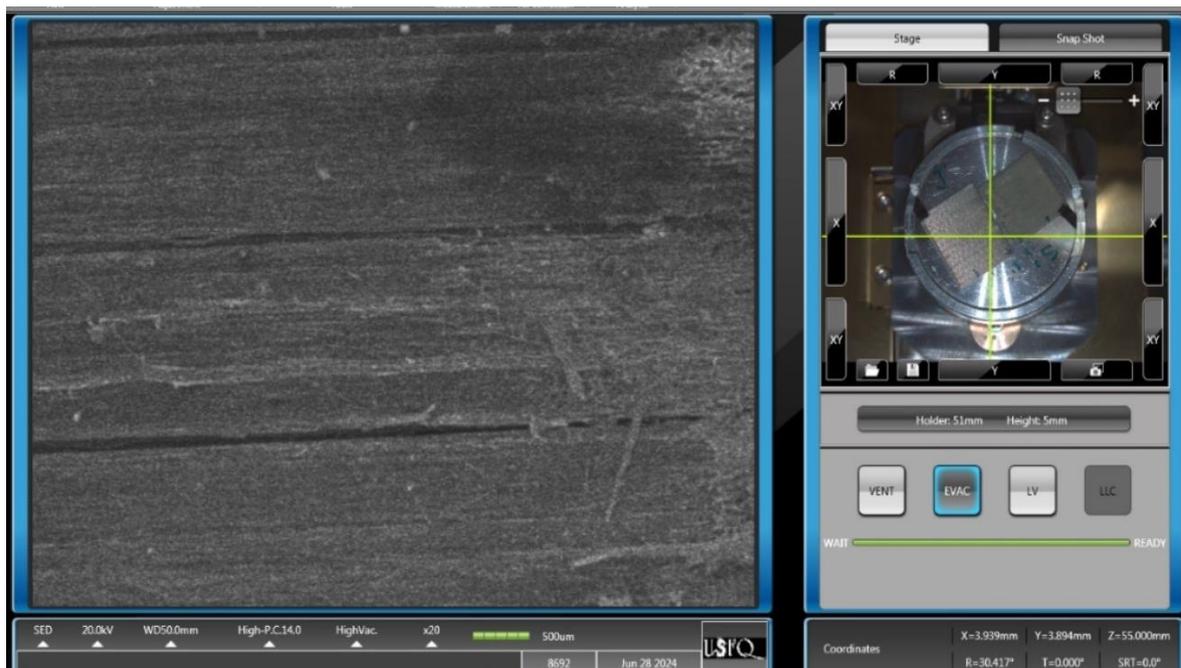


Figura 49. Zona de inspección 1 mediante SEM a x20 de amplificación.

1) Deslizamiento de fibras

En la imagen podemos observar el comportamiento mecánico del material compuesto, se observa la separación y desalineación de las fibras dentro de la matriz de polímero,

indicando un movimiento relativo significativo, este deslizamiento ocurre cuando la carga aplicada excede la capacidad de adhesión de la interfase matriz-fibra, facilitando la propagación de microgrietas y la fricción interlaminar. Las superficies rugosas y fracturadas visibles en la imagen son evidencia adicional del deslizamiento y de las microfracturas inducidas durante el ensayo.

El deslizamiento de fibras actúa como un mecanismo de disipación de energía, incrementando la tenacidad a la fractura del material al absorber la energía que de otro modo causaría una fractura catastrófica, sin embargo, un deslizamiento excesivo puede comprometer la integridad estructural del material. La calidad de la interfase y la resistencia de la unión matriz-fibra son factores determinantes para controlar este deslizamiento, en este contexto, el análisis detallado de las imágenes del SEM permite evaluar la efectividad de la interfase en la transferencia de carga y la capacidad del material compuesto para resistir la propagación de grietas bajo carga en modo II.

Comprender y cuantificar el deslizamiento de fibras es esencial para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de fibra de vidrio, los resultados obtenidos a través del análisis del SEM proporcionan información valiosa para el diseño y la optimización de estos materiales, permitiendo ajustes en el proceso de fabricación y en la selección de materiales para mejorar la tenacidad a la fractura y la durabilidad de las estructuras reforzadas con fibra de vidrio.

2) Fragmentación y rotura de fibras:

La fragmentación y roturas de fibras observadas en la imagen del SEM de las probetas de fibra de vidrio sometidas a un ensayo de fractura en modo II proporciona información crucial

sobre el comportamiento del material bajo condiciones de estrés extremo, las micrografías muestran claramente las fibras individuales que han sufrido fracturas y fragmentación, lo cual indica que las cargas aplicadas durante el ensayo superaron la resistencia última de las fibras. Estas fracturas y fragmentaciones son características de materiales compuestos bajo esfuerzos de cizallamiento elevados, señalando la ocurrencia de fallos en la matriz y en la interfaz fibra-matriz, donde se transfiere la carga.

La fragmentación de fibras puede actuar como un mecanismo de absorción de energía, así como una indicación de un fallo inminente en el material compuesto, la energía de fractura se disipa a través de la creación de nuevas superficies cuando las fibras se fragmentan, contribuyendo así a la tenacidad del material. Sin embargo, una fragmentación excesiva y la ruptura de múltiples fibras indica una pérdida significativa de capacidad de carga y una reducción en la integridad estructural del compuesto, la fractura de fibras es generalmente un evento catastrófico, donde la carga no puede ser redistribuida eficientemente entre las fibras restantes, conduciendo a una falla rápida y potencialmente destructiva del material.

El análisis detallado de las roturas y fragmentaciones de fibras en las imágenes SEM es fundamental para comprender los mecanismos de falla y mejorar las propiedades del material compuesto, este conocimiento permite optimizar el diseño de los materiales y los procesos de fabricación, buscando mejorar la resistencia a la fractura y la durabilidad de las estructuras reforzadas con fibra de vidrio, además, la identificación precisa de las áreas donde se producen estas fallas puede guiar el desarrollo de tratamientos de superficie y mejoras en la interfase fibra-matriz, incrementando así la capacidad del material para resistir cargas en aplicaciones estructurales exigentes. Para concluir la delaminación observada

podría haber contribuido al deslizamiento de las fibras, ya que una interfase débil facilita el movimiento relativo entre las fibras y la matriz.

3) Rugosidad de la superficie:

La rugosidad observada en las imágenes SEM revela características significativas sobre la superficie del material y su comportamiento bajo condiciones de estrés, esta rugosidad, que incluye ondulaciones y superficies irregulares en las fibras, es indicativa de los mecanismos de fractura y del nivel de interacción entre las fibras y la matriz durante el ensayo. La presencia de estas características rugosas sugiere que la fractura no fue uniforme y que el material experimentó una combinación de modos de falla, incluyendo cizallamiento, separación de la interfase y deslizamiento de fibras.

La rugosidad superficial tiene implicaciones importantes para la resistencia y durabilidad del material compuesto. Las superficies rugosas pueden aumentar la fricción interna y la resistencia al deslizamiento entre las fibras y la matriz, lo cual contribuye a la absorción de energía durante el proceso de fractura, no obstante, también puede indicar la presencia de micro fisuras y otras imperfecciones que actúan como puntos de inicio para futuras fallas bajo cargas cíclicas o continuas, desde una perspectiva de ingeniería, entender y controlar la rugosidad es esencial para mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto, optimizando tanto su resistencia como su capacidad de deformación.

El análisis detallado de la rugosidad superficial a nivel microscópico permite a los ingenieros y científicos de materiales desarrollar estrategias para mejorar el rendimiento del compuesto. Por ejemplo, pueden implementarse técnicas de tratamiento de superficie para suavizar las fibras antes de su incorporación en la matriz, reduciendo así los puntos de estrés

concentrado, además, el control de los procesos de manufactura para minimizar la creación de superficies rugosas durante la fabricación puede resultar en materiales más homogéneos y con mejores propiedades mecánicas, en última instancia, el objetivo es crear materiales compuestos de fibra de vidrio que no solo sean fuertes y duraderos, sino también predecibles y confiables en su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

4) Interpretación de resultados

La imagen vista por el SEM de la probeta de fibra de vidrio sometida al ensayo de fractura en modo II ofrece una interpretación valiosa de los mecanismos de falla y el comportamiento del material bajo carga, la imagen revela una estructura detallada de las fibras y la matriz, mostrando claramente signos de deslizamiento y ruptura de fibras, estas observaciones indican que durante el ensayo, el material experimentó esfuerzos significativos de cizallamiento, resultando en la separación y el desplazamiento de las fibras. La visualización precisa de estas áreas de deslizamiento es esencial, ya que destaca la capacidad del material para absorber energía y redistribuir el estrés, factores que pueden mejorar la tenacidad del compuesto.

Además, la presencia de fibras fracturadas y superficies rugosas en la imagen SEM sugiere que la fractura no fue uniforme, estas fracturas probablemente surgieron debido a la concentración de tensiones en puntos específicos, llevando a la fractura individual de las fibras, la rugosidad observada en las fibras refleja una interacción compleja entre estas y la matriz, donde la energía de fractura se disipa a través de varios mecanismos, incluyendo tracción, cizallamiento y separación interfacial. Esta información es crucial para entender la mecánica de fractura del material y para el diseño de compuestos más robustos y duraderos.

Al identificar las áreas críticas de deslizamiento y podremos ajustar los procesos de fabricación y la composición del material para minimizar estos fallos y mejorar la integridad estructural del compuesto, igualmente los datos obtenidos pueden ser utilizados para desarrollar modelos predictivos que anticipen el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga. En resumen, la micrografía SEM no solo ofrece una visión precisa de la microestructura del material, sino que también proporciona una guía práctica para la optimización y mejora de los compuestos de fibra de vidrio en aplicaciones de ingeniería avanzada.

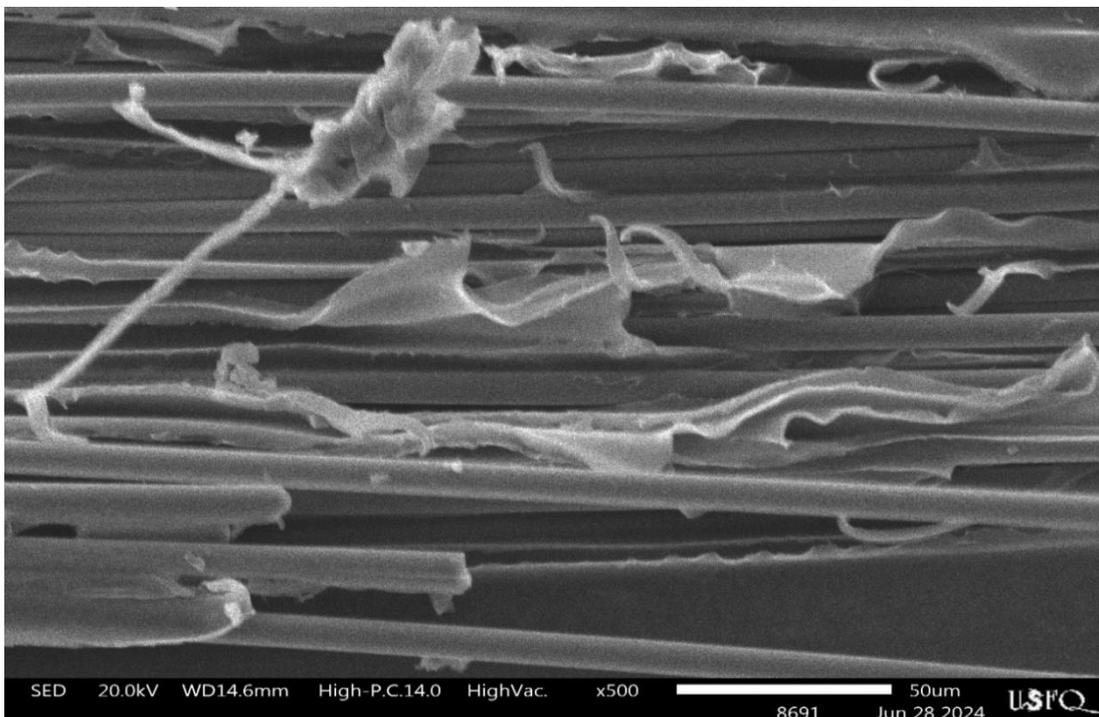


Figura 50. Zona de inspección 1 mediante SEM a x500 de amplificación.

A continuación, un breve resumen de los resultados vistos

- Comportamiento mecánico: el deslizamiento de fibras observado sugiere que, bajo las condiciones del ensayo de fractura en modo II, la fibra de vidrio exhibe una

capacidad significativa de disipar energía a través del deslizamiento interlaminar, esto puede ser beneficioso en aplicaciones donde se requiere una alta tenacidad a la fractura.

- **Eficiencia del refuerzo:** La fractura y deslizamiento de las fibras indican que la fibra de vidrio está actuando como un refuerzo efectivo hasta cierto punto, pero que la adhesión con la matriz de polímero podría ser un área de mejora para optimizar el desempeño mecánico.
- **Aplicaciones prácticas:** Basado en los resultados obtenidos, la fibra de vidrio muestra un comportamiento prometedor como material de refuerzo sísmico para las estructuras del centro histórico de Cuenca. La capacidad de la fibra de vidrio para absorber energía mediante mecanismos como el deslizamiento interfacial y la fractura controlada de fibras sugiere que podría mejorar significativamente la resistencia y la capacidad de deformación de las estructuras existentes. La micrografía electrónica reveló una interacción compleja entre las fibras y la matriz, indicando que el material puede soportar cargas sísmicas mediante la disipación efectiva de energía y la redistribución de esfuerzos, aspectos cruciales para la mitigación de daños durante eventos sísmicos además, la capacidad de la fibra de vidrio para resistir la fractura bajo condiciones de carga extrema y su comportamiento predecible ante diferentes modos de fractura proporcionan una base sólida para su aplicación en la restauración y fortalecimiento de las estructuras del centro de la ciudad de Cuenca.

Análisis visual de la zona 2

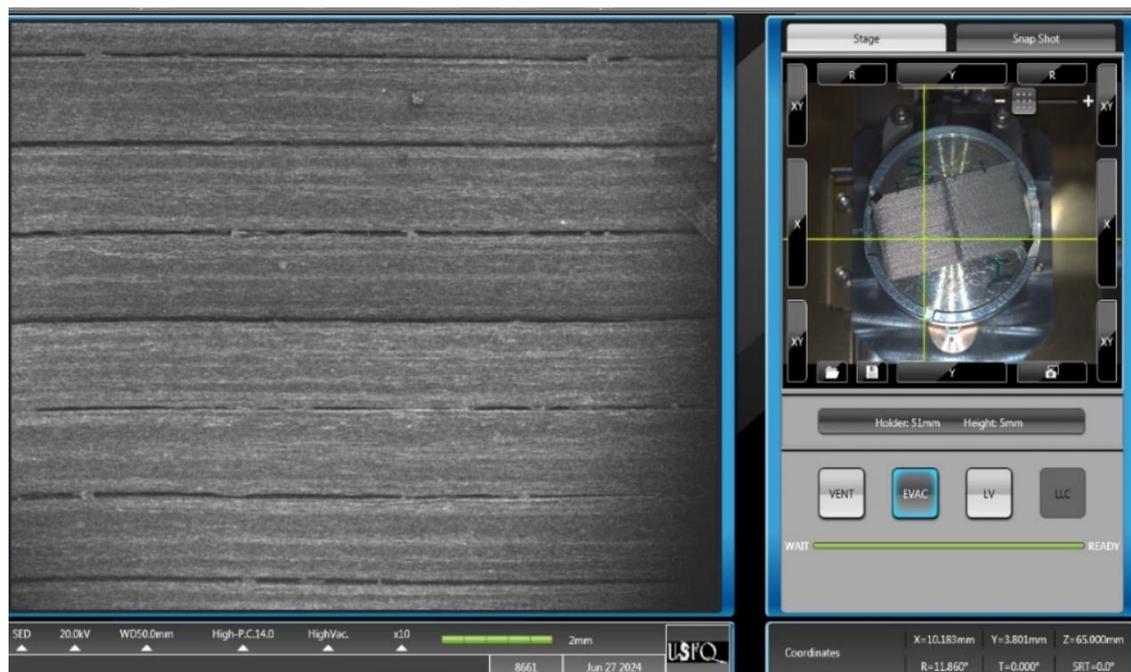


Figura 51. Zona de inspección 2 mediante SEM a x20 de amplificación.

La imagen del SEM revela varias características esenciales para comprender el comportamiento mecánico de la fibra de vidrio bajo esfuerzo de cizallamiento, a continuación, se presenta una interpretación técnica detallada de estas observaciones:

Deslizamiento de fibras:

La imagen muestra varias fibras de vidrio con signos claros de deslizamiento, lo que se evidencia por la orientación y la separación entre ellas, las cuales no están perfectamente alineadas, este fenómeno indica que, bajo esfuerzo de cizallamiento, las fibras individuales han experimentado deslizamiento relativo unas respecto a otras.

Presencia de fisuras y daños superficiales:

Se observan fisuras y daños en la superficie de las fibras, sugiriendo que el material ha sufrido fracturas parciales debido a la concentración de tensiones en puntos específicos, las

irregularidades y las partículas adheridas a las fibras pueden ser fragmentos de material desprendidos durante el ensayo.

Interacciones de fibras:

La interacción entre fibras adyacentes es crucial para la transferencia de carga en materiales compuestos, en este caso la imagen ilustra cómo las fibras interactúan entre sí, lo que influye en la resistencia y el comportamiento global del material.

Calidad del Enlace interfacial de fibras:

El estado del enlace entre las fibras puede evaluarse observando las zonas donde las fibras parecen estar unidas o separadas. Un buen enlace implica una mejor transferencia de carga y una mayor resistencia al deslizamiento, lo cual es vital para el desempeño mecánico del compuesto.

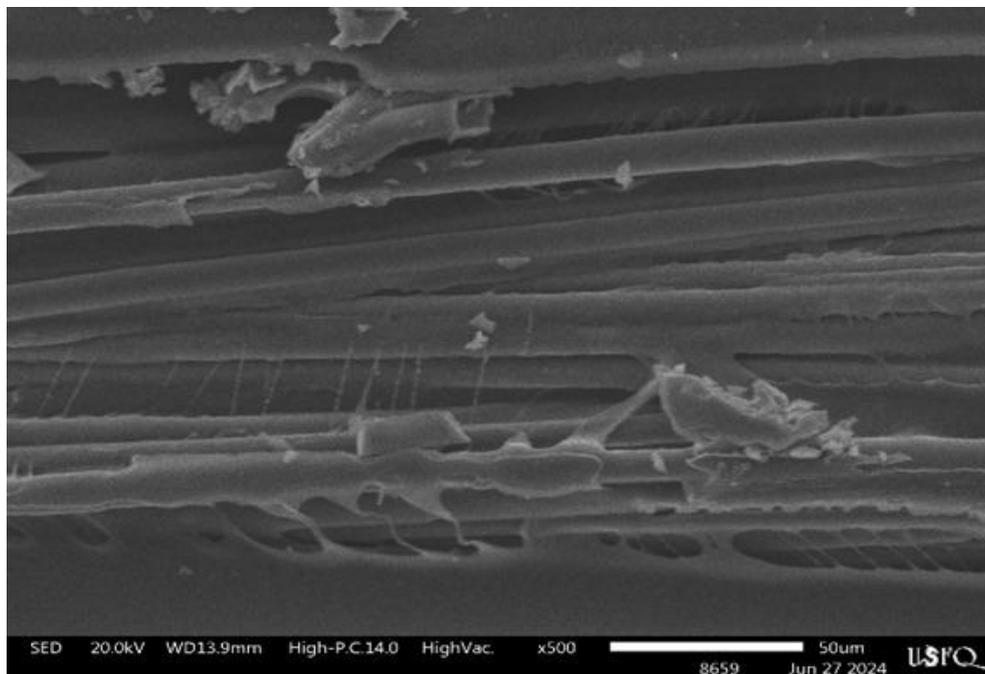


Figura 52. Zona de inspección 2 mediante SEM a x500 de amplificación.

La observación de deslizamiento de fibras, junto con la presencia de fisuras y daños superficiales, revela que las fibras individuales han experimentado movimientos relativos significativos bajo cargas de cizallamiento, estos deslizamientos indican una transferencia de carga limitada entre las fibras, lo que puede afectar negativamente la resistencia global del material compuesto, la interacción entre las fibras y los fragmentos adheridos también proporciona información valiosa sobre los mecanismos de falla y la distribución de tensiones en el material.

La calidad del enlace entre las fibras, evidenciada por la separación y unión variable en la microestructura, es crucial para determinar la eficiencia del material en aplicaciones estructurales, los resultados obtenidos no solo confirman la importancia de una buena adhesión interfacial de fibras para la resistencia al cizallamiento, sino que también resaltan la necesidad de mejorar la matriz y los procesos de fabricación para minimizar defectos y optimizar la transferencia de carga. En conclusión, estos hallazgos subrayan la complejidad del comportamiento mecánico de la fibra de vidrio y proporcionan directrices claras para futuras mejoras en el diseño y fabricación de materiales compuestos.

7.4. Comparativa con la fibra de carbono

Tal como se indica en los objetivos específicos de esta investigación, esta investigación tiene como propósito comparar los resultados de la resistencia a la fractura de la fibra de vidrio con otros materiales ligeros disponibles en el mercado. Para este análisis comparativo, se ha seleccionado la fibra de carbono como material de referencia, debido que conocemos su resistencia a la fractura por ensayos previos que han establecido sus propiedades mecánicas. Este enfoque permitirá evaluar rigurosamente la tenacidad a la fractura de la fibra de vidrio

en relación con un material reconocido por su alto rendimiento mecánico en aplicaciones estructurales.

La metodología empleada implicará procedimientos de ensayo estandarizados para ambos materiales, asegurando la validez y fiabilidad de los resultados, los datos resultantes proporcionarán una base sólida para evaluar la viabilidad de la fibra de vidrio como una alternativa competitiva en aplicaciones que requieren materiales de alta resistencia y ligereza. Este análisis comparativo busca establecer un entendimiento profundo de las capacidades mecánicas de la fibra de vidrio, en particular su resistencia a la fractura en modo II, en comparación con la fibra de carbono, proporcionando información para su aplicación en refuerzo de estructuras.

Tabla 4. Resistencia a la fractura de la fibra de carbono

Tabla extraída de (J. Santos, A. Fernández, L. Ripoll & N. Blanco, P)

Muestra	Reducción de Datos	Iniciación	Propagación
DCB-A	J – integral	1497 ± 85	1720 ± 116
DCB-B	J – integral	1064 ± 125	1265 ± 57
ENF	CC	1991 ± 80	-
C-ELS	CBTE	1950 ± 215	2307 ± 117

Tabla 5. Compendio de valores de G_{IIC} de la fibra continua de vidrio.

Probeta	G_{IIC} (J/m²)
1	1223,52
2	1550,56
3	1043,70
4	1253,18
Promedio	1267,74
Desviación	210,03
CV %	16.6

La disparidad en los valores de resistencia a la fractura entre la fibra de vidrio (1267,4 J/m²) y la fibra de carbono (1991 J/m²) se atribuye a varias razones relacionadas con la estructura y propiedades intrínsecas de ambos materiales, la fibra de carbono, destacada por su alta resistencia y rigidez, está compuesta de filamentos de carbono alineados en una dirección específica, lo que le confiere una mayor capacidad para soportar tensiones y absorber energía antes de fracturarse, este alineamiento y la estructura cristalina del carbono son clave para su alta tenacidad y resistencia a la fractura.

En contraste, la fibra de vidrio, aunque también posee alta resistencia y es ampliamente utilizada en aplicaciones estructurales, está formada por filamentos de vidrio con una estructura amorfa, esta diferencia estructural resulta en una menor capacidad para soportar tensiones comparada con la fibra de carbono. La disposición de los filamentos de vidrio y su interacción bajo carga influyen en cómo el material distribuye y absorbe energía, resultando en una menor resistencia a la fractura.

Además, la interfaz matriz-fibra en los materiales compuestos es crucial para la resistencia a la fractura. En la fibra de carbono, la adhesión entre la matriz y las fibras tiende a ser más fuerte, mejorando la capacidad del material para transferir y distribuir tensiones, en cambio, la interfaz en los compuestos de fibra de vidrio puede no ser tan robusta, lo que reduce la eficiencia en la transferencia de tensiones y, por ende, disminuye la resistencia a la fractura.

Finalmente, las técnicas de fabricación y procesamiento también influyen en las propiedades mecánicas de ambos materiales, la fibra de carbono, producida mediante procesos más controlados y precisos, presenta menos defectos y una distribución más uniforme de las fibras, lo que contribuye a su mayor resistencia a la fractura. Por otro lado, la fibra de vidrio puede experimentar variaciones en su proceso de fabricación que afectan su estructura

interna y su capacidad para soportar tensiones., estos factores combinados explican las diferencias en los valores de resistencia a la fractura entre la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

8. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha llevado a cabo una exhaustiva caracterización de la tenacidad a la fractura en modo II de la fibra de vidrio, destinada a reforzar estructuras. Utilizando técnicas avanzadas de ensayo, como la máquina de ensayos universal SHIMADZU y el SEM, se ha obtenido una comprensión profunda del comportamiento mecánico de este material bajo carga. Los resultados muestran que la fibra de vidrio presenta una notable resistencia a la propagación de grietas en modo II, absorbiendo una cantidad significativa de energía antes de fracturarse, reflejando su alta tenacidad. El análisis detallado de las imágenes del SEM reveló características microestructurales importantes como deslizamientos, fragmentaciones y roturas de fibras, indicando que la deformación plástica y la redistribución de tensiones internas son cruciales para la resistencia a la fractura, además, la preparación y manejo correctos de las probetas, utilizando técnicas de corte con láser y recubrimiento con oro, fueron esenciales para obtener resultados reproducibles y fiables.

Los resultados obtenidos no solo aportan conocimientos valiosos sobre las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio, sino que también ofrecen directrices prácticas para su implementación en proyectos de restauración y refuerzo estructural, la capacidad de la fibra de vidrio para resistir tensiones en modo II y su comportamiento favorable bajo carga sugieren que es una opción viable y eficaz para mejorar la integridad estructural de edificaciones históricas, combinando alta resistencia, ductilidad y resistencia a la corrosión. Esta investigación subraya la necesidad de optimizar los procesos de fabricación para asegurar una calidad constante del material, la variabilidad en la resistencia al cizallamiento entre diferentes probetas indica que un control estricto en la producción es vital para

garantizar un desempeño mecánico predecible y confiable. Implementar estos hallazgos en la práctica puede mejorar significativamente la eficiencia y seguridad de las estructuras reforzadas con fibra de vidrio, proporcionando una base sólida para futuras aplicaciones en ingeniería civil, especialmente en la preservación y refuerzo de estructuras.

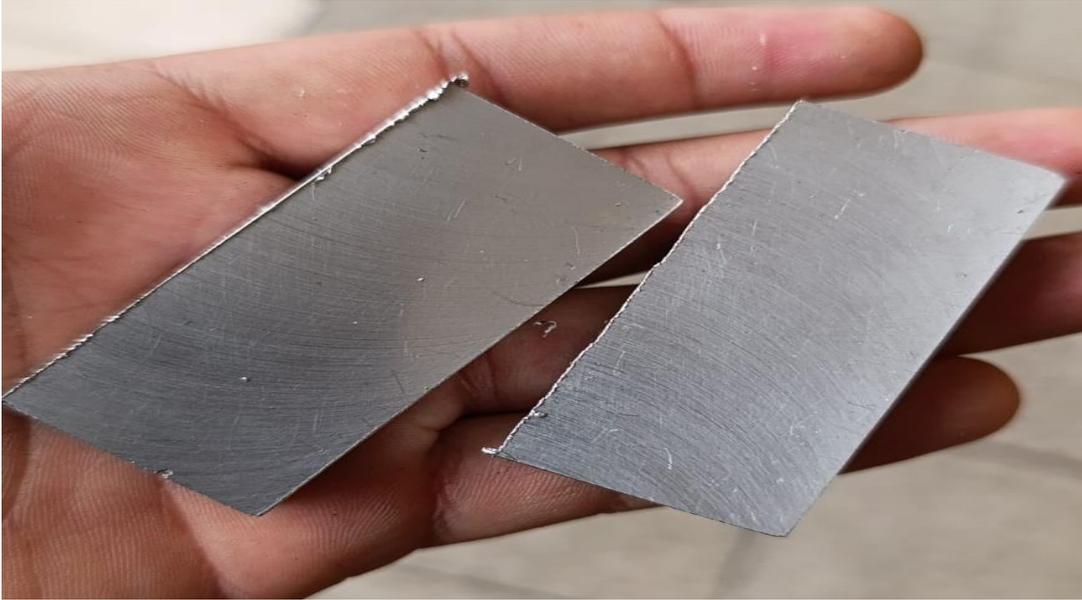
La disparidad en la resistencia a la fractura entre la fibra de vidrio (1267.4 J/m²) y la fibra de carbono (1991 J/m²) se debe a las características estructurales y propiedades inherentes de ambos materiales. La fibra de carbono, con filamentos alineados y estructura cristalina, exhibe una mayor resistencia y capacidad para absorber energía bajo carga antes de fracturarse, debido a una interfaz matriz-fibra más eficiente que facilita la distribución de tensiones. En contraste, la fibra de vidrio, formada por filamentos amorfos y una interfaz matriz-fibra menos robusta, presenta una menor capacidad para soportar tensiones, influenciada por variaciones en los procesos de fabricación que pueden afectar su estructura y propiedades mecánicas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- A. Belouar et al. (2013). Structural Performance of Square Concrete Columns Wrapped with CFRP Sheets. *ELSEVIER*, 54, 9.
- A. Katalagianakis 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.
- Agudelo, G. (16 de junio de 2021). *intekgroup*. intekgroup: <https://intekgroup.com.co/el-estereomicroscopio-y-su-potente-vista-3d/>
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture*.
- 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.
- C. Caicedo et al. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el procesamiento. *DIALNET*, 18(3), 8.
- Cervantes, N. (2022). *Desarrollo y caracterización a fractura de polímeros reforzados*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- D. Díaz et al. (2015). Comportamiento mecánico de fibras henequén cubano e interfase con polímeros termoplásticos del tipo poliolefina. *SCIELO*, 18(3), 157.
- Fuentes, F. (1982). *Ensayos mecánicos en materiales*. Universidad Autónoma.
- Griffiths, A. (1995). *The phenomena of rupture and flow in solids*. Masinovedenie.
- Groover, M. (2015). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*.
- H. Kuhn & D. Medlin. (2000). *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM.
- H. Lipson & M. Kurman. (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. WILEY.
- Hibbeler, R. (2017). *Mecánica de Materiales*. PEARSON.
- J. Arana & J. González. (2002). *Mecánica de fractura*. Universidad del País Vasco.
- J. Santos 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.
- J. Santos 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), OLYMERS.

- J. Xiang et al. (2023). Interlaminar and translaminar fracture toughness of 3D-printed continuous fiber reinforced composites. *spe*, 45(5), 3883 - 3900.
- M. Ashby & D. Jones. (2012). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design (International Series on Materials Science and Technology)*. Pergamon Press.
- M. Beltrán & A. Marcilla. (2012). *Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante.
- P. Beer et al. (2020). *Mecánica de Materiales*. McGraw.
- Popov, E. (2000). *Mecánica de sólidos*. Pearson Educación.
- Reynoso, S. (2021). *Los Polímeros Plásticos: Los Conceptos Básicos que debes conocer durante y al salir de la Universidad*. Sara L Reynoso.
- S. Kalpakjian & S. Schmind. (2013). *Manufacturing Engineering & Technology*. PEARSON.
- STANDAR, E. (2015). *Aerospace series- Carbon fibre reinforced plastics - Test method - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode II - GIIC*. eesti standardikeskus.
- TOOL, A. M. (23 de julio de 2023). *Máquina de corte por láser: Una guía completa*. ADH MACHINE TOOL: <https://www.adhmt.com/es/cortadora-guia-laser/>
- Torres, J. (3 de 1 de 2020). *LMI*. La Media Inglesa: <https://lamediainglesa.com/>
- Vázquez, L. (2022). *Mecánica de fractura*. UAM, Unidad Azcapotzalco.
- W. Callister & D. Rethwisch. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. WILEY.
- W. Callister et al. (2016). *Ciencia e ingeniería de los*. CENGAGE Learning.

10. ANEXOS



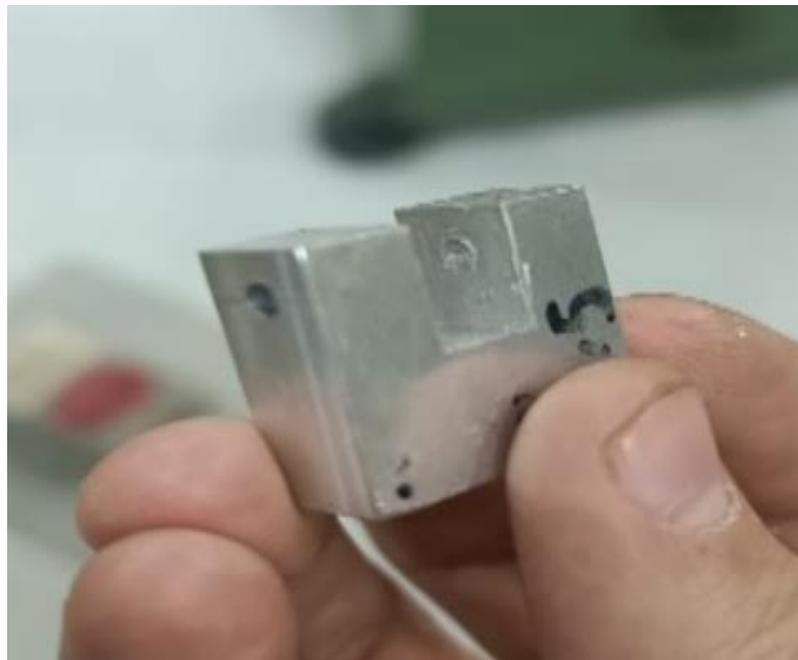
10.1. Bloques de aluminio en estado de suministro



10.2. Bloques de aluminio CNC fabricando el bloque del utillaje.



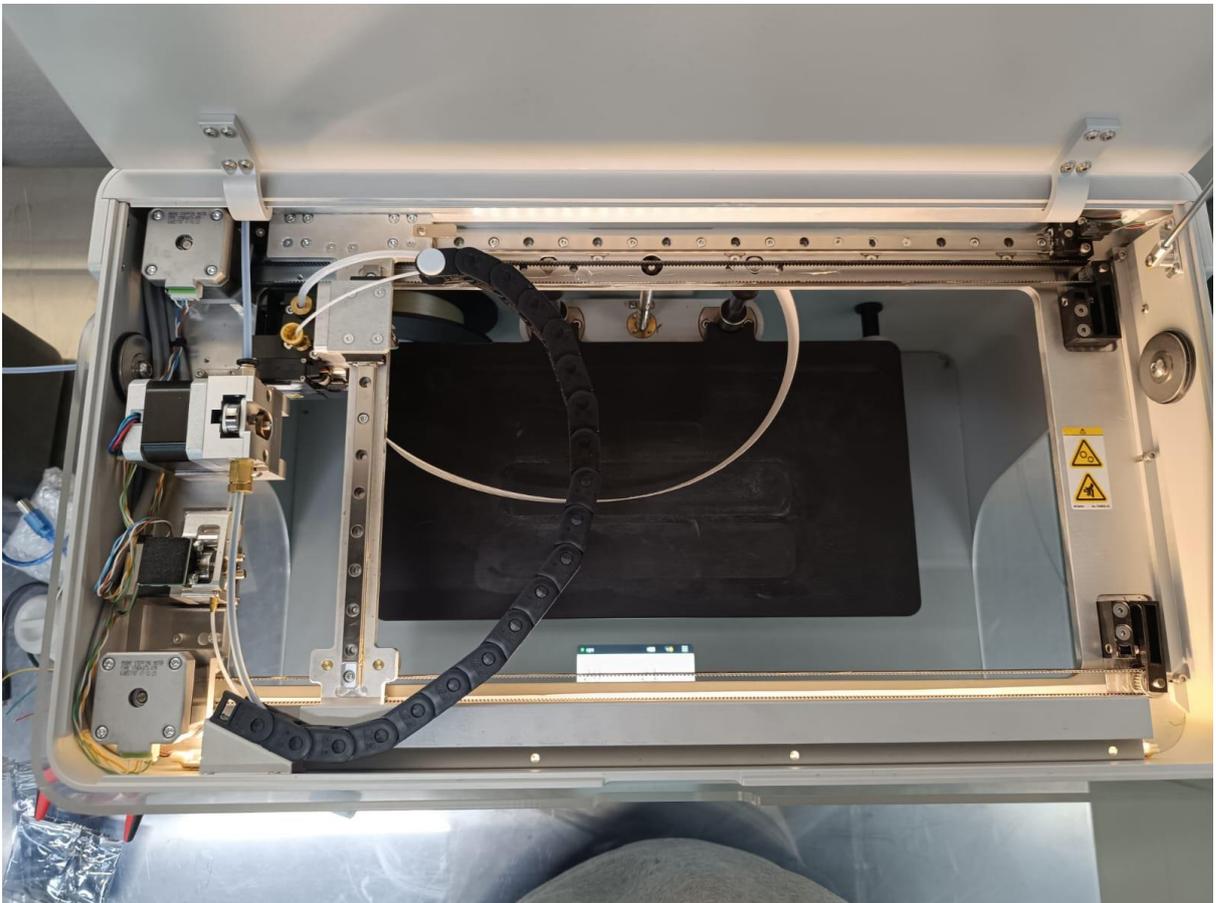
10.3. Taladro vertical



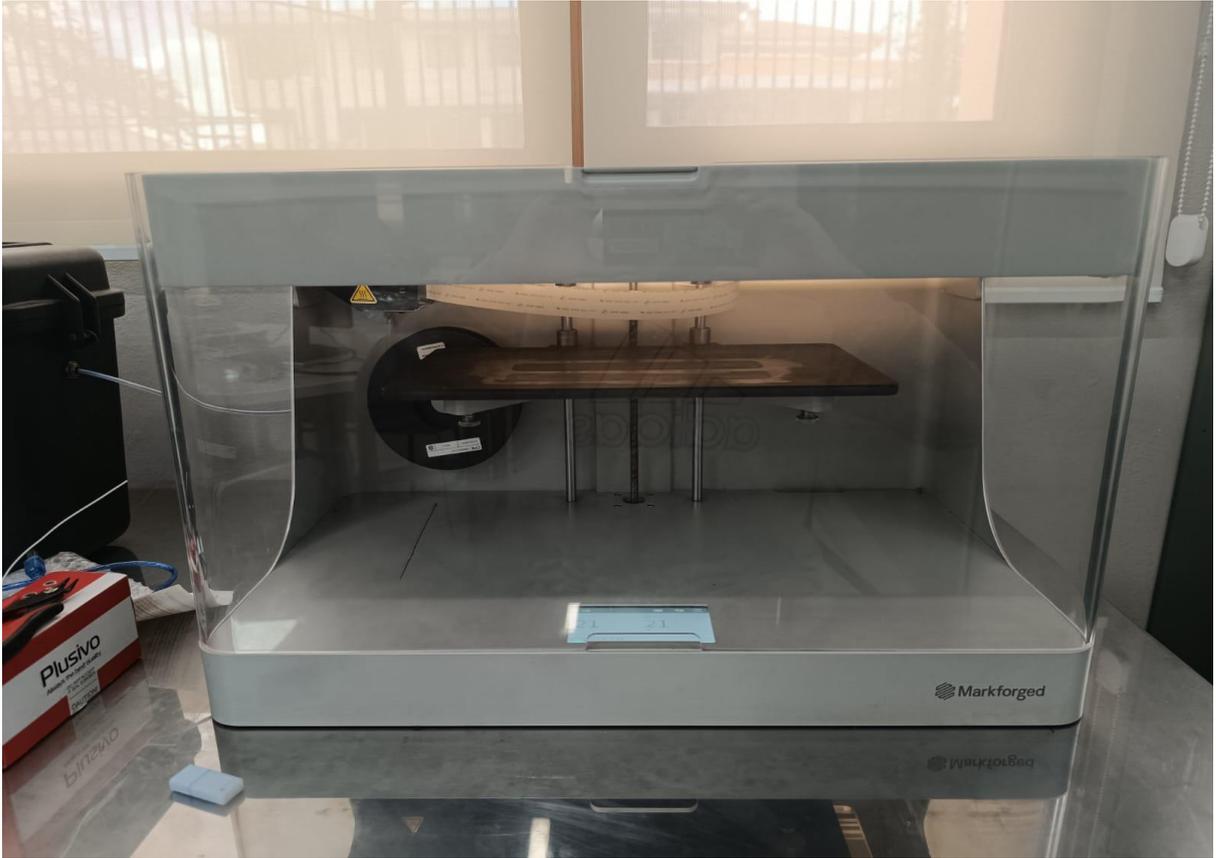
10.4. Bloque de carga manufacturado



10.5. Bloques de carga



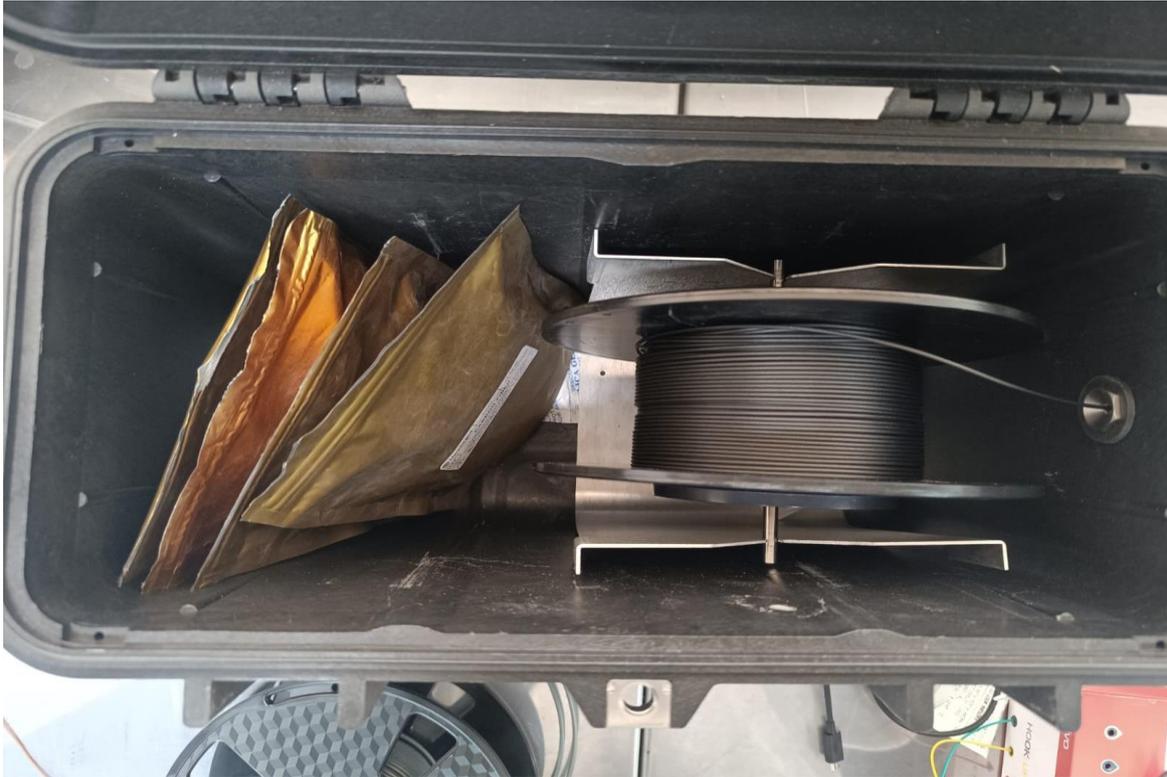
10.6. Impresora 3D vista superior



10.7. Impresora 3D vista frontal



10.8. Cinta térmica



10.9. Filamento de Onix™ dentro de la Drybox



10.10. Probeta falla durante procedimiento manufactura



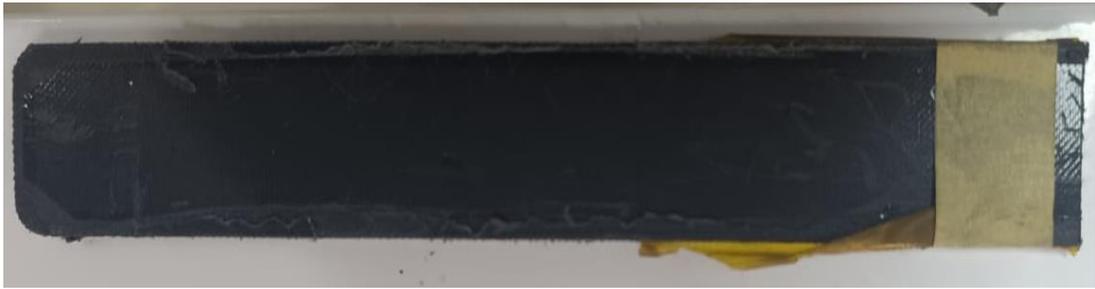
10.11. Probeta falla capa 20



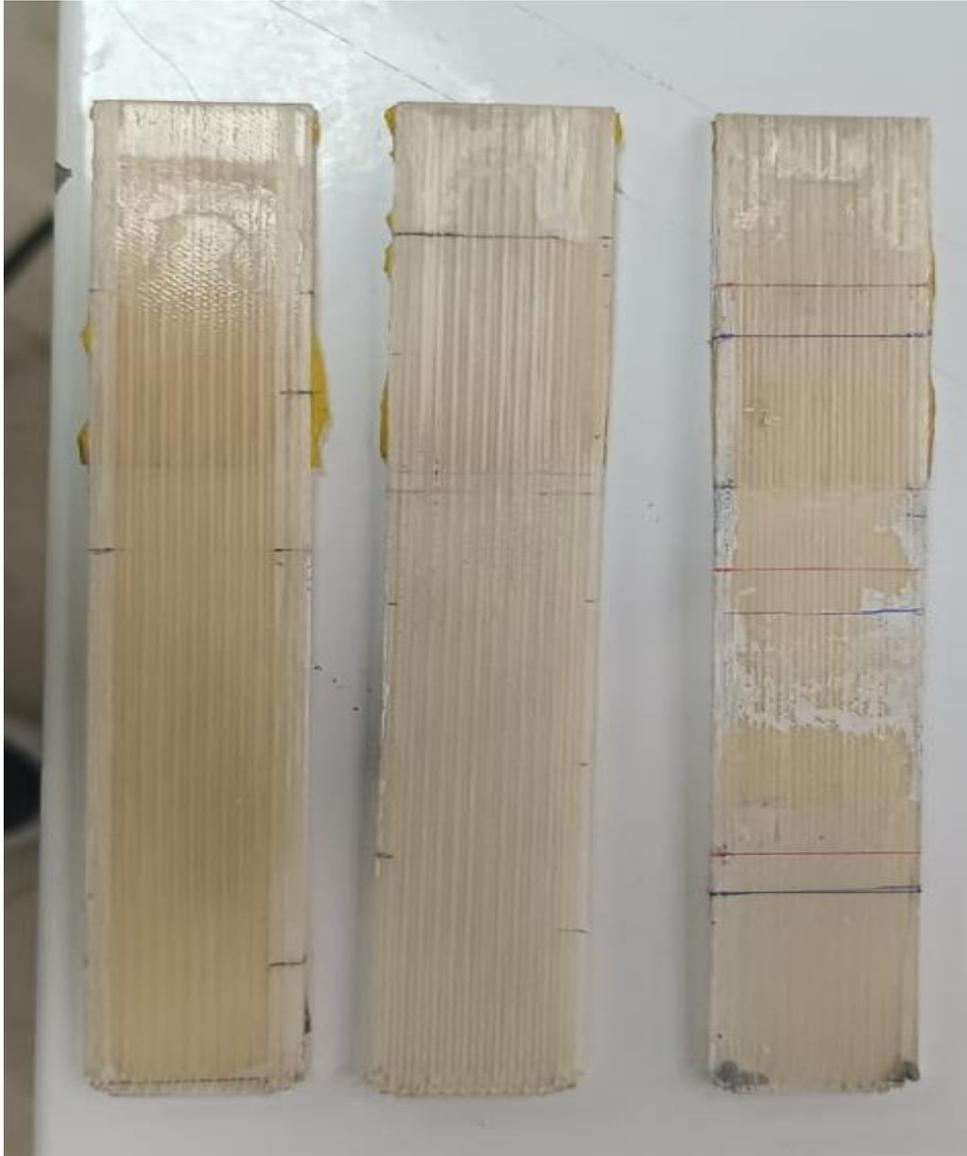
10.12. Probeta falla capa 15



10.13. Probeta falla capa 20



10.14. Probeta de Onix™



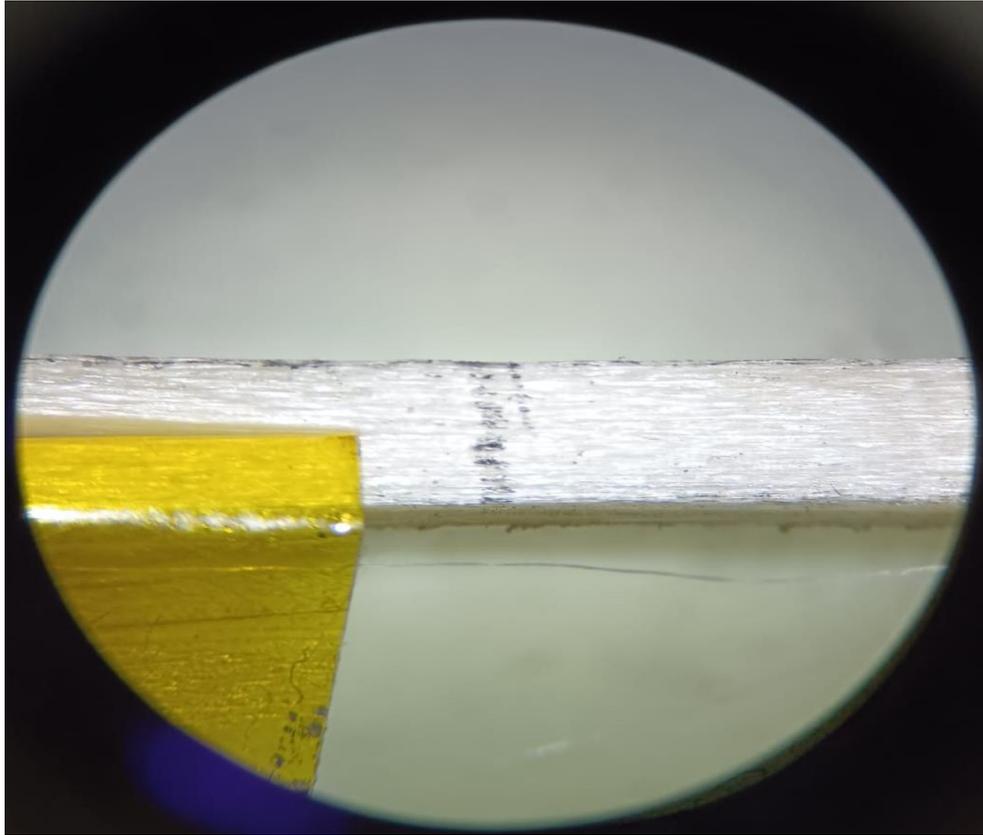
10.15. Probeta de fibra continua de vidrio durante pruebas de corte láser.



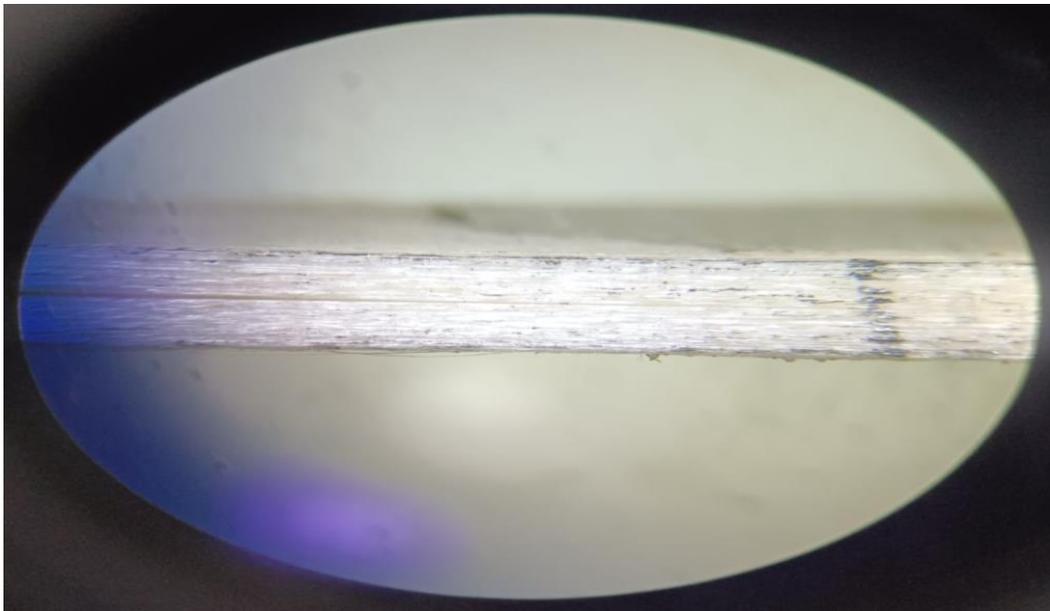
10.16. Drybox



10.17. Estereomicroscopio



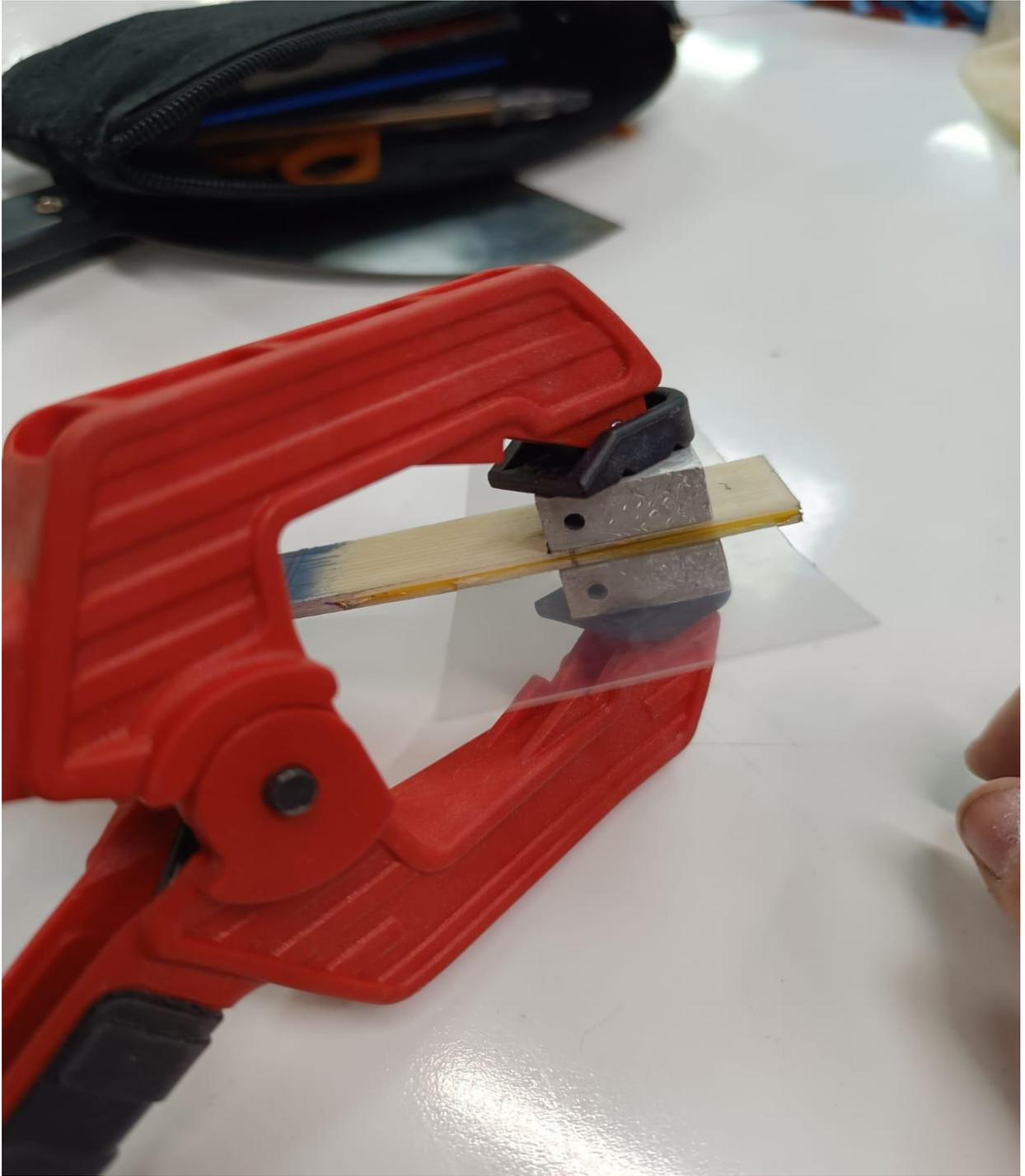
10.18. Visualización de la grieta.



10.19. Visualización de la grieta.



10.20. Pegado de la probeta y bloques de carga.



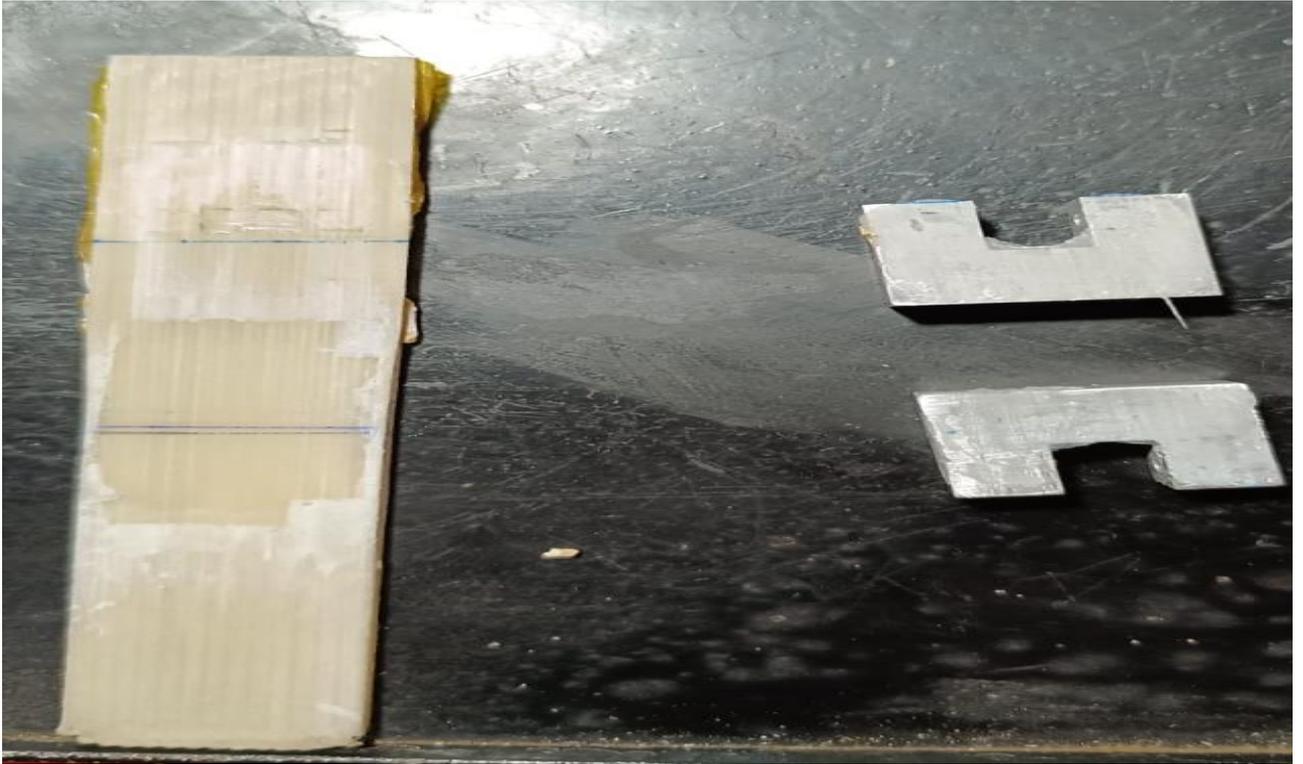
10.21. Curado del pegado de la probeta con prensa manual.



10.22. Trazado de las líneas de pre-grieta para el ensayo.



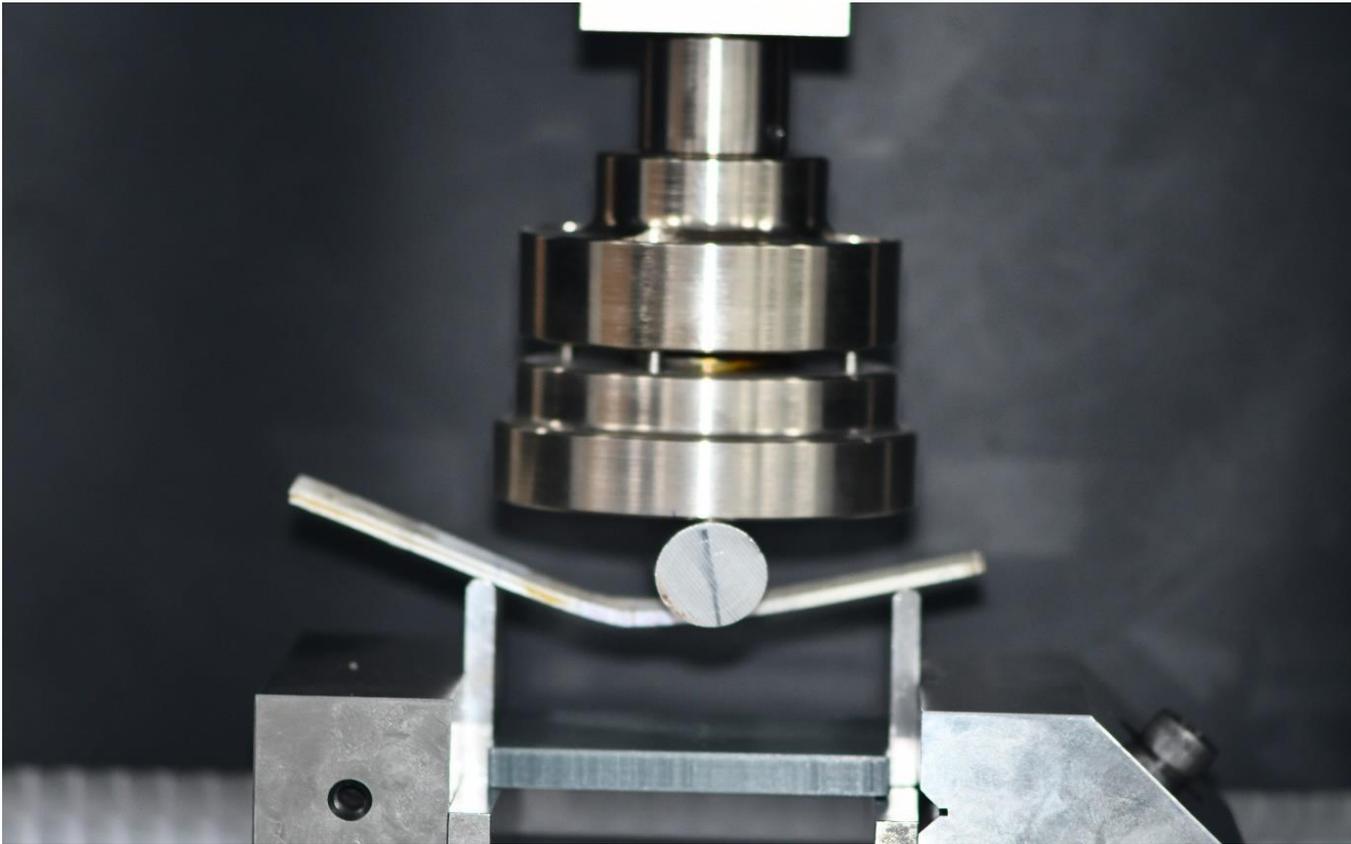
10.23. Colocación de la probeta en la máquina de ensayos universal.



10.24. Probeta con los bloques de carga retirados



10.25. Cámara óptica para observación durante los ensayos



10.26. Probeta sometida a carga catastrófica.



10.27. Trípode



10.28. Cámara Nikon



10.29. Calibrador digital de precisión.



10.30. Entenalla de precisión



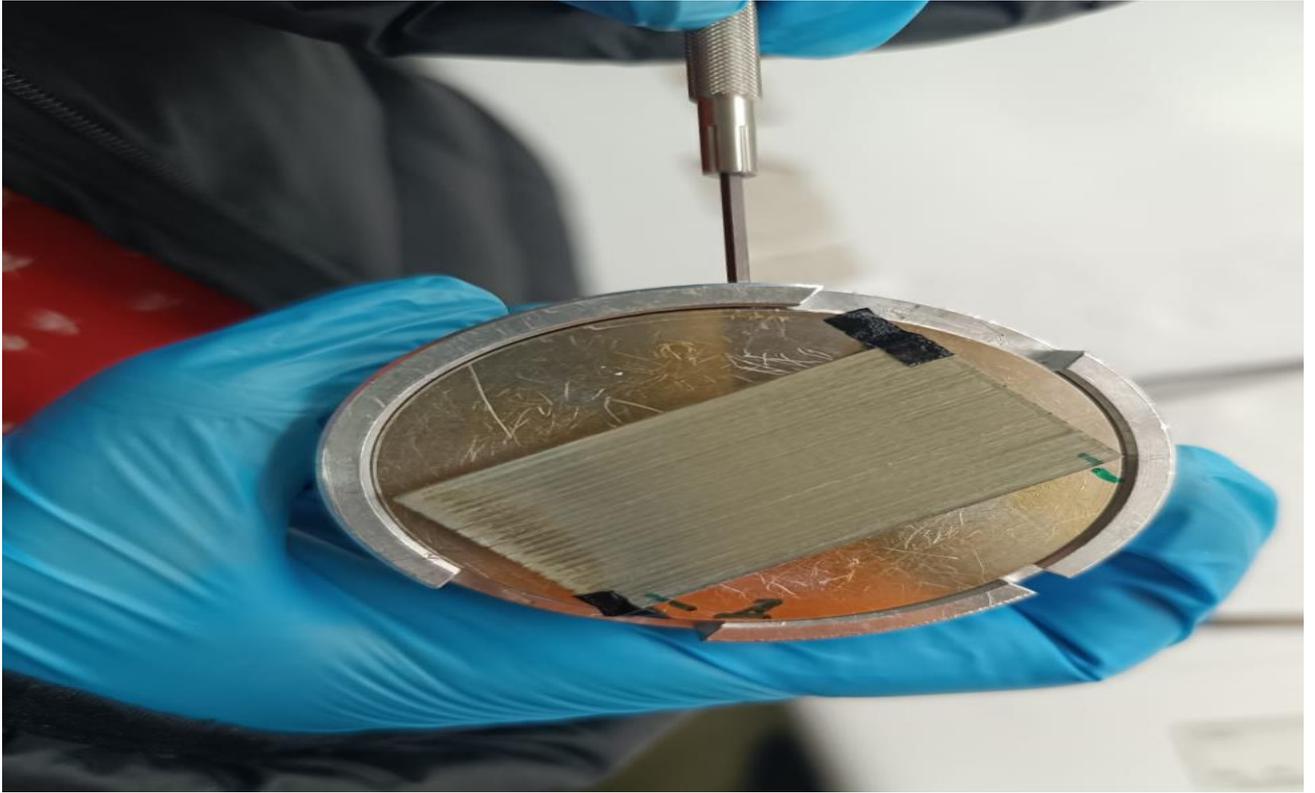
10.31. Espesores rectificadores varios.



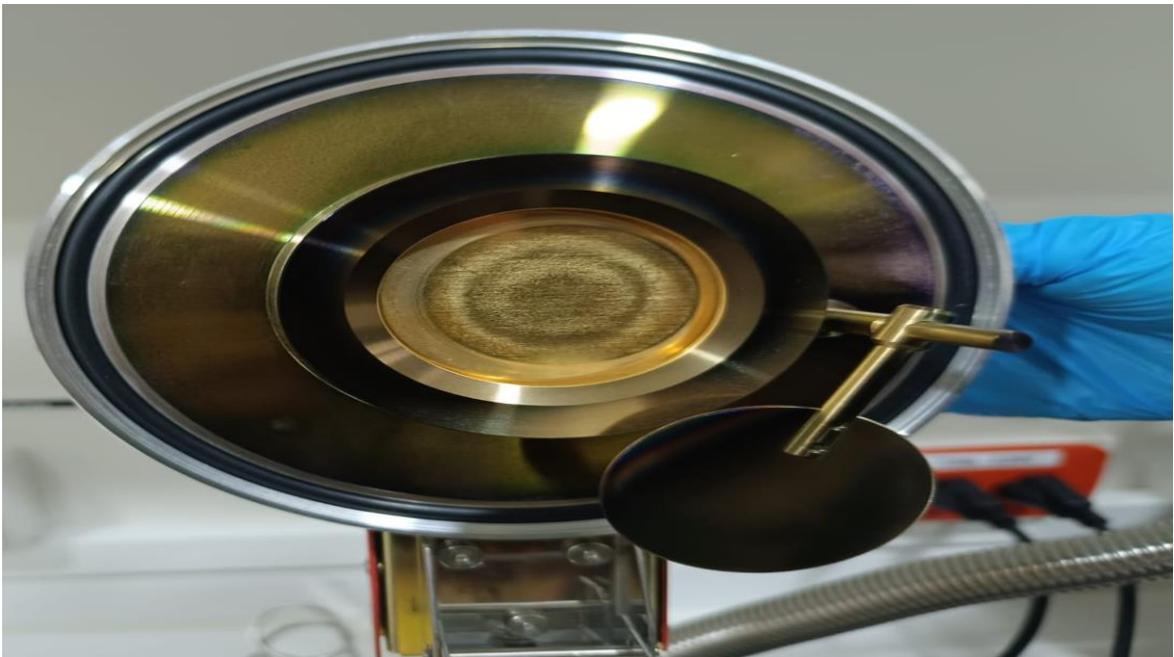
10.32. Entenalla de precisión



10.33. Apoyos para 3 puntos a flexión normados.



10.34. Probeta colocada en la base del SEM



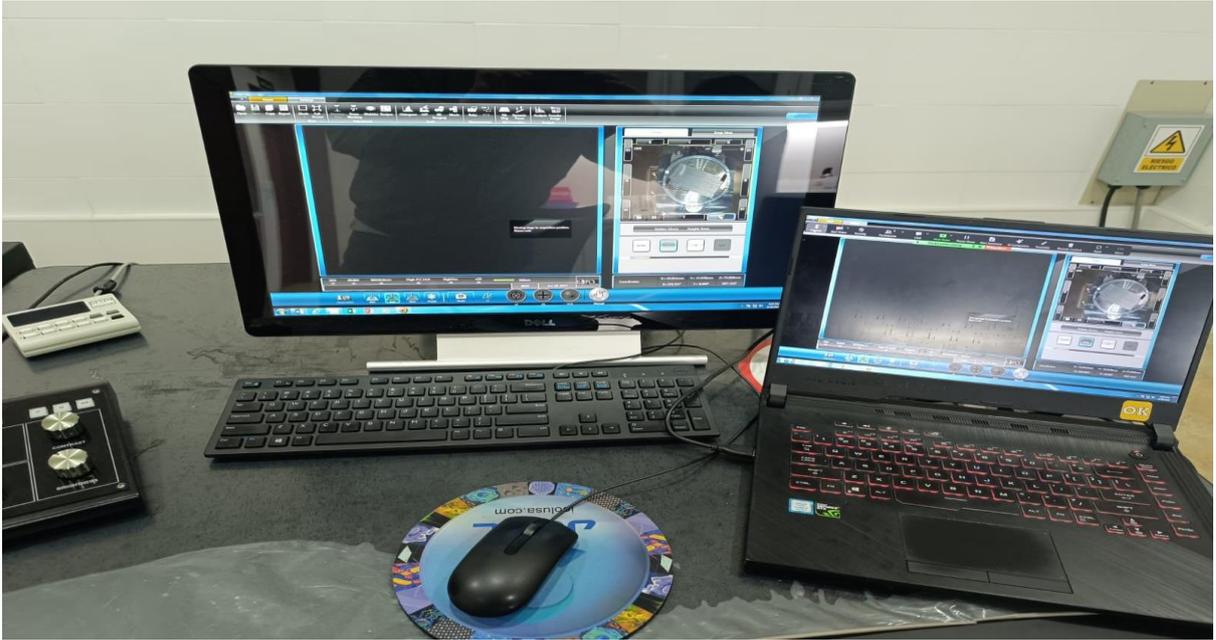
10.35. Lamina de oro para recubrimiento en oro.



10.36. Cinta de carbono



10.37. Probetas recubiertas de oro para observación.



10.38. Equipos de visualización del SEM



10.39. Desecador

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Crespo 3_5.xtas	Nombre de metodo de ensayo	TESIS BERREZUETA flexion.xmas
Fecha de informe	24/06/2024	Fecha de ensayo	24/06/2024
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 3 ptos.
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Nombre	M.Elastico	Pend. Standard	Max. Fuerza	Max. Tension
Parametros	Fuerza 10 – 20 N	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N/mm	N	N/mm2
1_1	23227,5	50,1715	307,194	255,995

Nombre	Max. Desplazamiento	Max. Deformacion	Max. Despl.	Rotura_Fuerza
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensibilidad 10
Unidad	mm	%	mm	N
1_1	6,69683	1,20543	6,69683	-,-

Nombre	Rotura_Tension	Rotura_Desplazamiento	Rotura_Deformacion	Rotura_Despl.
Parametros	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10
Unidad	N/mm2	mm	%	mm
1_1	-,-	-,-	-,-	-,-

10.40. Ficha técnica del ensayo de cizallamiento en el plano.