



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**VALIDACION DEL ENSAYO IOSIPESCU COMO HERRAMIENTA PARA LA
MEDICION DE PROPIEDADES INTERFACIALES DE MATERIALES
COMPUESTOS Y DE IMPRESION 3D**

POR

Raimundo Alejandro Zúñiga Inostroza

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:

Doctor en Ciencias e Ingeniería de Materiales Carlos Andrés Medina Muñoz
Doctor (c) en Ciencias e Ingeniería de Materiales Alexis Fidel Salas Salgado

Septiembre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Raimundo Zúñiga Inostroza

© 2023 Raimundo Zúñiga Inostroza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, a mi mamá, mi papá y mi hermano por su inquebrantable apoyo y comprensión durante esta etapa universitaria, por la preocupación a lo largo de este camino recorrido y la disposición a siempre ayudar en lo que fuese posible.

A mis compañeros y amigos que formaron parte de esta etapa, por su apoyo incondicional, intercambio de ideas y amistad. Igualmente, por estar presentes en momentos de distracción como paseos, fiestas y deportes. Mencionar entre ellos a quienes conformaron parte de mi grupo de trabajo durante la realización del Proyecto de Ingeniería Mecánica, Hernán González y Sebastián Muñoz, con quienes trabajamos a la par durante el segundo semestre del 2022, de ellos pude aprender gran parte de los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para llevar a cabo esta investigación de la mejor forma posible.

Quisiera agradecer a los profesores Alexis Salas y Carlos Medina, por confiar en mí para realizar esta investigación, por el apoyo, orientación y gestiones realizadas durante este periodo. También nombrar a don Eduardo Escobar encargado de fabricar las mordazas y cuñas del dispositivo de Iosipescu utilizado en este proyecto, también por su disposición a ayudar, sus consejos y orientación respectiva al diseño y fabricación del equipo.

Esta memoria está dedicada...

A mis papás Sandra y Alejandro, es un gesto lleno de profundo agradecimiento y amor. A lo largo de mi vida, han sido mi fuente inquebrantable de apoyo, aliento y sacrificio. Su constante respaldo moral y emocional me ha impulsado a superar obstáculos y perseguir mis sueños con determinación. Cada logro mío es un testimonio de su amor, dedicación y sacrificio, y es con humildad y eterna gratitud que dedico este trabajo a ustedes, quienes han sido los pilares de mi camino hacia el éxito.

A mi hermano Vicente, tía Larissa y primo Benjamín, quienes han sido mis compañeros incondicionales, les dedico este logro con gratitud por los momentos compartidos y por su apoyo constante. Sus palabras de aliento y perspectivas únicas han sido fundamental en este proceso. Espero que esta dedicatoria refleje mi admiración por su presencia en mi vida y la importancia de nuestros lazos familiares.

A mis amigos y amigas les dedico una parte especial de esta memoria, ya que su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable. Sus palabras de aliento, sus risas compartidas y su compañía en los momentos difíciles han sido esenciales para mantenerme equilibrado a lo largo de este desafiante trayecto académico. Juntos hemos creado recuerdos que atesoro profundamente, y es con alegría y aprecio que dedico este logro a nuestra amistad. Cada conversación y cada detalle ha sido un recordatorio constante de la importancia de tener personas grandiosas como ustedes a mi lado.

En conjunto, esta dedicatoria es un tributo a aquellos que han sido mi red de seguridad, mi constante fuente de inspiración y aliento. Sin ustedes, este viaje no habría sido tan significativo ni enriquecedor. Con humildad y agradecimiento, les dedico este logro, con la esperanza de que sepan cuán fundamentales han sido en mi camino hacia la consecución de este título.

Resumen

El ensayo Iosipescu, reconocido por su capacidad para evaluar la resistencia al corte interlaminar de materiales compuestos, se adapta en este trabajo para medir las propiedades interfaciales en materiales compuestos y espécimen impresos en 3D. Se propone una metodología de adaptación y se detallan los procedimientos de prueba utilizados para obtener resultados confiables y representativos.

La validación de esta herramienta se lleva a cabo mediante una serie de experimentos y comparaciones con métodos de referencia establecidos. Los resultados obtenidos se analizan en términos de precisión, repetibilidad y coherencia, tanto en el caso de los materiales compuestos como en el de los ejemplares impresos en 3D. Se consideran factores como la morfología de las interfaces, la influencia de las características de fabricación y otros parámetros relevantes.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas para la caracterización de propiedades interfaciales en una amplia gama de aplicaciones, desde la industria de materiales compuestos hasta la fabricación aditiva. La validación exitosa del ensayo Iosipescu en ambos contextos demuestra su versatilidad y utilidad como herramienta de evaluación de calidad y rendimiento. Además, este trabajo proporciona una base para futuras investigaciones en el campo de la caracterización de materiales y modelos compuestos e impresos en 3D.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	v
Lista de Figuras	vii
Glosario	ix
1 Capítulo 1: Introducción.....	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 Hipótesis de investigación	11
1.4 Metodología.....	12
2 Capítulo 2: Marco Teórico	15
2.1 Material compuesto	15
2.1.1 Matriz	15
2.1.2 Fibra de carbono.....	16
2.1.3 Fibra de vidrio.....	16
2.2 Propiedades mecánicas	17
2.2.1 Módulo elástico (E).....	18
2.2.2 Resistencia máxima a la tracción (ultimate tensile strength <i>Sut</i>)	19
2.2.3 Resistencia al corte interlaminar (ILSS)	20
2.2.4 Resistencia al corte interfacial (IFSS).....	20
2.3 Norma ASTM D5379	20
2.4 Ensayo de corte de Iosipescu	21
2.5 Norma ASTM D2344	23
2.6 Ensayo flexión de viga corta (SBS).....	24
3 Capítulo 3: Estado del Arte	25
3.1 Resultados actuales ensayo de corte de Iosipescu	25
3.1.1 Resultados de literatura.....	25
3.2 Resultados actuales ensayo de flexión de viga corta (SBS)	30
3.3 Resultados actuales	31
4 Capítulo 4: Metodología.....	33
4.1 Estrategia de investigación	33

4.2 Materiales	33
4.3 Fabricación especímenes ensayo flexión de viga corta	34
4.4 Fabricación especímenes Iosipescu	36
4.5 Fabricación mordazas Iosipescu	37
4.6 Implementación del ensayo de corte Iosipescu	38
5 Capítulo 5: Resultados y Discusión.....	41
5.1 Ensayo de flexión de viga corta (SBS)	41
5.2 Ensayo de corte de Iosipescu	46
6 Capítulo 8: Conclusiones.....	54
Referencias	56
7 Anexos.....	3
1. Plano fixture máquina de corte de Iosipescu	3
2. Mejoras al diseño de fixture	7

Lista de Figuras

Figura 1.1: Esquema de la metodología de trabajo	13
Figura 1.2: Carta Gantt del proyecto	14
Figura 2.1: Curva esfuerzo - deformación de un material polimérico	15
Figura 2.2: Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas orientadas al azar. c) Fibras ortogonales o tejidos. d) Fibras en capas múltiples..	17
Figura 2.3: Curva esfuerzo - deformación a) material tradicional b) material compuesto	19
Figura 2.4: (a) Dimensiones de la muestra y (b) Preparación de muestra para ensayo Iosipescu	21
Figura 2.5: Modos de falla en ensayo de corte Iosipescu.....	23
Figura 4.1: Resina epóxica y endurecedor	33
Figura 4.2: Materiales de trabajo. (a) Fibra de carbono, (b) Fibra de vidrio.....	34
Figura 4.3: Esquema del molde de fabricación	34
Figura 4.4: Resumen del proceso de fabricación de placa de fibra de carbono	35
Figura 4.5: Molde de silicona para fabricar probetas V-notch.....	36
Figura 4.6: Probetas V-notch en el horno tras el proceso de post curado.	36
Figura 4.7: Proceso de fabricación de mordazas para ensayo Iosipescu.....	37
Figura 4.8: (a) Modelo 3D del fixture para ensayo de Iosipescu, (b) Vista frontal del modelo y sus componentes.....	38
Figura 4.9: Mecanismo de Iosipescu montado en máquina multi ensayos ProLine	39
Figura 5.1: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de carbono.....	41
Figura 5.2: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de vidrio.	42
Figura 5.3: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA con orientación de fibras a 0°.....	43
Figura 5.4: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA con orientación de fibras a 90°.....	44
Figura 5.5: Tipos de fracturas de probetas con PLA (a) División central PLA 0° (b) División central PLA 90°(c) Flexión con marca central del actuador	45
Figura 5.6: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de vidrio.	46
Figura 5.7: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de carbono.....	48
Figura 5.8: Tipos de fracturas de probetas con fibra de carbono (a) Fractura de un solo diamante, (b) División central de arrastre, (c) División central	49
Figura 5.9: Tipos de fracturas de probetas con fibra de vidrio (a) División central de arrastre, (b) Fractura de un solo diamante, (c) División central	49
Figura 5.10: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA a 0°.	51
Figura 5.11: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA a 90°.	52
Figura 5.12: Tipos de fracturas de probetas con PLA a 0° (a) División central de arrastre, (b) Fractura lateral	53
Figura 5.13: Tipos de fracturas de probetas con PLA a 90° (a) División central de arrastre, (b) División central de arrastre	53

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Orientación de las fibras y porcentaje de refuerzo	18
Tabla 2.2: Dimensiones del espécimen de ensayo	22
Tabla 3.1: Resistencia al corte interfacial obtenido para ensayo de Iosipescu.....	28
Tabla 3.2: Referencias de la literatura para ensayo de Iosipescu	31
Tabla 4.1: Propiedades Mecánicas Aluminio AA-2017.....	37
Tabla 4.2: Composición Química Aluminio AA-2017	37
Tabla 5.1: Resultados ensayos flexión de viga corta con fibra de carbono.....	41
Tabla 5.2: Resultados ensayos flexión de viga corta con fibra de vidrio.....	43
Tabla 5.3: Resultados ensayos flexión de viga corta con orientación de fibras a 0°	44
Tabla 5.4: Resultados ensayos flexión de viga corta con orientación de fibras a 90°	45
Tabla 5.5: Resultados ensayos Iosipescu con fibra de vidrio.....	46
Tabla 5.6: Resultados ensayos Iosipescu con fibra de carbono.	47
Tabla 5.7: Resultados ensayos Iosipescu con PLA a 0°	50
Tabla 5.8: Resultados ensayos Iosipescu con PLA a 90°.....	51

Glosario

- ASTM : American Society for Testing and Materials - Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
- CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymers - Polímero Reforzado con Fibra de Carbono
- FBC : Fiber Bundle Composites – Compuesto de Haces de Fibras
- IFSS : Interfacial Shear Strength – Resistencia al Corte Interfacial
- ILSS : Interlaminar Shear Strength – Resistencia al Corte Interlaminar
- PLA : Polylactic Acid – Acido Polilactico
- SBS : Short Beam Strength – Cizallamiento de Haz Corto
- SFFT : Single Fiber Fragmentation Test - Prueba de Fragmentación de Fibra Única
- S_{ut} : Ultimate tensile strength – Resistencia Máxima a la Tracción

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Los materiales compuestos se constituyen por una combinación de dos materiales, uno es denominado refuerzo, el cual se compone frecuentemente por fibras, para luego ser embebido en otro material llamado matriz termoestable o matriz termoplástica. Las fibras se encargan de soportar gran parte de la carga y aportan tanto resistencia como rigidez al material compuesto. De igual modo, dominan propiedades como su coeficiente de expansión térmica y conductividad. Por otra parte, la matriz se ocupa de unir las fibras entre sí, transfiriendo las cargas externas a las fibras, además protege a estas mismas del entorno y concede al material compuesto su forma y aspecto superficial [1]. La interacción fibra-matriz se denomina interfaz, de la cual se desprende la resistencia al corte interfacial (IFSS, Interfacial Shear Strength), que refleja la eficiencia de transferencia de carga entre la fibra y la resina, desempeña un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas del compuesto. Asimismo, existe otro indicador de la interacción física/química que hay entre la fibra y la resina como lo es la resistencia al corte interlaminar (ILSS, Interlaminar Shear Strength), el cual es uno de los mayores indicadores de desempeño mecánico de compuestos, debido a que representa la resistencia del material a la delaminación y el corte transversal.

Se proponen continuamente nuevas pruebas y métodos para la determinación de las propiedades de materiales compuestos en el ámbito de ingeniería. Un área particularmente importante de estudio continuo es el comportamiento de corte interfacial de los compuestos, y muchos métodos de prueba de corte se han introducido a lo largo de los años.

Cabe destacar que, al seleccionar los constituyentes de un material compuesto, se debe considerar el porcentaje de refuerzo y la orientación de las fibras. Estas características impactan directamente las propiedades mecánicas como su resistencia, por ejemplo; la materia prima a utilizar para la fabricación; el tipo y formulación de la resina que influyen en las propiedades químicas, físicas y térmicas [2]. Para correlacionar las propiedades mecánicas a distintas escalas, se busca determinar con precisión el valor de resistencia al corte interfacial (IFSS) de materiales de ingeniería, principalmente compuestos de polímero reforzado con fibra de vidrio y carbono (CFRP).

Existen tres métodos diferentes, que se ejecutan utilizando una máquina multiensayos, para determinar el módulo de corte y la resistencia al corte interfacial (IFSS), los cuales se encuentran en tres diferentes escalas: micro (100 nm - $2\mu\text{m}$), donde se puede identificar el ensayo (Single Fiber Fragmentation Test), en este último un solo filamento de fibra de carbono se embebe en una matriz de resina y posteriormente se aplica una carga de tracción a lo largo del eje de la fibra; meso ($1\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$), en esta escala se encuentra la prueba Iosipescu (ASTM D5379), basada en un ensayo de corte puro donde, a través de la entalla, al deformarse la probeta, se produce una concentración del esfuerzo de corte que acaba provocando la rotura generando una zona de carga de corte libre de momentos [3]; macro ($>100\mu\text{m}$), se tiene la prueba de flexión de viga corta (Short Beam Strength), aquí se requiere crear un espécimen de material compuesto y que se cargue en un accesorio de tres puntos. A medida que se bajan los rodillos centrales, las capas superiores experimentarán compresión, mientras que las

capas inferiores experimentarán tensión. En consecuencia, el centro del laminado experimenta un esfuerzo cortante durante la flexión.

El método de prueba de Iosipescu funciona fabricando probetas con muescas en V, las cuales se montan en un equipo que será diseñado y fabricado en aluminio especialmente para realizar los ensayos. Las muestras serán de materiales compuestos con fibras de vidrio y fibra de carbono, además de la matriz. Este método proporciona la capacidad de determinar la resistencia al corte y el módulo de corte [4]. Al aplicar una carga compresiva a un extremo de la muestra mientras se mantiene estático el otro extremo, se crea una región de tensión de corte uniforme a través del centro de la muestra con momento de flexión nulo. Cabe destacar que es un ensayo relativamente nuevo, el cual aún está en proceso de estudio y es por eso que será abordado en este proyecto. Además, existen una serie de beneficios relacionados con el uso de la prueba de Iosipescu, incluida la precisión, la simplicidad y el desarrollo de una región de corte uniforme que sea representativa de las condiciones del mundo real y óptima para la investigación teórica. Por último, se implementarán múltiples ensayos para este método, con diferentes tipos de materiales, para luego comparar sus propiedades interfaciales y su comportamiento cuando están sometidos a diversas cargas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Validar el ensayo Iosipescu para determinar la resistencia interfacial de distintos materiales compuestos y de impresión 3D.

1.2.2 Objetivos específicos

- Rediseñar y fabricar mordaza en aluminio para llevar a cabo el ensayo Iosipescu.
- Puesta a punto y calibración del ensayo Iosipescu.
- Evaluar el comportamiento de distintos materiales sometidos al ensayo de corte de Iosipescu.

1.3 Hipótesis de investigación

A partir de la información obtenida respecto a la fabricación de la máquina y preparación de las muestras con las distintas fibras, se plantea la siguiente hipótesis.

- Relacionar las escalas entre el ensayo Iosipescu y el ensayo Short Beam Strength para la caracterización de materiales compuestos.
- Validar el ensayo Iosipescu para la determinación del IFSS en diferentes materiales compuestos.

1.4 Metodología

El estudio de las propiedades mecánicas interfaciales de los materiales compuestos se lleva a cabo de manera general, de acuerdo con el procedimiento descrito a continuación:

- I. Desarrollo del marco teórico con ayuda de la información bibliográfica recopilada, el cual está relacionado con todos los conceptos necesarios a considerar en el estudio de los ensayos de corte interfacial en materiales compuestos reforzados con fibra de carbono, fibra de vidrio o fibra orgánica (ensayos a distintas escalas que involucran materiales compuestos por fibras y matriz) y el estado del arte que incorpora las investigaciones y resultados obtenidos en la literatura para los distintos tipos de ensayos que se estudian en el proyecto.

- II. Luego, se desarrolla la parte práctica del proyecto, donde se comienza con la verificación de los elementos y materiales disponibles en el laboratorio para una correcta fabricación de las muestras que serán sometidas a prueba. Posterior a esto, se rediseña y fabrica la máquina encargada de realizar los ensayos de Iosipescu, para luego calibrarla y realizar la puesta a punto con el fin de iniciar la implementación de los ensayos de acuerdo con la normativa requerida, las cuales se encuentran detalladas según corresponda al caso de tracción, flexión o corte [5]. Los ensayos mencionados recientemente deben ser realizados previo control de calidad de las muestras utilizadas (como densidad del compuesto, y porcentajes de fibra, resina y aire en la composición del material compuesto). El ensayo de Iosipescu requiere que las muestras sean rectangulares con dos muescas en V cortadas a lo largo del centro. Las muestras se cargan en un accesorio de prueba especializado y se aseguran manteniendo un lado de la muestra estático mientras que el otro lado se mueve horizontalmente hacia abajo. Dependiendo de la resistencia de la matriz de fibra, las muestras se romperán a diferentes cargas, que posteriormente se utilizan para determinar IFSS [6].

- III. Posteriormente, a través de software como Matlab se realiza el análisis de resultados obtenidos de los ensayos realizados, para luego compararlos con las pruebas ejecutadas en distintos materiales compuestos, lo que permite una comparación con los valores obtenidos en la literatura y la posterior discusión de la validez de estos. De este modo, se puede apreciar el comportamiento de las propiedades de resistencia al corte interfacial para cada ensayo efectuado.

La primera parte de la investigación se desarrolla en el *capítulo 2: Marco teórico* y *capítulo 3: Estado del arte*. El *capítulo 4: metodología* está destinado a un desarrollo más extenso y específico de la metodología de trabajo, por lo que se detalla la segunda parte en la sección de *implementación de los ensayos*. La tercera parte se desarrolla en el *capítulo 5: Resultados y discusión*. La metodología general de trabajo de la investigación se muestra en la Figura 1.1; en este caso, los componentes del proyecto se identifican por colores (rojo para la primera parte, verde para la segunda y amarillo para la tercera). La Carta Gantt se muestra en la Figura 1.2 para la planificación y realización de la investigación.

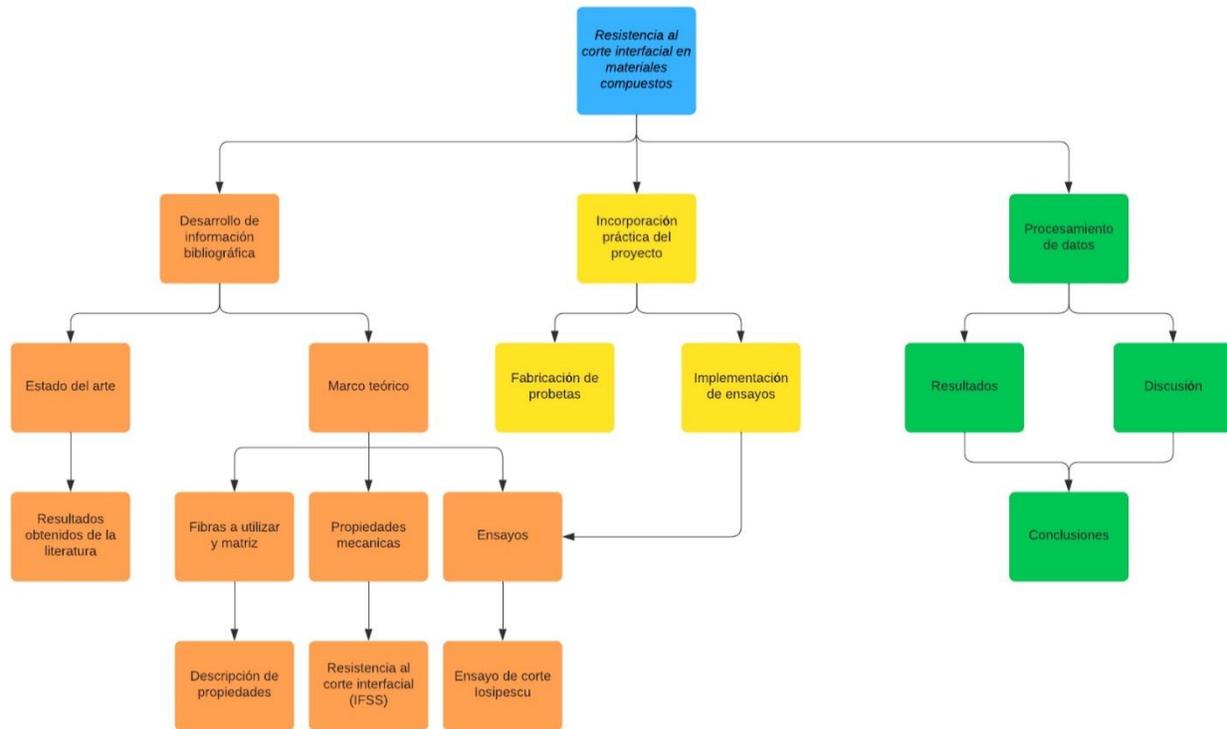


Figura 1.1: Esquema de la metodología de trabajo

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Material compuesto

Un material compuesto es la combinación de dos o más materiales, donde uno de los materiales es el refuerzo y se encuentra en forma de fibras, laminas o partículas y es embebido en el otro material llamado matriz. El refuerzo se encarga de aportar la rigidez y la resistencia mecánica al compuesto, mientras que la matriz tiene mayor ductilidad y permite mantener unidas las fibras para darle la forma requerida. Los CFRP son materiales compuestos formados por una matriz polimérica y un refuerzo de fibra de carbono. Estos materiales tienen gran uso debido a su alta resistencia a la tracción, al impacto y la corrosión, además de ser materiales muy ligeros.

2.1.1 Matriz

Para la fabricación de materiales compuestos se suele utilizar una matriz epóxica en la mayoría de los casos, la cual corresponde a un polímero termoestable que presenta un grupo epóxido (dos átomos de carbono y un átomo de oxígeno) en su estructura química. Se encuentra inicialmente en estado líquido y por medio de un proceso de curado cambia a un estado sólido, donde adquiere mayor resistencia. Sin embargo, la matriz tiene propiedades más bajas que el refuerzo en cuanto a resistencia a la tracción, impacto y temperatura, por lo que se aprovecha principalmente para generar la adhesión entre las capas del refuerzo y darle una forma estable al compuesto [7]. En la Figura 2.1 se exhibe una curva típica de esfuerzo - deformación de una matriz polimérica. Posteriormente, se presentan las propiedades mecánicas de la resina epóxica que se muestran en la Tabla 2.1.

Fuente: Composite materials (Chawla, 2012)

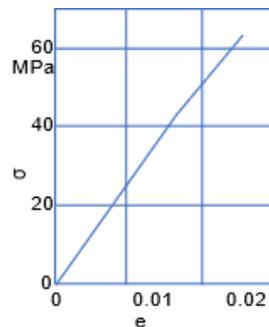


Figura 2.1: Curva esfuerzo - deformación de un material polimérico

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas de la resina epóxica

Fuente: Composite materials (Chawla, 2012)

Densidad [g/cm ³]	S _{ut} [MPa]	E [GPa]	Contracción de curado %	T _{max} de uso [°C]
1.2 – 1.3	50 – 125	2.5 – 4	1 – 5	150

2.1.2 Fibra de carbono

Esta fibra es un polímero compuesto por una gran cantidad de átomos de carbono que poseen una estructura cristalina hexagonal o amorfa, formada por diferentes capas. Cada fibra presenta un diámetro entre 5 y 10 μm y son clasificadas en cinco grupos de acuerdo con las propiedades de resistencia a la tracción y módulo elástico. La Tabla 2.2 exhibe la clasificación de las fibras de acuerdo con sus propiedades [8].

Tabla 2.2: Clasificación de las fibras de carbono
Fuente: (Bhatt & Goe, 2017)

Denominación	Característica
Módulo ultra alto (UHM)	$E > 450 \text{ GPa}$
Módulo alto (HM)	$350 < E < 450 \text{ GPa}$
Módulo intermedio (IM)	$200 < E < 350 \text{ GPa}$
Módulo bajo y alta resistencia (HT)	$E < 100 \text{ GPa}, S_{ut} > 3 \text{ GPa}$
Super alta resistencia (SHT)	$S_{ut} > 4.5 \text{ GPa}$

2.1.3 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material compuesto hecho de filamentos delgados de vidrio, que se entrelazan para formar una estructura tridimensional resistente. Las fibras de vidrio utilizadas en la construcción suelen tener un diámetro de alrededor de 10 μm mientras que las fibras utilizadas en aplicaciones de alta tecnología pueden ser mucho más delgadas, con diámetros inferiores a 1 μm [9]. Esta fibra se utiliza en una amplia gama de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como su alta resistencia a la tracción, su durabilidad, su resistencia a la corrosión, su ligereza y su capacidad para resistir altas temperaturas. En la Tabla 2.3 se expone la clasificación de las fibras de vidrio según su módulo elástico.

Tabla 2.3: Clasificación de las fibras de vidrio
Fuente: (JPS Composite Materials, 2015)

Denominación	Módulo elástico [GPa]
Fibra Tipo E	70-80
Fibra Tipo S	80-90
Fibra Tipo C	70-80
Fibra Tipo A	45-55

2.2 Propiedades mecánicas

Al momento de evaluar el desempeño mecánico de un material es necesario conocer qué propiedades mecánicas tienen mayor importancia para lograr una mejor caracterización del material en estudio. En este caso, las fibras de carbono, fibras de vidrio o fibras de aramida mejoran la resistencia, carga de rotura, la rigidez, la relación resistencia/peso, por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite los esfuerzos a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad al compuesto, mientras las fibras soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada [11]. Cabe destacar que las propiedades mecánicas de un material compuesto están en función del porcentaje de refuerzo y de la orientación de las fibras. Los materiales de refuerzo presentan morfologías muy variadas con orientaciones características. Las fibras cortas suelen tener una orientación aleatoria, para fibras continuas se produce la orientación anisotrópica deliberada. Las fibras pueden disponerse como telas o tejidos o ser producidas en forma de fibras largas. También se puede cambiar la orientación en las capas alternadas de fibras largas. En cuanto a la orientación de las fibras se presentan tres casos:

1. Unidireccional (Rovings): cuando todas las fibras están paralelas.
2. Bidireccional (Tejidos): cuando el refuerzo posee una orientación perpendicular.
3. Multidireccional (Mats): en este caso, las fibras están orientadas en todas direcciones.

La Tabla 2.5 muestra la disposición de las fibras y su porcentaje de refuerzo conseguido para el material compuesto. La Figura 2.2 muestra la morfología de los materiales compuestos reforzados con distintos tipos de fibras.

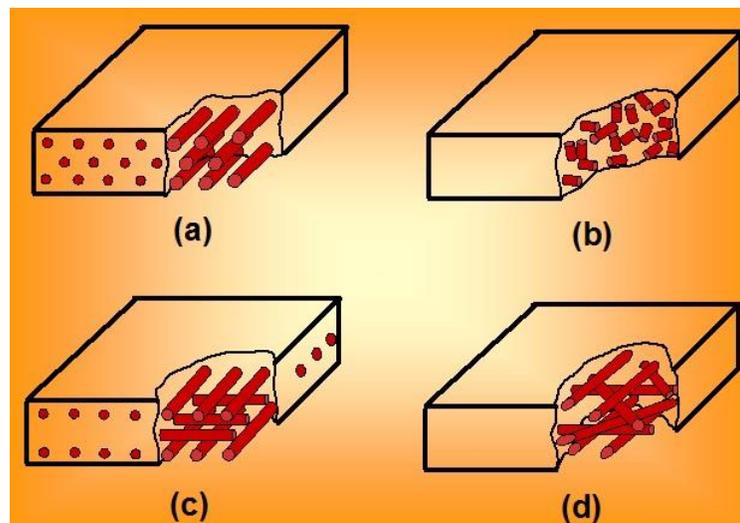


Figura 2.2: Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas orientadas al azar. c) Fibras ortogonales o tejidos. d) Fibras en capas múltiples

Tabla 2.1: Orientación de las fibras y porcentaje de refuerzo
Fuente: Ensayos y calidad de materiales compuestos (Miravete, 2018)

Tipo de orientación	Refuerzo
Unidireccional	70 – 80 %
Bidireccional	45 – 65 %
Multidireccional	20 – 40 %

Fuente: (UPV, 2015)

2.2.1 Módulo elástico (E)

El módulo elástico para materiales compuestos se refiere a una propiedad mecánica que describe la rigidez y la capacidad de deformación elástica de un material compuesto bajo la aplicación de una carga externa. La rigidez es entendida como la resistencia de un material a la deformación. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo elástico tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tracciona una barra, aumenta de longitud [12].

Para definir íntegramente el módulo elástico para materiales compuestos implica considerar diversos aspectos y propiedades relevantes:

- **Anisotropía:** Los materiales compuestos son inherentemente anisotrópicos, lo que significa que sus propiedades pueden variar según la dirección de carga aplicada. El módulo elástico para materiales compuestos se expresa como un tensor de segundo orden para tener en cuenta estas variaciones direccionales.
- **Ley de Hooke:** La relación entre el esfuerzo (fuerza aplicada por unidad de área) y la deformación elástica se rige por la ley de Hooke. Esta ley establece que, dentro del rango elástico, el esfuerzo es proporcional a la deformación. Para materiales compuestos, esta relación se expresa mediante una matriz de constantes elásticas, que describe las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones en cada dirección.
- **Fracción volumétrica de las fibras:** El módulo elástico de un material compuesto depende en gran medida de la fracción volumétrica de las fibras de refuerzo en la estructura. A medida que aumenta la fracción volumétrica de las fibras, aumenta la rigidez global del material compuesto.
- **Orientación de las fibras:** La orientación de las fibras de refuerzo tiene un impacto significativo en el módulo elástico de los materiales compuestos. La alineación de las fibras en una dirección particular puede aumentar la rigidez en esa dirección y disminuir la rigidez en direcciones perpendiculares.
- **Interfaz matriz-fibras:** La calidad de la interfaz entre la matriz y las fibras también afecta el módulo elástico. Una interfaz débil o defectuosa puede disminuir la transferencia eficiente de carga entre las fibras y la matriz, lo que resulta en una reducción del módulo elástico efectivo.

2.2.2 Resistencia máxima a la tracción (ultimate tensile strength S_{ut})

Se define como una propiedad mecánica de los materiales que indica la máxima carga o fuerza que un material puede resistir antes de romperse o experimentar una deformación permanente bajo una fuerza de tracción uniaxial. Es una medida importante para evaluar la capacidad de un material para soportar cargas de tracción y es ampliamente utilizada en la ingeniería y el diseño de estructuras.

En esencia, la resistencia máxima a la tracción se determina mediante ensayos de tracción uniaxial, donde una muestra del material se somete a una fuerza axial de tracción gradualmente creciente hasta que se produce la fractura. Durante el ensayo, se registra la carga máxima aplicada y se divide por el área transversal original de la muestra para obtener la resistencia máxima a la tracción [13].

En los gráficos expuestos a continuación en la Figura 2.3 se muestra la curva esfuerzo deformación para material tradicional y para materiales compuestos.

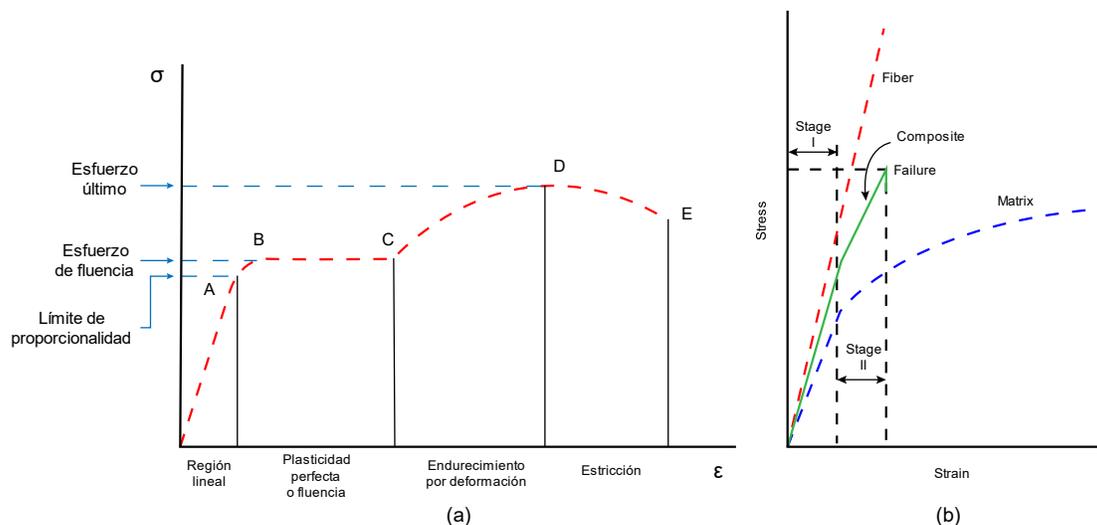


Figura 2.3: Curva esfuerzo - deformación a) material tradicional b) material compuesto
Fuente: *Fiber reinforced polymers* (Masuelli, 2013)

De la Figura 2.3 (a) se observa que es posible identificar distintas zonas en la curva esfuerzo – deformación en los materiales tradicionales, destacando la región elástica y la presencia del esfuerzo de fluencia antes entrar en plasticidad. Por otra parte, para los materiales compuestos, en la Figura 2.3 (b) se muestra que el refuerzo y la matriz presentan curvas muy distintas entre sí, esto evidencia que el comportamiento de los materiales compuestos es muy diferente al esperado de cualquier otro material, lo cual implica que no es posible distinguir ciertos parámetros regulares en la curva, dando mayor relevancia a la resistencia máxima a la tracción del material y el módulo elástico, siendo estos los valores más representativos del comportamiento del material [14].

2.2.3 Resistencia al corte interlaminar (ILSS)

Es una medida de la resistencia del material compuesto a la delaminación cuando es sometido a fuerzas de corte paralelas a las capas del laminado [24]. Se determina por medio de ensayos macro mecánicos, siendo el más común el ensayo de flexión de viga corta (SBS). El estudio de esta propiedad es fundamental debido a que la mayor cantidad de fallas en los compuestos se debe a la separación de las láminas de estos a causa de una mala adhesión entre la fibra y la resina que constituyen al material compuesto.

2.2.4 Resistencia al corte interfacial (IFSS)

La resistencia al corte interfacial se refiere a la capacidad de resistir la separación o el deslizamiento de dos materiales diferentes en la interfaz entre ellos cuando se someten a una fuerza de corte.

En el contexto de materiales compuestos, la resistencia al corte interfacial es especialmente relevante. Esta propiedad evalúa el esfuerzo de la interfaz entre las fibras de refuerzo y la matriz para soportar cargas de corte sin separarse o deslizarse. Asimismo, depende de varios factores, como la adhesión entre los materiales en la interfaz, la rugosidad de la superficie de contacto, la compatibilidad química, la presencia de agentes de acoplamiento y el procesamiento adecuado de los materiales compuestos.

2.3 Norma ASTM D5379

La norma ASTM D5379 se titula "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method" (Método de prueba estándar para propiedades de corte de materiales compuestos mediante el método de la viga con muesca en V). Esta norma establece los procedimientos y los equipos necesarios para determinar las propiedades de corte de los materiales compuestos mediante el método de la viga con muesca en V.

La prueba se realiza en una máquina universal de ensayos mecánicos que puede aplicar una carga axial y una carga de corte. El material compuesto se corta en una forma de viga con muesca en V, en la cual los bordes de la muesca tienen un ángulo de 45 grados con respecto al eje longitudinal de la viga. La longitud y la profundidad de la muesca se especifican en la norma ASTM D5379 y varían en función del tamaño y la forma de la muestra.

La muestra se sujeta en la máquina de ensayos de tal manera que la carga axial y la carga de corte se apliquen en la zona no mescada de la viga. La prueba comienza con la aplicación de una carga axial constante, y luego se aplica una carga de corte en la zona de la muesca. La deformación se mide con extensómetros colocados en diferentes puntos de la muestra.

La norma ASTM D5379 establece que los resultados de la prueba deben incluir la fuerza máxima de corte, la tensión máxima de corte, la deformación máxima de corte, el esfuerzo cortante en la rotura y el módulo de corte en la zona elástica.

Esta norma es ampliamente utilizada en la industria aeroespacial y de materiales compuestos para la caracterización de las propiedades de corte de los materiales compuestos. Los resultados de la prueba pueden ser útiles en la evaluación del rendimiento y la integridad estructural de los materiales compuestos en aplicaciones críticas, como la construcción de aeronaves o vehículos espaciales [15].

2.4 Ensayo de corte de Iosipescu

Para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos es necesario realizar diferentes ensayos que permitan obtener datos que puedan ser procesados para obtener los valores de las propiedades de interés.

El ensayo de Iosipescu es un método utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales compuestos con diferentes orientaciones de las capas, especialmente su resistencia al corte interfacial. Este ensayo es particularmente útil para medir la resistencia al corte de laminados de materiales compuestos con diferentes orientaciones de las capas. Esto permite evaluar la integridad de la interfaz entre las capas y medir la capacidad del material compuesto para resistir el deslizamiento o la separación de las capas bajo cargas de corte.

En este caso no se aplica la carga directamente sobre el compuesto, ya que se fabrica una probeta de resina epóxica con cierta cantidad de fibras de carbono en su sección transversal justo en el centro de la probeta, tal como se muestra en la Figura 2.4. Posteriormente, se expone la Tabla 2.6 con las dimensiones del espécimen de ensayo de corte Iosipescu.

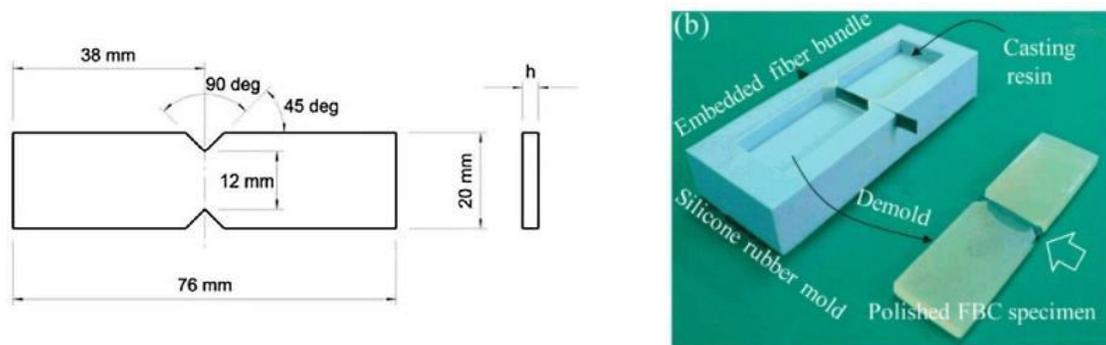


Figura 2.4: (a) Dimensiones de la muestra y (b) Preparación de muestra para ensayo Iosipescu
Fuente: Norma ASTM D5379 (International ASTM, 2019)

Tabla 2.2: Dimensiones del espécimen de ensayo
Fuente: Norma ASTM D5379 (International ASTM, 2019)

Dimensión	ASTM D5379
d1	20.0
d2	4.0
h	2.0
L	76.0
w	12.0

Las muestras de Iosipescu se fabrican incorporando y mezclando la resina epoxy y agente catalizador en los moldes de caucho de silicona con un trozo de haz de fibra incrustado en el medio, como se ilustra en la Figura 2.4 (b). La Figura 2.4 (a) muestra las dimensiones del espécimen para la prueba de corte de Iosipescu. La resina se cura mediante un procedimiento de mantener la muestra a temperatura ambiente por 24 horas en el laboratorio. Posteriormente, las muestras fueron pulidas hasta que la fibra sea expuesta fuera de la superficie y se remueva el exceso de resina en las probetas.

El método de Iosipescu es valioso para determinar la adhesión interfacial, y el IFSS se determina utilizando la ecuación 4 donde t_{Eff} es el grosor efectivo de la muestra y h es la distancia entre las dos muescas centrales. P es la carga máxima en caso de falla y se asigna de forma diferente dependiendo del patrón de orientación de la capa de acuerdo con ASTM D5379.

$$IFSS = \frac{P}{t_{Eff} * h}$$

A continuación, se presenta la Figura 2.5 con los tipos de fallas comunes que se detectan al realizar el ensayo de corte Iosipescu en probetas de materiales compuestos. Cada caso presenta una configuración de fractura diferente en relación con las capas del material. Estas diferentes configuraciones de falla en el ensayo de corte Iosipescu resaltan la complejidad de la respuesta de los materiales compuestos a las cargas de corte y la importancia de comprender las propiedades individuales de las capas que componen el material compuesto.

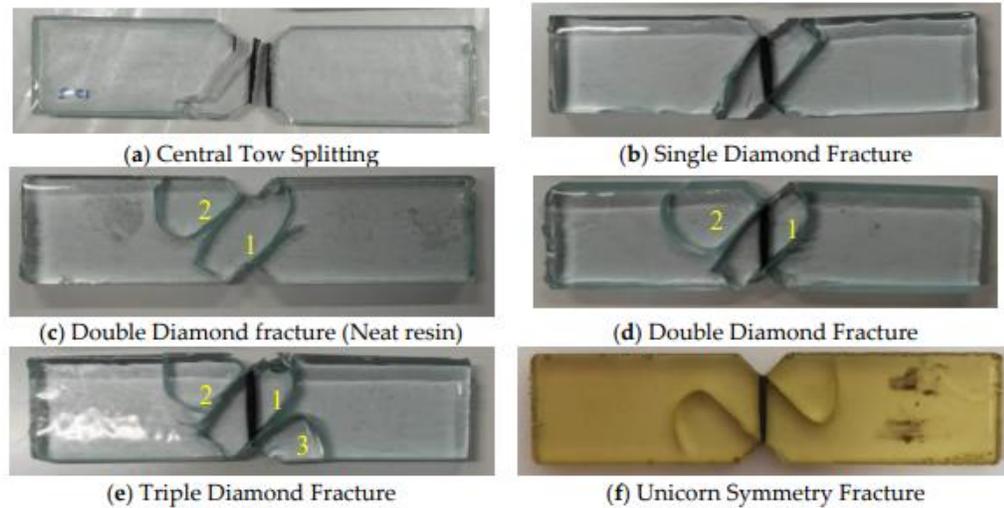


Figura 2.5: Modos de falla en ensayo de corte Iosipescu
Fuente: (Stojceveski et al., 2018)

2.5 Norma ASTM D2344

La norma ASTM D2344 establece el método de prueba estándar para la determinación de las propiedades de corte interlaminar de materiales compuestos mediante el ensayo de flexión de viga corta. Esta norma es ampliamente utilizada en la industria para evaluar la resistencia al corte interlaminar de laminados de fibra de vidrio, carbono u otros materiales con resinas poliméricas termoendurecibles o termoplásticas.

En términos de especificaciones de las muestras, la norma ASTM D2344 establece que las muestras deben tener una forma rectangular con una relación de aspecto de aproximadamente 2:1. Se requiere que las muestras tengan al menos dos capas de refuerzo y que estas capas estén simétricamente dispuestas alrededor del plano medio de la muestra. Además, se proporcionan dimensiones específicas para el tamaño de las muestras.

La norma también establece las condiciones de ensayo, incluyendo la velocidad de desplazamiento durante el ensayo. En el caso del ensayo de flexión de viga corta, se recomienda una velocidad constante de 2 mm/min. Esta velocidad asegura que el ensayo se realice de manera controlada.

En cuanto al aparato de ensayo, la norma especifica que se puede utilizar una máquina de ensayos universales o un dispositivo específico para ensayos de corte interlaminar. El aparato debe ser capaz de aplicar la carga requerida y permitir el movimiento de corte relativo entre las mitades de la muestra.

La norma también proporciona detalles sobre el cálculo y la evaluación de los resultados. Se calcula la resistencia al corte interlaminar dividiendo la carga máxima aplicada por el área neta de corte, que se determina midiendo las dimensiones de las secciones transversales de la muestra en el plano de corte. Se recomienda realizar múltiples pruebas y reportar la media y la desviación estándar de los resultados para obtener una mayor precisión.

2.6 Ensayo flexión de viga corta (SBS)

Este ensayo es aplicado directamente al material compuesto y se define según la norma ASTM D2344 “*Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*” la cual entrega medidas y dimensiones para la fabricación de las probetas de ensayo. La Tabla 2.6 muestra las dimensiones de las probetas para ensayo en milímetros según la norma.

Tabla 2.6: Dimensiones del espécimen de ensayo flexión de viga corta
Fuente: Elaboración propia en base a norma ASTM D2344

Dimensión	ASTM D2344
Espesor	4
Largo	2
Ancho	8
Separación entre apoyos	20

El ensayo SBS (Short Beam Strength, por sus siglas en inglés) consiste en una flexión de tres puntos, donde la carga se aplica de forma vertical sobre la probeta de ensayo como se exhibe en la Figura 2.6.

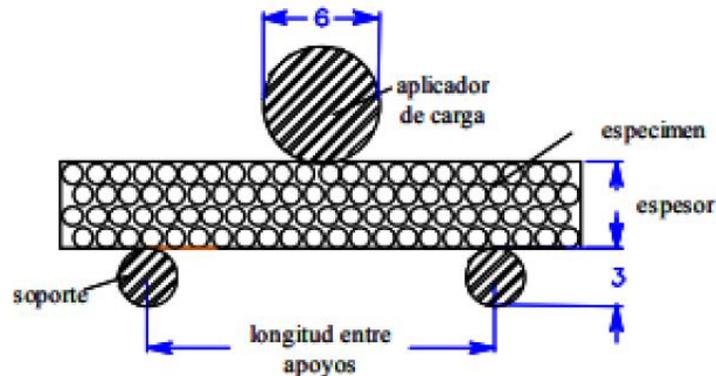


Figura 2.6: Esquema de aplicación de la carga en el ensayo de viga corta
Fuente: Norma ASTM D2344 (International ASTM, 2000)

Para el cálculo de los valores de resistencia al corte interlaminar se tiene que:

$$ILSS = \frac{3P_{Max}}{4(bxh)}$$

Donde P_{Max} es la máxima fuerza observada en la prueba, b es el ancho de la probeta y h es el espesor.

Capítulo 3: Estado del Arte

3.1 Resultados actuales ensayo de corte de Iosipescu

3.1.1 Resultados de literatura

Las muestras de Iosipescu realizadas por Stojceveski et al., 2019. Fueron creadas tensando un cable de 12k en un molde de muesca en V de silicona especialmente diseñado (Silastomer P40). Los cables se tensaron a mano y se insertaron a través de la cavidad del molde. Posteriormente, se utilizó un medidor de tensión manual RTMB para aplicar una carga de tensión de ~ 100 N a las fibras antes de ser pegado a una placa de caula. La resina se inyectó en el molde de silicona para incrustar fibras y posteriormente se curó. Las muestras curadas se retiraron de los moldes de silicona y se utilizó un cortador rotativo de precisión (Dremel 3000, Alemania) para eliminar el exceso de fibra de las muestras y refinar la forma de muesca en V. Se cortó cuidadosamente un radio de muesca de 1,3 mm para mitigar las concentraciones de tensión de acuerdo con ASTM D5379.

Las muestras se cargaron en un accesorio de prueba Modified Wyoming Iosipescu que se expone en la Figura 3.1. Luego, el dispositivo se fijó a una máquina Instron de 10 kN y las muestras se fijaron en su interior. El ensayo se realiza manteniendo un lado de la muestra estático mientras que el otro extremo se empuja hacia abajo a una velocidad de 2 mm/min. Esto crea una región de esfuerzo cortante puro a través del centro de la muestra donde están incrustadas las fibras. Dependiendo de la fuerza de la unión interfacial, la carga de falla variará en consecuencia [6].

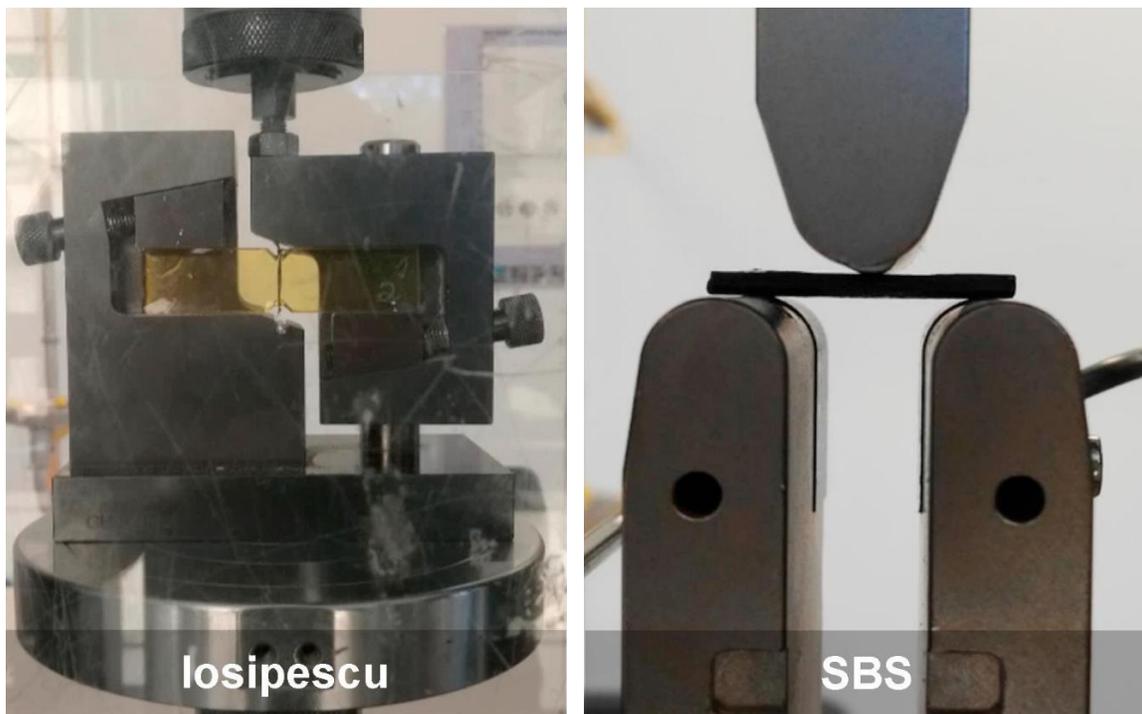
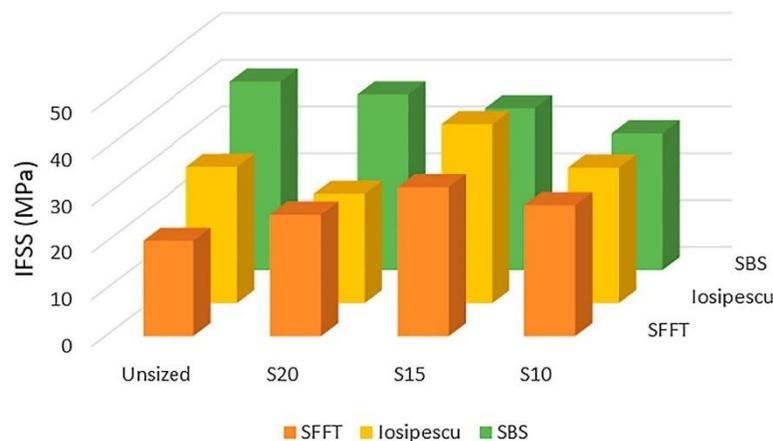


Figura 3.1: (a) Especimen de Iosipescu montado y (b) Especimen de SBS montado

Fuente: (Stojceveski et al., 2019)

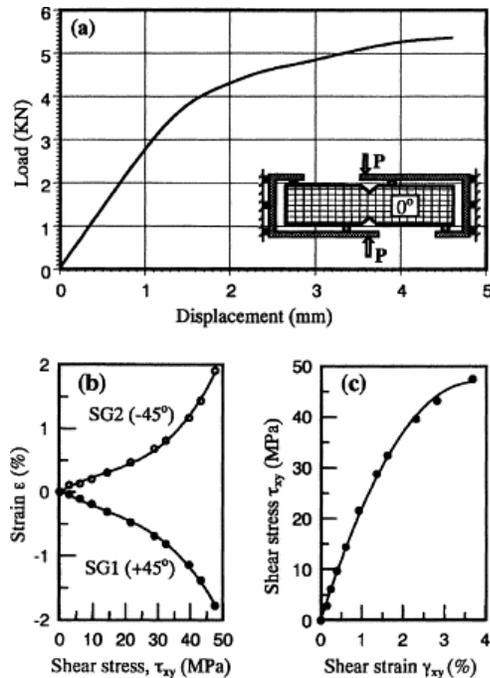
El ensayo descrito anteriormente corresponde a lo realizado por Stojcevski et al., 2019, donde se comparó los métodos de prueba interfaciales (SFFT, SBS e Iosipescu) y las sensibilidades a las condiciones de tratamiento de la superficie de fibra de carbono. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.2. Si el amperaje se mantiene constante y el tamaño se altera como variable independiente, se observa un orden diferente de IFSS de mejor rendimiento dependiendo del método de prueba utilizado. Por lo tanto, IFSS depende de la escala en la que se determinan donde la deposición de tamaño es variable. Comparativamente, los valores de IFSS determinados a través de SBS e Iosipescu para fibras sin tamaño modificado y de tamaño ligero fueron notablemente mayores que todas las demás pruebas para todos los tipos de fibras, excluyendo las fibras de tamaño S10. Esto sugiere que las pruebas SBS pueden ser sensibles al tamaño y, por lo tanto, sobrestimar el IFSS en estas circunstancias.



(0 A)	SFFT (Micro)	Iosipescu (Meso)	SBS (Macro)
Unsize	20.37 (1.37)	29.09 (4.41)	40.27 (1.21)
S20	25.95 (1.01)	23.34 (4.10)	37.52 (3.88)
S15	31.80 (2.46)	38.21 (6.46)	34.56 (1.48)
S10	27.95 (3.06)	28.92 (1.65)	29.23 (1.14)

Figura 3.2: Valores IFSS para fibras no tratadas (0 A) en cuatro tratamientos de dimensionamiento
Fuente: (Stojcevski et al., 2019)

A continuación, se presenta otro estudio realizado por Khashaba, 2004. Donde, en la Figura 3.3, se muestra el diagrama esfuerzo-deformación, de la muestra de fibra de vidrio de capas cruzadas, impresa desde la máquina de ensayos en la prueba de tensión. La característica principal de esta curva es la rodilla a unos 40 MPa. Esta rodilla se debió a la falla de las capas transversales (90°) en los laminados cruzados. Se observó una redistribución de la tensión entre las fibras longitudinales y la matriz, lo que condujo a un aumento de los esfuerzos de tracción con un módulo de tracción aparente inferior al de la porción lineal inicial. El fracaso final es catastrófico sin ningún límite de elasticidad [16].



**Figura 3.3: Propiedades de corte en el plano del laminado de capas cruzadas con ángulo 0° , $[0/90]_2s$: (a) Diagrama carga-desplazamiento de la máquina de ensayos, (b) τ_{xy} frente a $\varepsilon+45$ y $\varepsilon-45$ de la probeta Iosipescu, (c) τ_{xy} frente a γ_{xy} , $\gamma_{xy}=\varepsilon-45-\varepsilon+45$.
Fuente: (Khashaba, 2004)**

Todas las curvas tenían comportamientos proporcionales al principio. Justo más allá del límite proporcional, se volvieron no lineales debido a la acumulación de grietas en la matriz. Al aumentar la carga aplicada se incrementó la desviación de la linealidad debido a la propagación de las grietas a lo largo de las direcciones de las fibras y al fallo de algunas fibras por tensión en la dirección de carga transversal. El fallo de las probetas $[0/90]_s$ se debió a un esfuerzo de corte puro a lo largo de las raíces de las muescas en V, donde las grietas de corte son paralelas a la dirección de carga.

Luego, se expone otro estudio realizado por Almeida, 2014. El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la configuración de laminación en las propiedades de corte interlaminar e interfacial de compuestos epoxi reforzados con fibra de vidrio. Se investigaron diferentes laminados ($[0]_5$, $[90]_5$, $[0/90/0/90/0]$ y orientado aleatoriamente) bajo prueba de Iosipescu, donde la velocidad de prueba es $1 \left[\frac{mm}{min} \right]$ y la célula de carga está a 50 [kN].

En cuanto al corte en el plano de los laminados y en función de las curvas de carga \times desplazamiento y los modos de falla observados, el corte con muescas en V se encontró más adecuado que Iosipescu, probablemente debido a la sección de medidor más grande (con mayor ancho y largo entre muescas). La resistencia al corte presentó la misma tendencia tanto para Iosipescu como para V-notched, a pesar de que el nivel de esfuerzo cortante fue mucho mayor para el V-notched rail. Sin embargo, para materiales con baja resistencia al corte, como los estudiados en este trabajo, esto no es tan decisivo [17]. En la Tabla 3.1 se muestra los resultados obtenidos para IFSS con distinta orientación de la muestra, en este caso se tomará en cuenta solo la orientación de $[0^\circ]$.

Tabla 3.1: Resistencia al corte interfacial obtenido para ensayo de Iosipescu
Fuente: (Almeida, 2014)

Orientación de la muestra	IFSS (MPa)
[0] ₅	20,7 ± 1,3
[0/90/0/90/0]	22,3 ± 0,9
[90] ₅	14,3 ± 1,9

Por otra parte, se realizó una investigación sobre materiales compuestos por Ho et al., 1993. Las muestras se cortaron con una sierra circular adiamantada. Luego fueron molidas de forma plana y paralelas a una tolerancia de 0,0254 mm. La velocidad de rotación y la velocidad de avance de la muela abrasiva fueron 2950 RPM y 0,4 mm/min, respectivamente. La velocidad de avance de la muela abrasiva debe mantenerse baja para evitar la delaminación y la división cerca de las muescas. Para cada orientación de fibra, se preparan al menos cinco especímenes. Cualquier variación en el espesor de la muestra representa cambios locales en la fracción de volumen de fibra que podrían resultar en cambios en respuesta mecánica y resultados obtenidos.

Las probetas de Iosipescu no sufrieron variaciones de deformación por corte de la cara anterior a la posterior. Dado que la sección de ensayo de la probeta Iosipescu está sometida a corte puro y no hay presencia de un efecto de borde libre impredecible en este material compuesto unidireccional, la probeta Iosipescu se recomienda para mediciones precisas del módulo de corte de materiales compuestos, siempre que se utilicen las respuestas de rotura frontal y posterior.

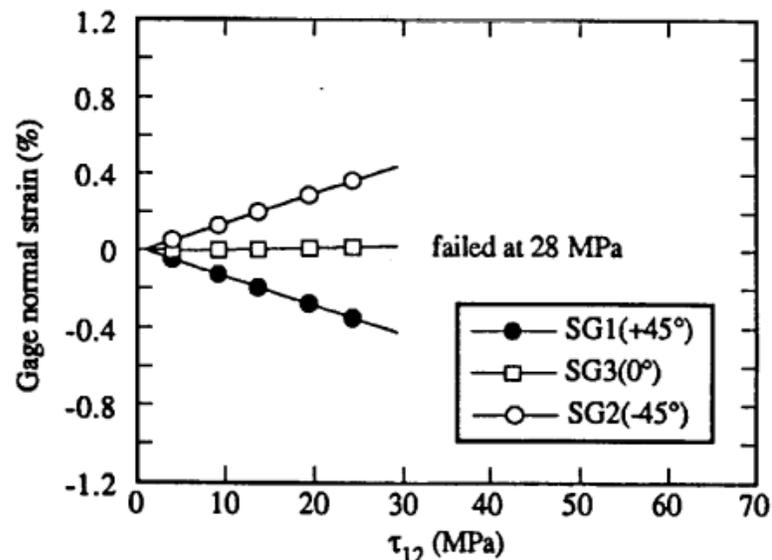


Figura 3.4: Diagramas de deformación-tensión para una muestra de grafito/epoxy
Fuente: (Ho et al., 1993)

En un estudio realizado por Enríquez et al., 2018, se examinó la influencia de la temperatura en la resistencia al corte interfacial de materiales compuestos de fibra de vidrio y resina epoxi mediante ensayos de Iosipescu. La velocidad de desplazamiento de la cruceta fue de 5 mm/min y la carga máxima aplicada alcanzó los 20 kN. Los resultados para los 10 especímenes utilizados mostraron que la resistencia al corte interfacial varió entre 19,7 y 31,6 MPa, y disminuyó a medida que la temperatura aumentaba [19]. Uno de los hallazgos más destacados fue la tendencia descendente en la resistencia al corte interfacial conforme la temperatura aumentaba. Este fenómeno sugiere la importancia de considerar la temperatura en el diseño y aplicación de estructuras compuestas similares, con el fin de garantizar un rendimiento óptimo y una durabilidad adecuada en diversas condiciones ambientales.

Otro estudio realizado por Liu et al., 2019, investigó la influencia de la velocidad de desplazamiento de la cruceta en la resistencia al corte interfacial de materiales compuestos de fibra de vidrio y resina epoxy utilizando ensayos de Iosipescu. La velocidad de desplazamiento utilizada fue de 1 mm/min y la carga máxima alcanzó los 30 kN. Los resultados para las 8 muestras ensayadas mostraron que la resistencia al corte interfacial varió entre 26,9 y 28,7 MPa, y se observó un aumento con la velocidad de desplazamiento [20].

En un estudio realizado por Choudhury et al., 2014, se investigó la influencia de la orientación de la fibra de carbono en la resistencia al corte interfacial de materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi mediante ensayos de Iosipescu. La velocidad de desplazamiento de la cruceta fue de 2 mm/min y la carga máxima aplicada alcanzó los 50 kN. Los resultados mostraron que la resistencia al corte interfacial varió entre 36,4 y 45,7 MPa, dependiendo de la orientación de la fibra de carbono [22]. El resultado más sobresaliente de este estudio es la clara dependencia de la orientación de la fibra de carbono con la resistencia al corte interfacial en el material compuesto. Este hecho destaca la necesidad de una planificación precisa de la orientación de las fibras en la fabricación de materiales compuestos, con el fin de optimizar su resistencia en aplicaciones específicas.

En un estudio más reciente, realizado por Cicala et al. (2021), se investigó la influencia de la adhesión en la resistencia al corte interfacial de materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi utilizando ensayos de Iosipescu. La velocidad de desplazamiento de la cruceta fue de 1 mm/min y la carga máxima aplicada alcanzó los 30 kN. Los resultados mostraron que la resistencia al corte interfacial varió entre 42,6 y 48,4 MPa, dependiendo del nivel de adhesión entre la fibra de carbono y la resina epoxi [23]. De este estudio se observa una relación directa entre el nivel de adhesión entre el material compuesto y la resistencia al corte interfacial. Resaltando la necesidad de enfoques de fabricación y técnicas de unión que maximicen la adhesión para lograr un óptimo nivel de resistencia al corte interfacial, lo que en última instancia contribuirá a la eficacia y seguridad de los productos basados en estos materiales compuestos.

3.2 Resultados actuales ensayo de flexión de viga corta (SBS)

Para el caso de ensayo de flexión de viga corta (SBS) en el estudio de Smith et al. (2017), se llevaron a cabo ensayos en muestras de material compuesto de fibra de carbono embebida con resina epoxi. Utilizando una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min, se obtuvo una ILSS promedio de 75.4 MPa [25]. La conclusión principal extraída de este estudio es la gran resistencia del material compuesto de fibra de carbono embebido en resina epoxi, evidenciada por la alta ILSS promedio registrada. Esta propiedad es crucial para aplicaciones donde se requiere una gran capacidad de carga y durabilidad en el plano interno del material.

Johnson y colaboradores (2018) realizaron pruebas de SBS en láminas de fibra de carbono con matriz de resina de poliéster. La velocidad de desplazamiento utilizada fue de 2 mm/min, y se obtuvo una ILSS promedio de 62.6 MPa [26]. Se concluye una sólida resistencia de las láminas de fibra de carbono con resina de poliéster en el plano interno del material, como se indica por la ILSS registrada. Aunque ligeramente menor en comparación con algunos materiales compuestos más avanzados, esta ILSS sigue siendo notable y sugiere que estos compuestos tienen un potencial valioso en aplicaciones donde se prioriza la relación costo-rendimiento.

En otro estudio realizado por Liu et al. (2019), se examinó un tejido de fibra de carbono con resina de poliamida reforzada con vidrio mediante el ensayo de SBS. Mediante una velocidad de desplazamiento utilizada fue de 1 mm/min y se obtuvo una resistencia en el plano interlaminar (ILSS) promedio de 80.7 MPa [27]. Los investigadores observaron una notable capacidad del tejido de fibra de carbono con resina de poliamida reforzada con vidrio para resistir cargas en el plano interno del material, como indica la alta ILSS obtenida.

Chen et al. (2017) llevaron a cabo ensayos de flexión de viga corta (SBS) en muestras de material compuesto de fibra de vidrio impregnada con resina epoxi. Utilizando una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min y una carga máxima de 15 kN, se obtuvo una ILSS promedio de 45.3 MPa [28]. Aunque este valor de ILSS puede ser inferior en comparación con otros materiales compuestos, la relación entre propiedades y costo podría hacer que esta combinación sea óptima en situaciones donde no se requiera la máxima resistencia interlaminar.

En el estudio de Smith y colaboradores (2018), se realizaron pruebas de SBS en laminados de fibra de vidrio con matriz de resina de poliéster. La velocidad de desplazamiento utilizada fue de 2 mm/min y la carga máxima aplicada fue de 10 kN. Finalmente, se obtuvo una ILSS promedio de 35.5 MPa [29]. Se destaca la importancia de la selección de materiales adecuados en función de los requisitos específicos de cada aplicación. Aunque las ILSS obtenidas puedan no ser las más altas en comparación con otros materiales compuestos, este tipo de laminados de fibra de vidrio con resina de poliéster puede ser una elección viable en aplicaciones donde se buscan propiedades, como la resistencia química. Además de seguir comparando y validando los modelos de ensayos de corte interlaminar e interfacial.

3.3 Resultados actuales

A continuación, en la Tabla 3.2 se presentan resultados de la literatura relacionada, donde se reflejan valores experimentales obtenidos por otros autores para IFSS. Posteriormente, se exhiben los resultados actuales sobre el ILSS para ensayos de flexión de viga corta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2: Referencias de la literatura para ensayo de Iosipescu
Fuente: Elaboración propia con base en literatura

Autor	Magnitud IFSS [MPa]	Velocidad de desplazamiento $\left[\frac{mm}{min}\right]$	Tipo de fibra
Choudhury et al.	45.7	2	Carbono
Cicala et al.	48.4	1	Carbono
Melin et al.	55.7	4	Carbono
Stojcevski et al.	29.1	2	Carbono
Ho et al.	28.0	4	Grafito
Enríquez et al.	31.6	5	Vidrio
Khashaba	40.0	1	Vidrio
Almeida et al.	20.7	1	Vidrio
Liu et al.	28.7	1	Vidrio

Tabla 3.3: Referencias de la literatura para ensayo flexión de viga corta
Fuente: Elaboración propia con base en literatura

Autor	Magnitud ILSS [MPa]	Velocidad de desplazamiento $\left[\frac{mm}{min}\right]$	Tipo de fibra
Smith et al.	75.4	1	Carbono
Jonshon et al.	62.3	2	Carbono
Liu et al.	80.6	1	Carbono
Chen et al.	45.7	1	Vidrio
Smith et al.	35.5	2	Vidrio

En la microescala los ensayos para medir la resistencia al corte interfacial (IFSS) se centran en analizar las propiedades mecánicas en interfaces y capas individuales de los materiales compuestos. Además, permiten un análisis detallado de las propiedades a nivel microscópico. Estos pueden revelar información sobre los mecanismos de fractura y las características específicas de la interfaz o las capas individuales. Asimismo, permiten comprender fenómenos como la adherencia interfacial, la transferencia de carga y la deformación localizada en la microestructura. Estos ensayos son útiles para evaluar la influencia de la geometría de la interfaz, la rugosidad y la presencia de defectos en la resistencia al corte interfacial.

En la mesoescala, los ensayos se realizan a una escala intermedia y pueden involucrar probetas compuestas de varias capas. Los ensayos de IFSS en la mesoescala, como es el ensayo de corte de Iosipescu, ofrece una evaluación más representativa del comportamiento de las interfaces y las capas en un nivel más macroscópico. Además, se posibilita comprender la influencia de la calidad de la interfaz, la transferencia de carga entre capas, el efecto de la presencia de defectos, la distribución de tensiones y la cohesión interfacial en la resistencia al corte. Si bien los ensayos en mesoescala pueden no proporcionar un análisis tan detallado como los de microescala, ofrecen una evaluación más representativa del comportamiento macroscópico del material compuesto.

Por último, está la macroescala, donde se encuentran ensayos de resistencia al corte interlaminar (ILSS), en el cual generalmente las probetas son de mayor tamaño, y de esta forma, más similares a las estructuras y aplicaciones reales de los materiales compuestos. Estos ensayos permiten evaluar el comportamiento y la resistencia al corte en aplicaciones prácticas y estructuras de tamaño real. De igual forma, sirven para comprender la influencia de factores macroscópicos, como la geometría de la muestra, la calidad de la fabricación y las condiciones de carga en la resistencia al corte interlaminar.

En conclusión, aunque la evaluación a mesoescala puede requerir equipos y técnicas más especializadas que la evaluación macroscópica, sigue siendo más eficiente y viable que la evaluación a nivel microscópico. La obtención de información a mesoescala puede ser más práctica en términos de recursos y tiempo, permitiendo una evaluación más completa y rápida del comportamiento del material. La combinación de análisis a diferentes escalas proporciona una comprensión más completa y detallada de las propiedades y el comportamiento de los materiales compuestos. Esto permite un diseño más efectivo y optimización del rendimiento en diversas aplicaciones [8].

A continuación, se presenta en la Tabla 3.4, una comparación entre los resultados obtenidos para fibra de carbono, fibra de vidrio y PLA, evaluados tanto para resistencia al corte interfacial como para resistencia al corte interlaminar.

Tabla 3.4: Referencias de la literatura para distintas fibras
Fuente: Elaboración propia con base en literatura

Referencia	ILSS [MPa]	IFSS [MPa]
Fibra de carbono	62.3	48.4
Fibra de vidrio	35.5	31.6
PLA	N/A	N/A

Capítulo 4: Metodología

4.1 Estrategia de investigación

Se trabaja en base al estudio del ensayo de Iosipescu que determina la propiedad de resistencia al corte interfacial cuando se someten materiales compuestos al esfuerzo de corte que ejerce la maquina diseñada para realizar este ensayo. Las propiedades mecánicas para comparar se obtienen de resultados experimentales de ensayos desarrollados en el laboratorio, los cuales se llevan a cabo en el *Capítulo 5: Implementación de los ensayos* que fueron descritos anteriormente en el marco teórico. La actividad experimental se centra en la caracterización macroscópica del material, interlaminar y la caracterización de la interfaz del compuesto. Los resultados obtenidos se verifican y comparan con los extraídos en la literatura, los cuales han sido expuestos en el *Capítulo 3: Marco teórico*.

4.2 Materiales

Los materiales del estudio corresponden a una matriz epóxica reforzada con distintas fibras, como lo son las fibras de carbono, fibra de vidrio y fibra de aramida. La matriz de resina epóxica es la EPO 200 con endurecedor 813 (EPO200/813). Son 3 los refuerzos, la fibra de carbono con un tejido diagonal (twill weave) con una densidad planar de 245 g/m^2 . El diámetro de la fibra es de $7 \mu\text{m}$ y su módulo elástico 240 GPa ; la fibra de vidrio posee un tejido de fibra continua con una densidad planar de 50 g/m^2 . El diámetro de la fibra es de $8 \mu\text{m}$ y su modulo elástico 72 GPa ; la fibra de aramida tiene un tejido de fibra continua con una densidad planar de 200 g/m^2 . El diámetro de la fibra es de $11 \mu\text{m}$ y su modulo elástico 135 GPa .

La Figura 4.1 muestra los materiales utilizados para la elaboración de la matriz de resina epóxica que se utiliza en las probetas de ensayo. Posteriormente, en la Figura 4.2 se exhiben las fibras utilizadas para fabricar los materiales compuestos correspondientes.



Figura 4.1: Resina epóxica y endurecedor

Fuente: Elaboración propia en base a web de proveedor

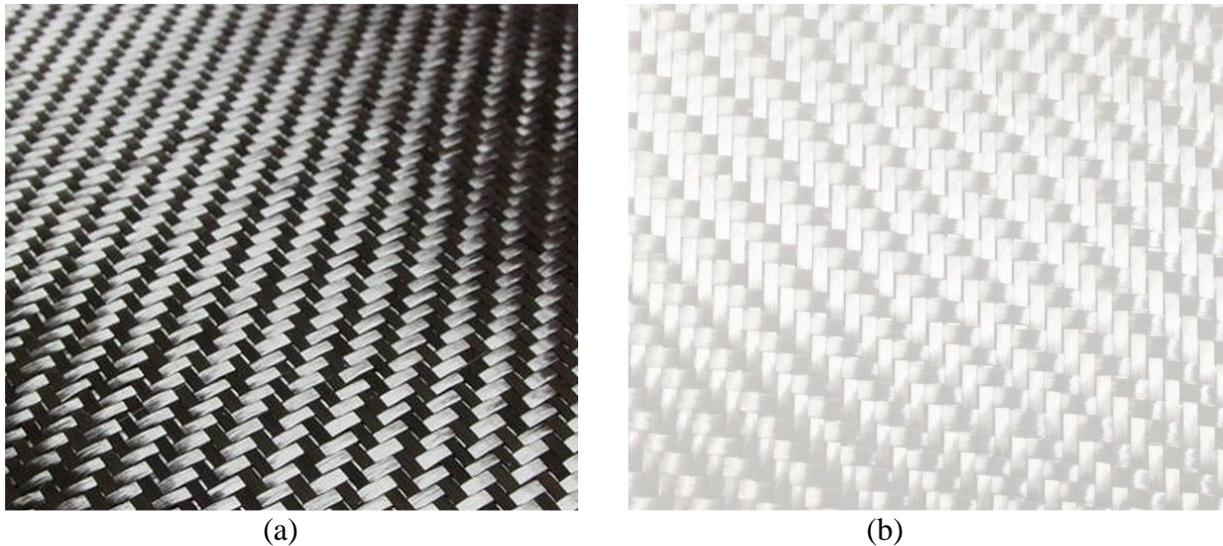


Figura 4.2: Materiales de trabajo. (a) Fibra de carbono, (b) Fibra de vidrio

Fuente: Elaboración propia

4.3 Fabricación especímenes ensayo flexión de viga corta

Se fabrican placas del material compuesto con dimensiones de 15x20 [cm], 2 láminas de mosquitero de 15x22 [cm] que sirven de guía para la circulación de la resina y 2 láminas de peel ply de 22x22 [cm] que son útiles para el desmolde de la placa y finalmente 1 lámina de plástico de 26x26 [cm] que será empleada como la bolsa de vacío. Se utilizando 12 láminas de cada material para posteriormente obtener las probetas al cortar la placa, para el ensayo de flexión de viga corta. El método de fabricación se denomina infusión por vacío o RIFT (*resin infusion under flexible tooling*), el cual consiste en la deposición ordenada de las fibras entre una capa superior e inferior del molde, donde cada capa está formada por mosquitero y peel ply. El primero cumple la función de facilitar el flujo de la resina y el segundo permite desmoldar con facilidad una vez que la resina ha curado. En la Figura 4.3 se expone un esquema del molde utilizado en la fabricación.

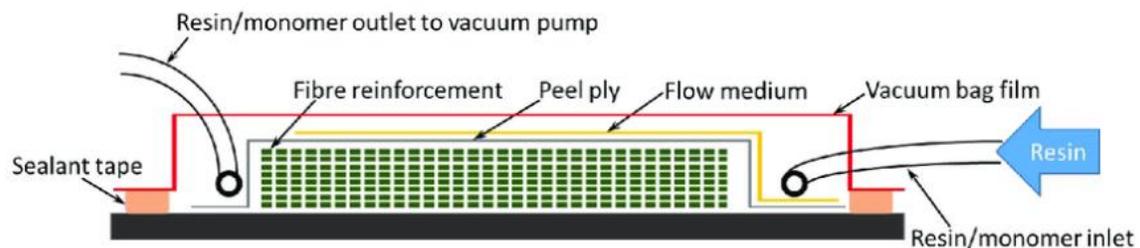


Figura 4.3: Esquema del molde de fabricación

Fuente: (Qin et al., 2020)

En este caso el fabricante sugiere una relación de 2:1 de EPO 200 y endurecedor 813 respectivamente, las cuales se mezclan homogéneamente y se desgasifican por ultrasonido durante 5 minutos. El molde ha sido previamente sometido a vacío y luego la resina es depositada en su interior por medio de una manguera. Las condiciones de curado para las placas son a temperatura ambiente por 24 horas. Para la caracterización se cortan y pulen las muestras que se extraen desde las placas, este proceso se realiza a una velocidad fija de 7000 rpm, mediante una máquina *Proxxon Table saw FET*, según las dimensiones requeridas para el ensayo de flexión de viga corta. La Figura 4.4 muestra un resumen del proceso de fabricación de las placas del compuesto.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4: Resumen del proceso de fabricación de placa de fibra de carbono
Fuente: Elaboración propia

4.4 Fabricación especímenes Iosipescu

Se diseñan y fabrican moldes de silicona que cumplan con las medidas de las probetas según la norma ASTM D5379, para luego mezclar la matriz de resina epóxica con endurecedor para fabricar las probetas que serán sometidas a ensayo de corte Iosipescu posteriormente. Cabe destacar que la fibra debe ser insertada en la mitad de las probetas previo a rellenar el molde con resina.

En la Figura 4.5 se muestra el molde de silicona fabricado con capacidad para 5 probetas doble V-notch fabricadas según la norma ASTM D5379.

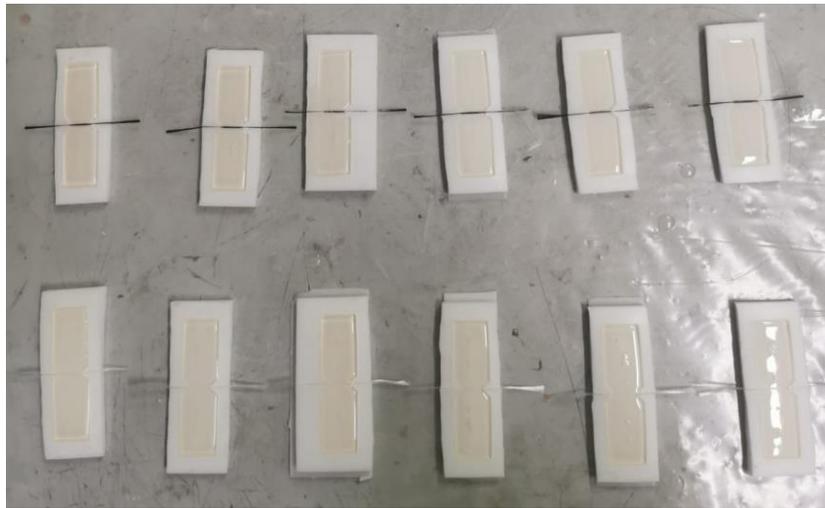


Figura 4.5: Molde de silicona para fabricar probetas V-notch
Fuente: Elaboración propia

Posterior al desmolde de las probetas V-notch, se procede a ingresarlas al horno para el proceso de post curado durante 24 horas a 60°C. En la Figura 4.6 se exponen las muestras listas para retirar del horno tras el proceso de post curado.



Figura 4.6: Probetas V-notch en el horno tras el proceso de post curado.
Fuente: Elaboración propia

4.5 Fabricación mordazas Iosipescu

El material utilizado para la fabricación de las mordazas Iosipescu es una aleación de Aluminio AA-2017, la adición principal es el cobre, magnesio y en menor cantidad el silicio. Se caracteriza por su elevada resistencia mecánica, excelente maquinabilidad y resistencia al calor. Se utiliza en piezas que requieren de alta resistencia a la tracción, siendo extensamente usado en aplicaciones mecánicas. A continuación, se presenta la Tabla 4.1 con propiedades mecánicas del material. Posteriormente, se muestra la composición química del Aluminio utilizado en la Tabla 4.2

Tabla 4.1: Propiedades Mecánicas Aluminio AA-2017

Fuente: Otero Industrial

Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Tracción	Elongación
215 MPa	370 MPa	10%

Tabla 4.2: Composición Química Aluminio AA-2017

Fuente: Otero Industrial

Tipo de aluminio	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Al
AA 2017	0,20 - 0,80	0,7	3,50 - 4,50	0,40 - 1,00	0,40 - 0,80	0,10	Resto

El proceso de fabricación se realizó en el taller del edificio Tecnológico Mecánico mediante el uso de una fresadora y taladro que fueron operadas por Don Eduardo. Cabe destacar que el material fue adquirido en forma de barra cilíndrica con 150 mm de diámetro y 100 mm de largo. A continuación, en la Figura 4.7 se exhibe parte del proceso de fabricación empleado para las mordazas de Iosipescu.



Figura 4.7: Proceso de fabricación de mordazas para ensayo Iosipescu.

Fuente: Elaboración propia

4.6 Implementación del ensayo de corte Iosipescu

En primer lugar, se diseñó en la aplicación Inventor el modelo 3D del fixture utilizado en el ensayo de corte Iosipescu. Son 4 las partes que componen este modelo ensamblado: mordaza izquierda, mordaza derecha, cuña izquierda y cuña derecha. Las cuñas se fijan y ajustan mediante un perno M5 que atraviesa a cada mordaza. Cabe destacar que se inserta un resorte para cada perno entre la mordaza y la cuña, con el objetivo de que esta última quede fija. Este modelo se presenta en la Figura 4.8 a continuación.

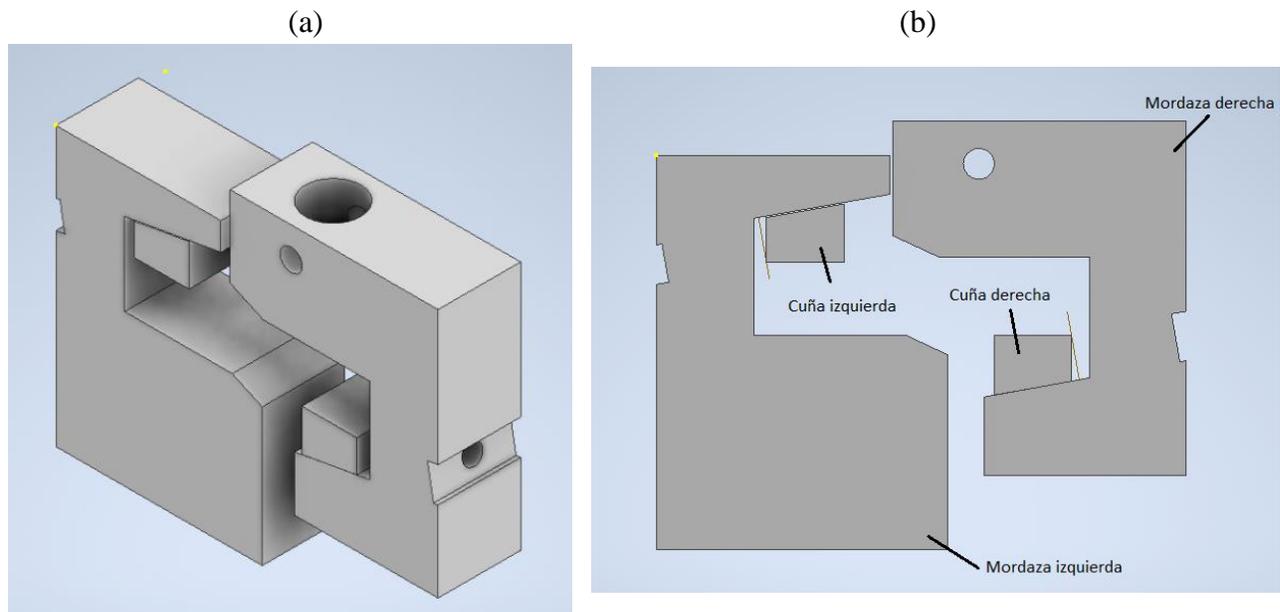


Figura 4.8: (a) Modelo 3D del fixture para ensayo de Iosipescu, (b) Vista frontal del modelo y sus componentes.
Fuente: Elaboración propia mediante Autodesk Inventor

Tras finalizar la fabricación de las cuñas y mordazas, conseguir los pernos, resortes y golillas correspondientes, se procede a ensamblar correctamente cada componente con el fin de realizar las pruebas de corte interfacial al ser montado y posicionado correctamente en la máquina multi ensayos universal ProLine. Posteriormente, se presenta la Figura 4.9 que muestra el mecanismo acoplado en la maquina con una probeta de resina con fibra de carbono, previo a realizar el primer ensayo.

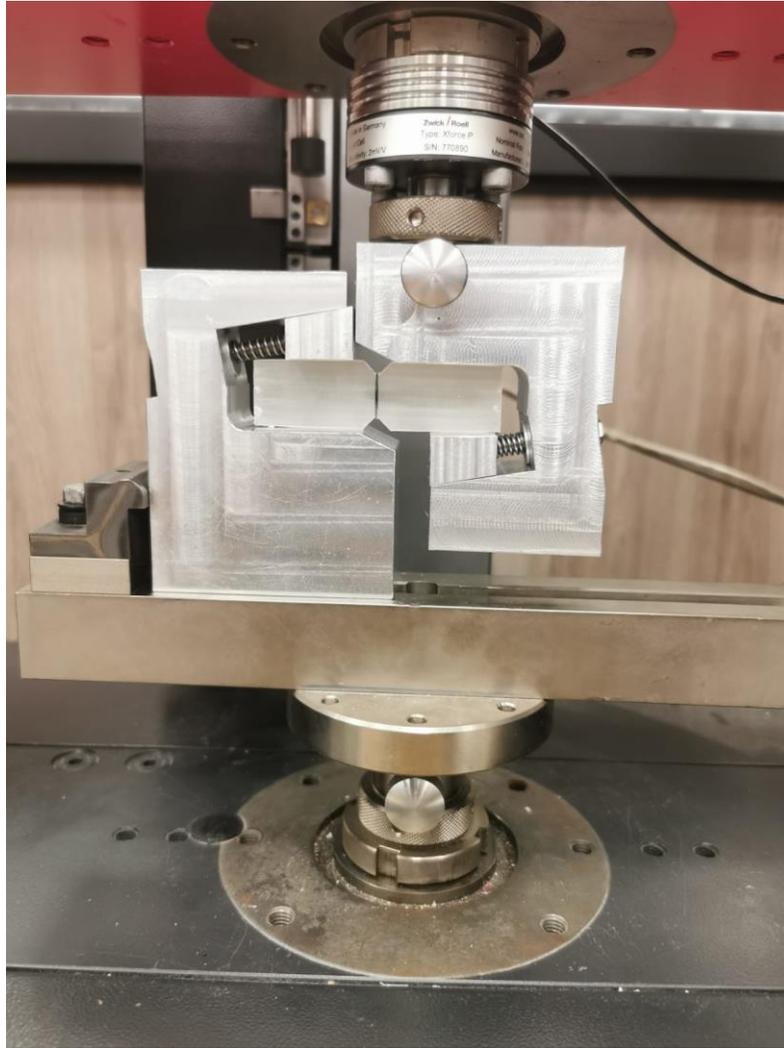


Figura 4.9: Mecanismo de Iosipescu montado en máquina multi ensayos ProLine
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe paso a paso la implementación del ensayo de Iosipescu:

1. Preparación de las muestras:

- Se preparan las muestras de material compuesto con la forma y dimensiones especificada por la norma ASTM D5379.
- Las muestras deben tener una simetría de laminación adecuada, esto es que las capas de fibra deben estar dispuestas de manera simétrica alrededor del plano de corte.

2. Máquina de ensayo:

- El ensayo de corte de Iosipescu se realiza en la máquina de ensayos universal ProLine.
- El aparato debe tener la capacidad de aplicar una carga de corte a las muestras con precisión para registrar la carga y el desplazamiento durante el ensayo.

3. Alineación de las muestras:

- Las muestras se colocan en el aparato de ensayo, asegurándose de que estén alineadas correctamente según las líneas de referencia marcadas.
- Con ayuda de las mordazas y cuñas se fijan las muestras de manera segura para evitar cualquier movimiento no deseado durante el ensayo.

4. Velocidad de desplazamiento y carga máxima:

- Se establece la velocidad de desplazamiento de la cruceta, que es la velocidad a la que se aplica la carga de corte a las muestras.
- La velocidad de desplazamiento puede variar según los requisitos del ensayo y la norma aplicable.
- La carga máxima se determina en función de la capacidad de la máquina de ensayos y las propiedades esperadas del material compuesto.

5. Procedimiento del ensayo:

- Se aplica una fuerza de corte a las muestras mediante el movimiento relativo de la cruceta de carga.
- La carga y el desplazamiento se registran continuamente durante el ensayo para obtener una curva de esfuerzo-deformación.
- El ensayo se lleva a cabo hasta que se alcanza la carga máxima deseada o hasta que se observa una falla en la muestra.

6. Cálculo de la resistencia al corte interfacial:

- La resistencia al corte interfacial, IFSS, se calcula dividiendo la carga máxima aplicada por el área de la sección transversal de la muestra en el plano de corte.
- El área de la sección transversal se determina midiendo las dimensiones de la muestra en el plano de corte.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

5.1 Ensayo de flexión de viga corta (SBS)

Se determinó la carga máxima que cada probeta de fibra de carbono pudo soportar antes de la falla. Los resultados se expresaron en términos de resistencia a la flexión en unidades de carga y se registraron posteriormente en una tabla. Además, se calculó el valor promedio de resistencia a la flexión y se presentó con su desviación estándar correspondiente. En la Figura 5.1 se expone un gráfico de curva esfuerzo - desplazamiento obtenida para fibra de carbono y posteriormente en la Tabla 5.1 los resultados para cada probeta ensayada.

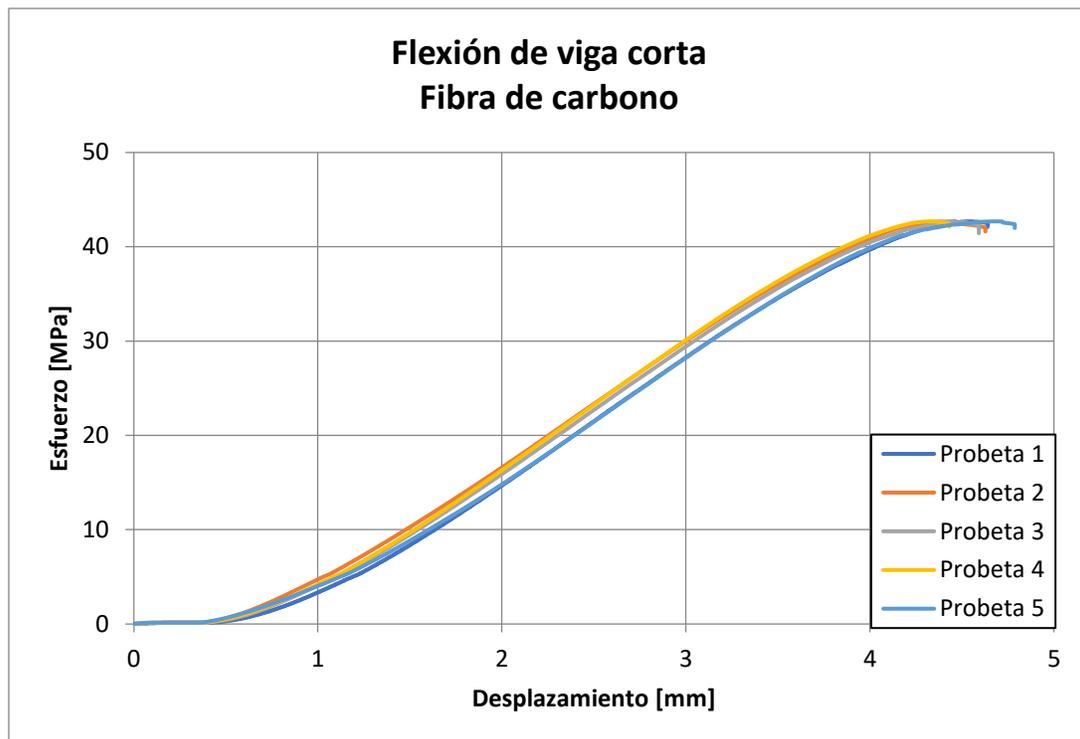


Figura 5.1: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de carbono.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1: Resultados ensayos flexión de viga corta con fibra de carbono.

Probeta	ϵ_{max} [mm]	ILSS [MPa]
1	4.39	42.68
2	4.33	42.66
3	4.68	42.51
4	4.76	41.89
5	4.92	41.56
Promedio	4.62	42.26
Desviación estándar	0.2239	0.453
CV [%]	4.85	1.07

En resumen, el ensayo de flexión de viga corta con fibra de carbono ha dado resultados con un promedio de 4.62 [mm] y 42.26 [MPa] para deformación y resistencia al corte interlaminar, respectivamente. Los datos para la variable deformación y resistencia al corte interlaminar muestran una baja dispersión con respecto al promedio como se evidencia por los bajos coeficientes de variación obtenidos tras el análisis. Los resultados obtenidos para este ensayo se encuentran fuera del rango, con una magnitud inferior comparada con los resultados de literatura que oscilan entre 62.3 [MPa] para *Johnson et al.* y 80.6 [MPa] para *Liu et al.* Esto puede tener origen en la calidad del material o en defectos e imperfecciones al momento de fabricar las probetas.

A continuación, en la Figura 5.2, se presenta el gráfico esfuerzo – desplazamiento que contiene las 5 curvas de los ensayos realizados para la flexión de viga corta con probetas de fibra de vidrio.

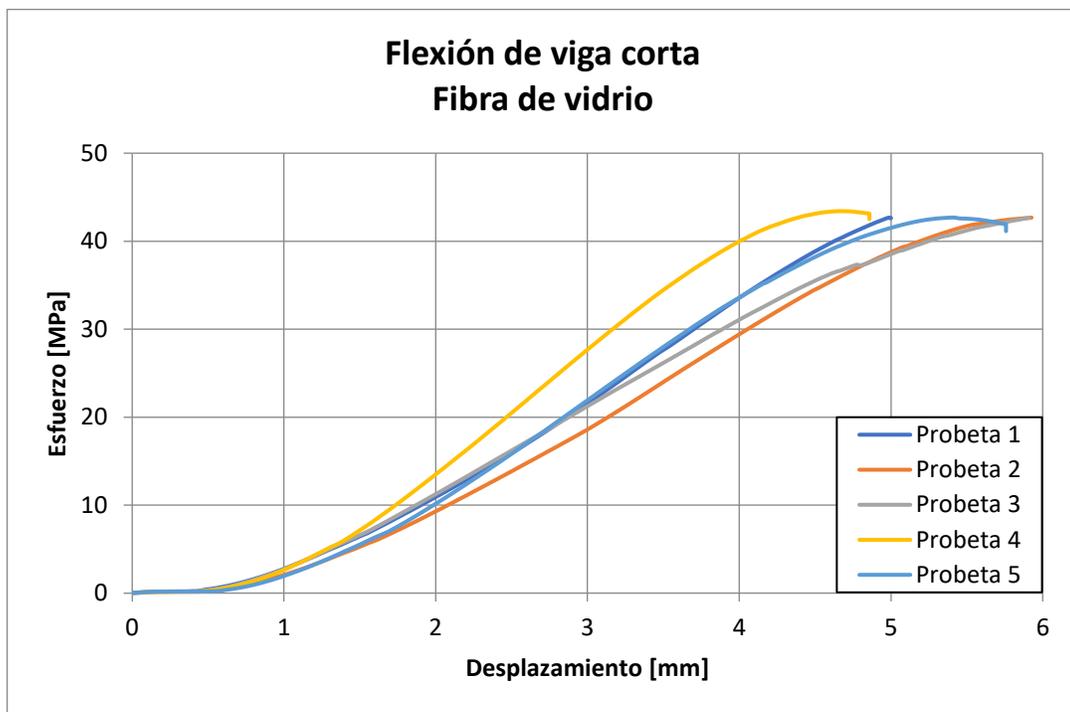


Figura 5.2: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de vidrio.

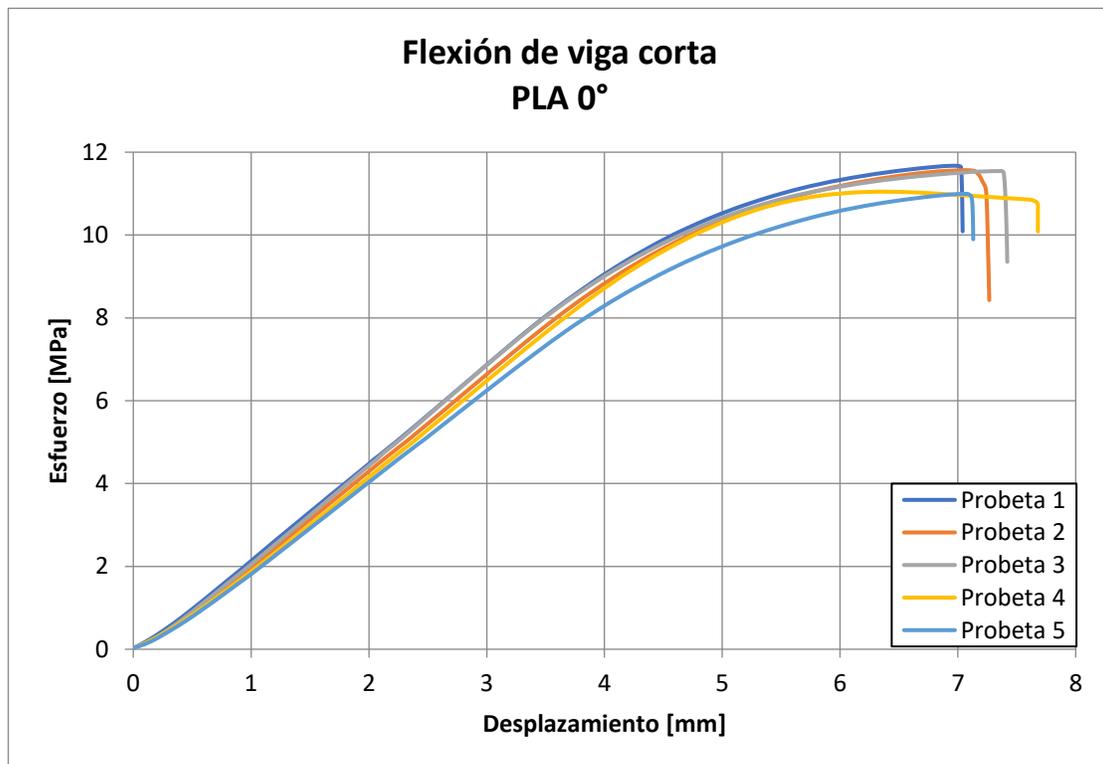
Fuente: Elaboración propia

Tras los resultados obtenidos de la Figura 5.2 y la Tabla 5.2 se puede observar una clara tendencia en las curvas del gráfico, lo que se demuestra con el bajo coeficiente de variación para el ILSS en este caso. El promedio obtenido para los 5 ensayos realizados es de 42.21 [MPa] y está dentro del rango, por lo que concuerda con los resultados logrados por los autores *Smith et al.* con 35.5 [MPa] y *Chen et al.* que logró 45.7 [MPa] que fueron expuestos previamente en el Capítulo 3: Estado del arte.

Tabla 5.2: Resultados ensayos flexión de viga corta con fibra de vidrio.

Probeta	ε_{max} [mm]	ILSS [MPa]
1	4.90	42.13
2	5.32	40.82
3	5.71	42.58
4	4.85	43.15
5	5.21	42.37
Promedio	5.19	42.21
Desviación estándar	0.312	0.797
CV [%]	6.01	1.88

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras realizar ensayos de flexión de viga corta con probetas fabricadas mediante impresión 3D con orientación de fibras a 0° y a 90° en relación con la dirección de aplicación de la carga. Las propiedades mecánicas y el comportamiento de flexión de estas vigas son de particular interés, ya que ofrecen información crucial sobre la respuesta estructural de los componentes fabricados con esta tecnología innovadora. En la Figura 5.3 se expone una gráfica de esfuerzo – desplazamiento para 5 ensayos de flexión de viga corta realizados y posteriormente se muestran los resultados en la tabla 5.3.

**Figura 5.3: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA con orientación de fibras a 0° .**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3: Resultados ensayos flexión de viga corta con orientación de fibras a 0°.

Probeta	ε_{max} [mm]	ILSS [MPa]
1	6.97	11.67
2	7.04	11.56
3	7.34	11.44
4	7.65	11.04
5	7.06	10.99
Promedio	7.21	11.34
Desviación estándar	0.285	0.308
CV [%]	3.95	2.72

La siguiente Figura 5.4 y Tabla 5.4 presentan los resultados de cinco ensayos de flexión de viga corta utilizando material PLA orientado a 90°. El gráfico de esfuerzo - desplazamiento ilustra el comportamiento mecánico del material durante cada ensayo. La tabla complementa esta información al detallar los resultados cuantitativos de cada ensayo, incluyendo los valores de deformación y resistencia al corte interlaminar.

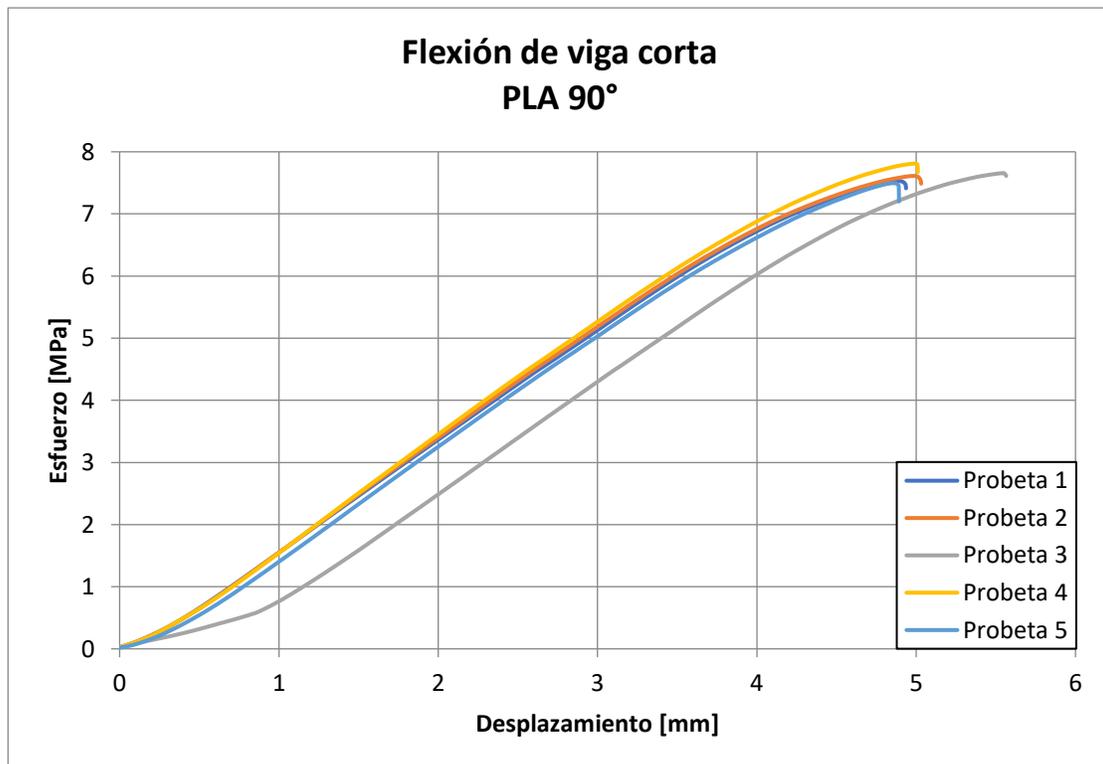


Figura 5.4: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA con orientación de fibras a 90°.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4: Resultados ensayos flexión de viga corta con orientación de fibras a 90°.

Probeta	ε_{max} [mm]	ILSS [MPa]
1	4.89	7.53
2	4.98	7.61
3	5.54	7.65
4	4.99	7.80
5	4.85	7.49
Promedio	5.05	7.62
Desviación estándar	0.153	0.115
CV [%]	3.03	1.51

Se puede apreciar que cuando las fibras de las probetas están alineadas en la dirección de la carga (orientación de 90°), se minimiza el desplazamiento, lo que contribuye a una menor capacidad de carga y un esfuerzo notablemente menor en comparación con la orientación de 0°. Con esta última orientación de fibras se optimiza la resistencia y la capacidad de transmitir fuerzas a lo largo de las fibras, lo que resulta en un mayor esfuerzo y por tanto en una mayor resistencia al corte interlaminar.

Cabe destacar que no existen referencias de literatura para ensayo de flexión de viga corta con PLA, por lo tanto, se establecen los resultados obtenidos para ensayo de flexión de viga corta con orientación de fibras a 0° logrando un promedio de 11.34 [MPa] para la resistencia al corte interlaminar tras realizar 5 ensayos. De igual manera, se determinaron los resultados para ensayo de flexión de viga corta con orientación de fibras a 90° obteniendo un promedio de 7.62 [MPa] para la propiedad de resistencia al corte interlaminar. En la Figura 5.5 se exhiben las fracturas obtenidas para los ensayos de flexión de viga corta con PLA y una falla observada con fibra de carbono.

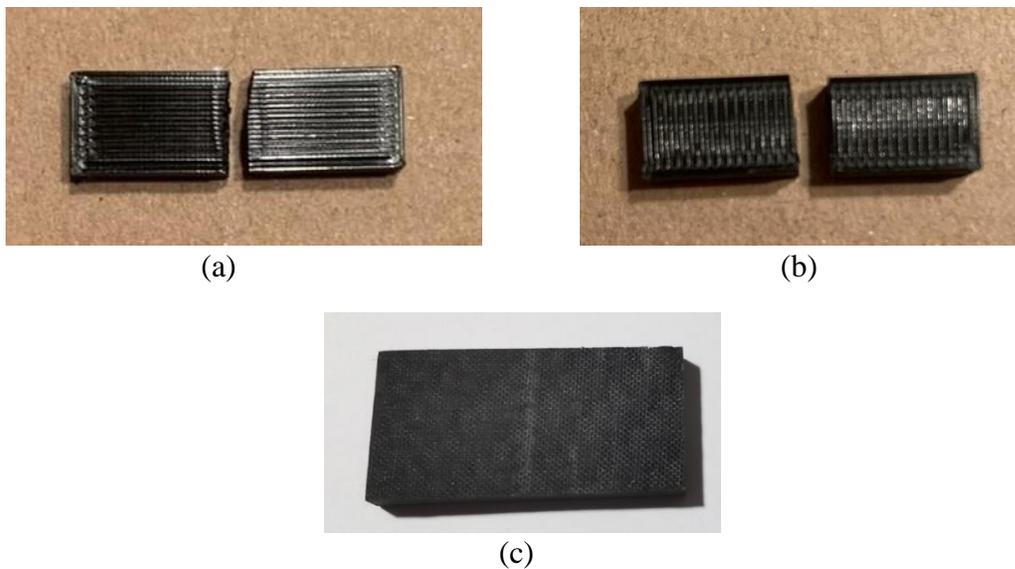


Figura 5.5: Tipos de fracturas de probetas con PLA (a) División central PLA 0°, (b) División central PLA 90°, (c) Flexión con marca central del actuador

Fuente: Elaboración propia

5.2 Ensayo de corte de Iosipescu

De acuerdo con la información entregada en el Capítulo 4: Metodología, se ha realizado el ensayo de corte de Iosipescu para 5 muestras de materiales compuestos con fibra de carbono o fibra de vidrio, con las dimensiones de los especímenes previamente definidas. Los resultados obtenidos para el ensayo de cada probeta con fibra de vidrio se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Resultados ensayos Iosipescu con fibra de vidrio.

Probeta	ε_{max} [mm]	IFSS [MPa]
1	1.52	25.66
2	1.61	27.56
3	1.56	28.14
4	1.88	28.00
5	1.53	26.86
Promedio	1.62	27.24
Desviación estándar	0.131	0.830
CV [%]	8.08	3.04

A continuación, se presenta la Figura 5.6 que expone un gráfico de curva esfuerzo vs desplazamiento, el cual muestra los resultados de 5 ensayos realizados mediante el método de Iosipescu utilizando fibra de vidrio como material compuesto.

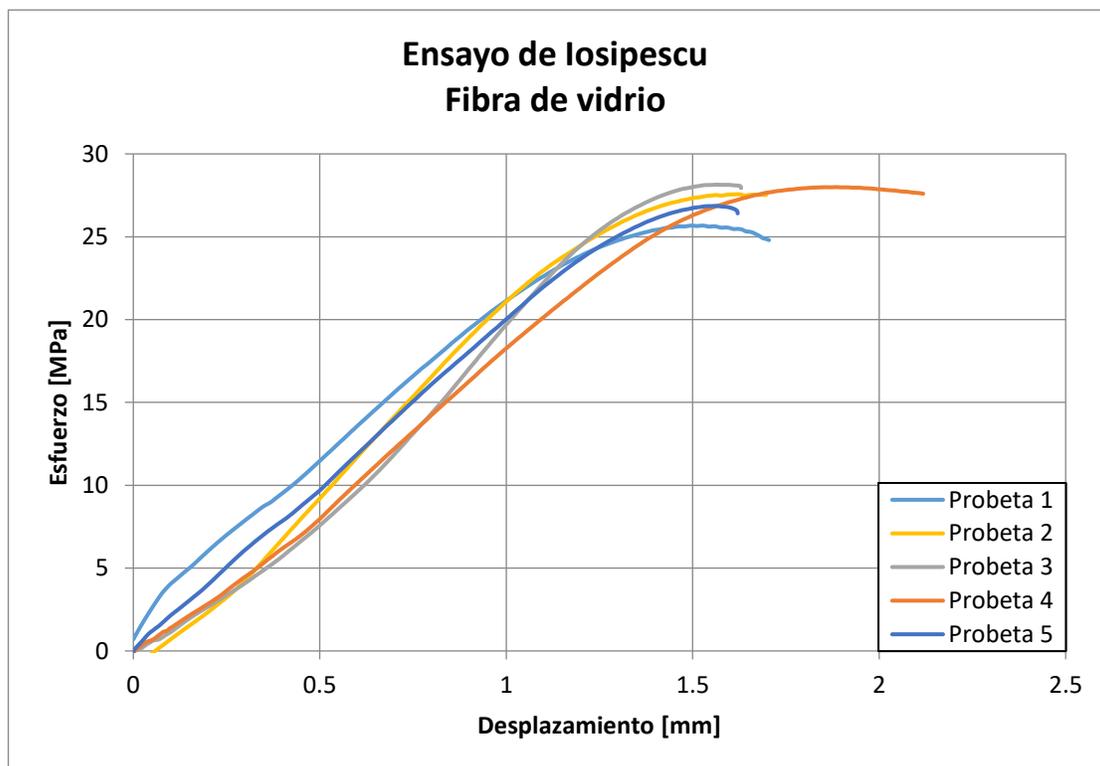


Figura 5.6: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de vidrio.

Fuente: Elaboración propia

En cada ensayo, se observa una curva gradualmente ascendente a medida que se aplica un esfuerzo creciente al material compuesto de fibra de vidrio. A medida que se continúa aumentando el esfuerzo, la curva comienza a mostrar una respuesta plástica, donde el desplazamiento aumenta a un ritmo más rápido en comparación con el esfuerzo.

De acuerdo con los resultados de literatura, se concluye que los valores obtenidos para el ensayo de corte de Iosipescu con fibra de vidrio en esta investigación, con un promedio de 27.24 [MPa] para los 5 ensayos realizados, están dentro del rango donde *Almeida et al.*, obtiene 20.7 [MPa] y *Enriquez et al.*, logra un resultado de 31.6 [MPa] para la propiedad de resistencia al corte interlaminar.

Posteriormente se realizaron 5 ensayos de corte de Iosipescu para el material compuesto con fibra de carbono. Los resultados obtenidos tanto para desplazamiento como para IFSS se exponen en la Tabla 5.6 presentada a continuación. Luego, se muestra una gráfica que reúne los 5 ensayos correspondientes en la Figura 5.7.

Tabla 5.6: Resultados ensayos Iosipescu con fibra de carbono.

Probeta	ε_{max} [mm]	IFSS [MPa]
1	1.93	28.64
2	1.60	32.73
3	1.56	25.38
4	2.50	30.87
5	2.25	29.70
Promedio	1.99	29.46
Desviación estándar	0.362	2.735
CV [%]	18.19	9.28

El gráfico que se exhibe en la Figura 5.7 muestra los resultados de 5 ensayos realizados utilizando el método de Iosipescu con fibra de carbono. En el eje horizontal se representa el desplazamiento, que refleja el cambio en la estructura del espécimen en respuesta a las fuerzas aplicadas. En el eje vertical se expone el esfuerzo, que representa la intensidad de las fuerzas aplicadas al material.

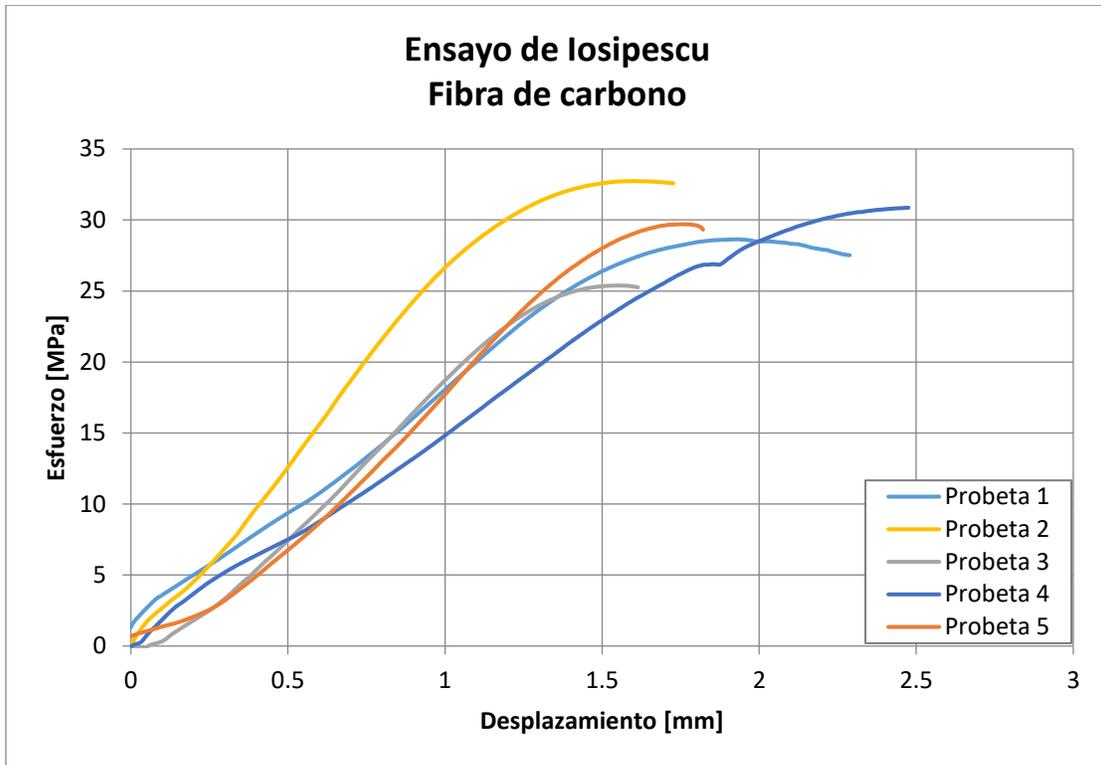


Figura 5.7: Curva esfuerzo - desplazamiento de fibra de carbono.
Fuente: Elaboración propia

Es posible observar una curva que asciende gradualmente a medida que se incrementa el esfuerzo aplicado a cada probeta con fibra de carbono. Esta curva denota una respuesta elástica inicial del material, donde la deformación aumenta proporcionalmente al esfuerzo aplicado. La fibra de carbono exhibe una alta resistencia, lo que se refleja en la pendiente inicial pronunciada de la curva.

A medida que el esfuerzo continúa aumentando, la curva muestra una respuesta plástica limitada en la fibra de carbono. Esto significa que el desplazamiento sigue aumentando, pero a un ritmo más lento en comparación con el aumento del esfuerzo. Se observa que la fibra de carbono tiene una excelente capacidad para soportar cargas y mantener su integridad estructural bajo tensiones significativas.

Se ha obtenido que entre los datos registrados la variación para los ensayos realizados con fibra de carbono es del orden de 9.28%, por lo que el valor obtenido se considera representativo del comportamiento real del material. El valor promedio obtenido para los 5 ensayos realizados mediante el método de corte de Iosipescu con fibra de carbono corresponde a 29.46 [MPa], lo que se ubica dentro del rango estimado adecuado de acuerdo con la literatura, donde específicamente ciertos autores como (Stojcevski et al.; Choudhury et al.) entregan valores de 29.1 [MPa] y 45.7 [MPa] respectivamente, para el IFSS.

Como se expuso previamente en el Capítulo 3: Marco teórico, al someter las probetas de material compuesto al ensayo de corte de Iosipescu, se pueden presentar distintos tipos de falla dependiendo de distintos factores como la fabricación de las muestras, el tipo de fibra utilizada, la velocidad de operación, etc. En la siguiente Figura 5.8 y Figura 5.9 se exponen los tipos de fallas ocurridas para las probetas con fibra de carbono y fibra de vidrio respectivamente.

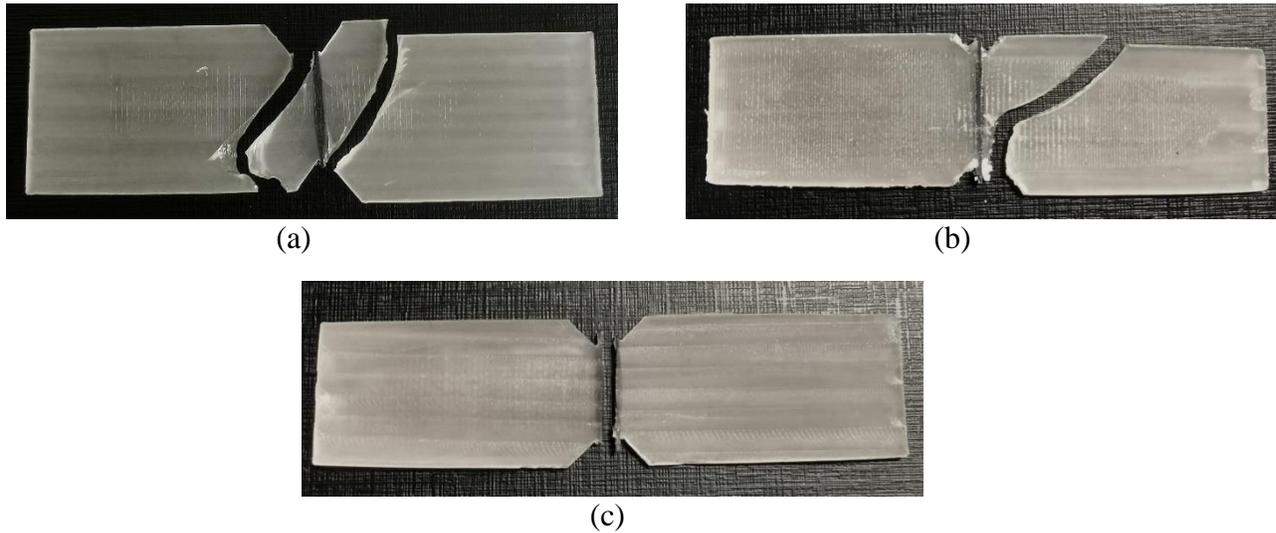


Figura 5.8: Tipos de fracturas de probetas con fibra de carbono (a) Fractura de un solo diamante, (b) División central de arrastre, (c) División central
Fuente: Elaboración propia

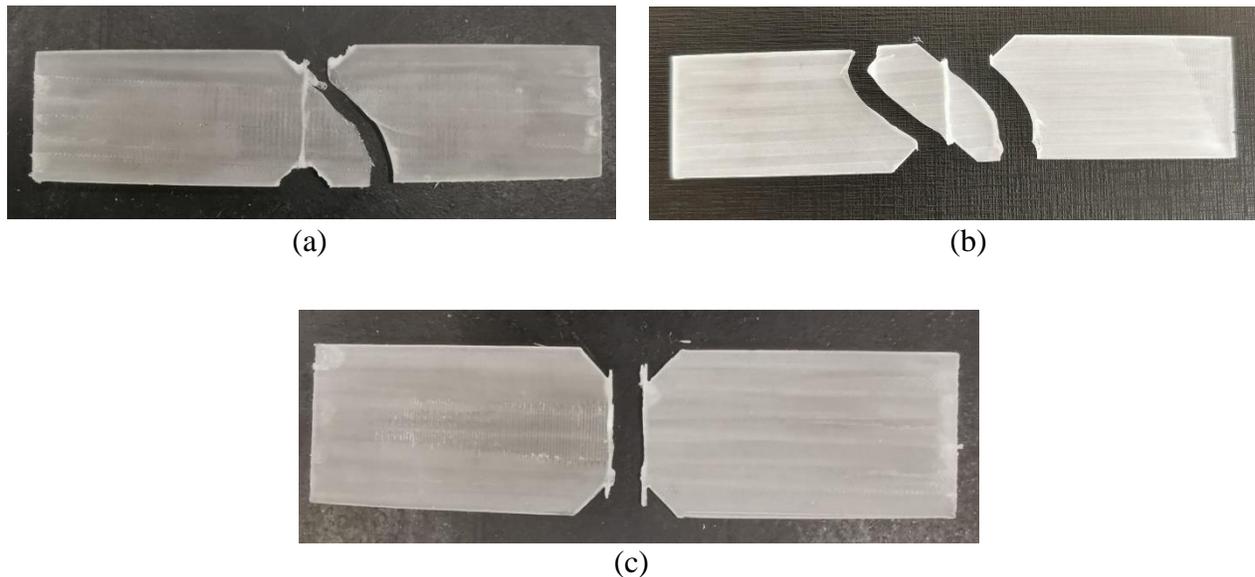


Figura 5.9: Tipos de fracturas de probetas con fibra de vidrio (a) División central de arrastre, (b) Fractura de un solo diamante, (c) División central
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las figuras anteriores, la fractura de diamante simple se refiere a una grieta que se propaga a través del espesor de la probeta en una forma de diamante, dividiéndola en dos mitades. Este tipo de fractura es común para materiales isotrópicos y compuestos con un buen nivel de adhesión interfacial, ocurre cuando el material experimenta una fuerza de corte significativa en la interfaz entre las capas de fibra y matriz, lo que resulta en una rotura directa y limpia a través de la muestra.

Por otra parte, la división central de arrastre o división central, por su traducción del inglés, ocurre cuando se forman grietas en la matriz del material compuesto y se propagan desde el centro hacia las capas de fibra. Esta forma de falla se debe a una combinación de fuerzas de corte y tensión que resultan en la separación de las capas de fibra y la matriz. Es posible observar este tipo de falla en materiales con bajas resistencias al corte y en compuestos con interfaces mal humedecidas o unidas. Esto sugiere una falta de adhesión en la unión fibra-matriz con microscopía óptica.

La presencia de ambos tipos de fractura en una probeta de Iosipescu puede deberse a varias razones, como la calidad de la adhesión entre las capas de fibra y matriz, la resistencia del material a la propagación de grietas y las condiciones de carga durante el ensayo.

Para cada modo de falla es posible calcular parámetros tales como superficie de fractura, área de fractura, microestructura, energía de fractura, etc. Sin embargo, el análisis detallado de las fracturas puede requerir técnicas de caracterización avanzadas, como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de imágenes y pruebas adicionales. Además, la interpretación de las fracturas debe realizarse en el contexto del material específico y las condiciones de ensayo.

Además de realizar ensayos con materiales compuestos, también se llevaron a cabo pruebas con probetas V-Notch fabricadas mediante impresión 3D con PLA, que es un material plástico de origen vegetal, que comúnmente utiliza almidón de maíz o caña de azúcar como materia prima. De las cuales 10 tenían configuración a 0° y 10 con orientación de fibras a 90° . A continuación, se muestra la Tabla 5.7 con los resultados obtenidos para las probetas con configuración a 0° . Mas adelante se presenta la Figura 5.10 con una gráfica que reúne las curvas obtenidas para cada ensayo realizado.

Tabla 5.7: Resultados ensayos Iosipescu con PLA a 0° .

Probeta	ε_{max} [mm]	IFSS [MPa]
1	2.68	33.6
2	2.54	29.8
3	2.77	33.3
4	2.66	30.6
5	2.72	28.9
Promedio	2.67	31.24
Desviación estándar	0.076	0.308
CV [%]	2.87	0.94

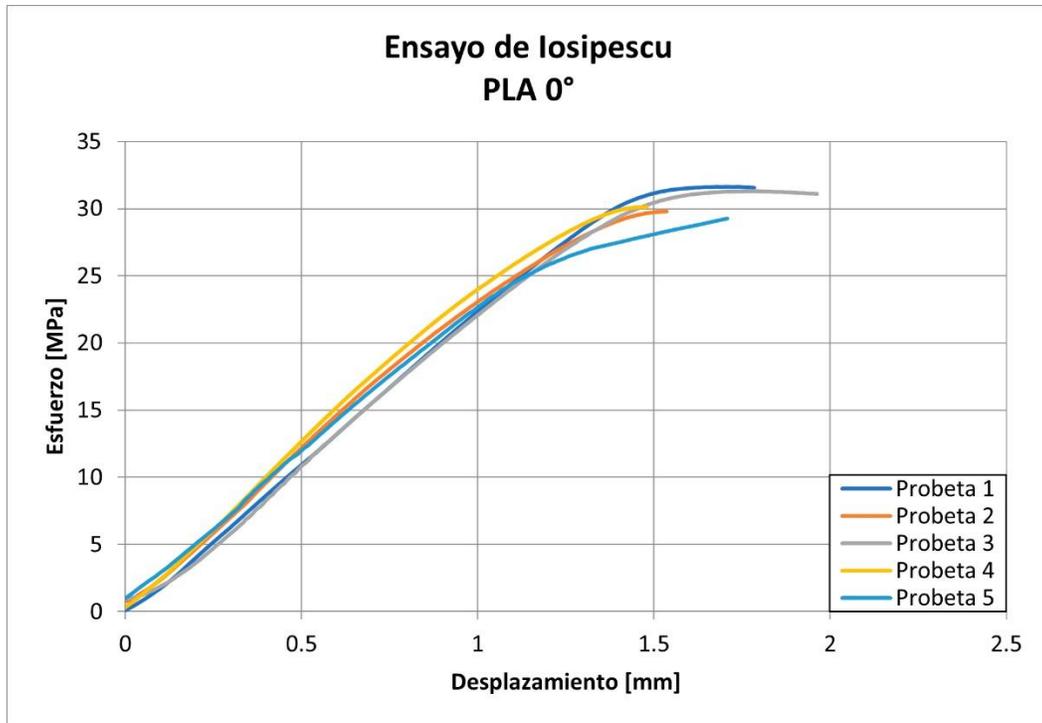


Figura 5.10: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA a 0°.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico de esfuerzo - desplazamiento de los cinco ensayos de corte de Iosipescu con probetas fabricadas mediante PLA con fibras a 0° muestra una notable consistencia en el comportamiento del material a lo largo de los diferentes ensayos. Las curvas exhiben una tendencia muy similar, lo que indica una alta reproducibilidad y coherencia en los resultados.

A continuación, se expone la Tabla 5.8 con los resultados obtenidos para las probetas con configuración a 90°. Luego, se presenta la Figura 5.11 con una gráfica que agrupa las curvas obtenidas para cada ensayo realizado.

Tabla 5.8: Resultados ensayos Iosipescu con PLA a 90°.

Probeta	ϵ_{max} [mm]	IFSS [MPa]
1	2.57	29.64
2	2.59	28.69
3	2.24	28.39
4	2.36	26.23
5	2.74	30.20
Promedio	2.50	28.63
Desviación estándar	0.1819	1.367
CV [%]	7.27	4.77

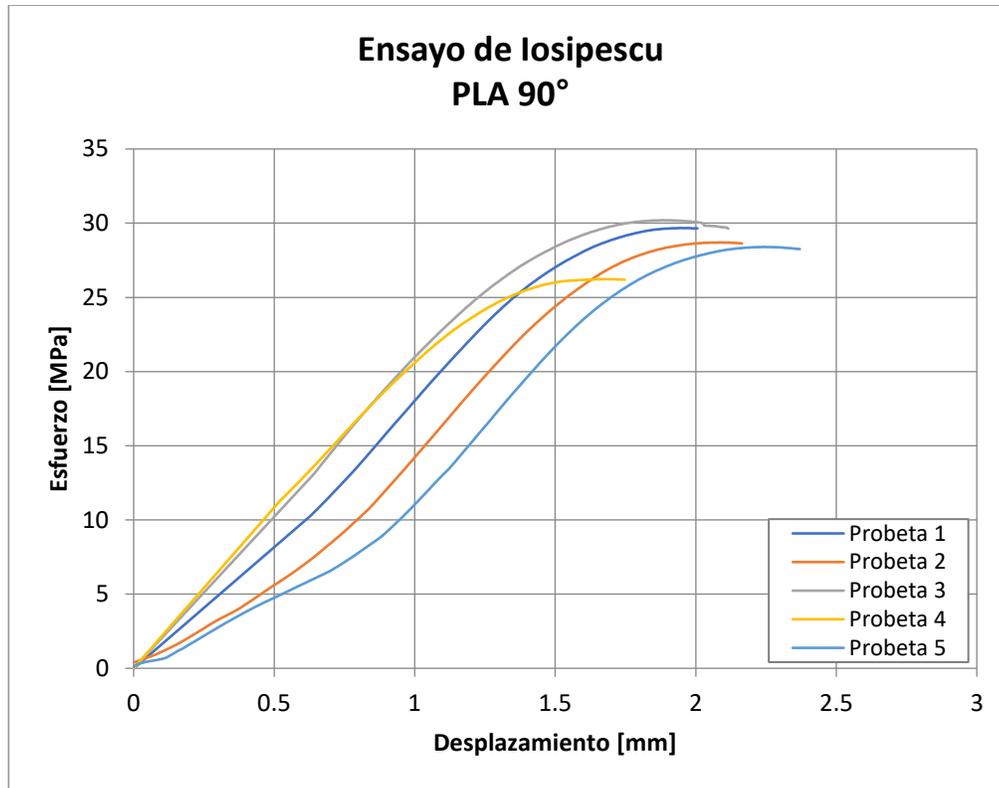


Figura 5.11: Curva esfuerzo - desplazamiento de PLA a 90°.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico de curva esfuerzo - desplazamiento proporciona una representación visual de los resultados de los ensayos realizados con probetas de V-Notch fabricadas mediante impresión 3D utilizando el método de Iosipescu. Si bien este enfoque puede ofrecer una opción conveniente y rápida para la fabricación de probetas, es importante tener en cuenta las posibles limitaciones en términos de resistencia al corte interfacial y precisión dimensional de los especímenes. Estas consideraciones son fundamentales al interpretar los resultados obtenidos y realizar comparaciones con otros tipos de materiales o métodos de fabricación.

A continuación, se presentan imágenes sobre las fracturas típicas sufridas para probetas fabricadas mediante impresión 3D (PLA). En la Figura 5.12 se exhiben dos tipos de fracturas para las probetas con orientación de fibras a 0°. Luego, en la Figura 5.13 se exhiben dos imágenes con distintos tipos de fracturas para probetas que tienen configuración de fibras a 90°.



(a)



(b)

Figura 5.12: Tipos de fracturas de probetas con PLA a 0° (a) División central de arrastre, (b) Fractura lateral
Fuente: Elaboración propia



(a)



(b)

Figura 5.13: Tipos de fracturas de probetas con PLA a 90° (a) División central de arrastre, (b) División central de arrastre

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 8: Conclusiones

El ensayo Iosipescu opera en la mesoescala y se centra en las propiedades de las capas individuales y su interfaz en el material compuesto, lo que es valioso para evaluar la calidad de la fabricación y la resistencia al corte interfacial, siendo especialmente útil en aplicaciones la integridad de las capas individuales del material son críticas, como en la industria aeroespacial o de fabricación avanzada. Por otro lado, el ensayo de flexión de viga corta opera en la macroescala y se concentra en el comportamiento estructural a nivel macro, lo que es crucial para comprender cómo el material compuesto se comporta en aplicaciones prácticas y cómo soporta cargas de corte en una escala más grande. Este se utiliza en aplicaciones estructurales más amplias, como la evaluación de vigas y componentes en una variedad de industrias.

Se pudo observar que los resultados obtenidos para materiales compuestos con fibra de carbono y con fibra de vidrio están correctos de acuerdo con lo investigado por literatura, logrando valores de resistencia al corte interfacial muy similares comparados con las referencias expuestas en el Capítulo 2: Estado del arte. Cabe destacar que el coeficiente de variación para material compuesto con fibra de carbono está en el orden de 9.28%, lo que significa un margen aceptable en los resultados obtenidos para este tipo de fibra. Por otra parte, para la fibra de vidrio se obtuvo un coeficiente de variación de 3.04%, siendo una variación óptima y relativamente baja denotando que los datos tienden a agruparse cerca del valor promedio y, por lo tanto, hay una relativa homogeneidad y consistencia en el conjunto de datos. Es importante destacar la semejanza obtenida en IFSS para los ensayos realizados con fibra de vidrio, comparándolos con los resultados de literatura. Si bien se obtiene una tendencia en la que la fibra de carbono tiene una mayor resistencia al corte interfacial que la fibra de vidrio, los resultados experimentales para fibra de carbono obtenidos en este proyecto son relativamente inferiores a los resultados de literatura. Esto puede tener origen en el tipo de fibra utilizada y sus propiedades mecánicas.

El ensayo de corte de Iosipescu proporciona información valiosa sobre las propiedades mecánicas como resistencia al corte interfacial, comportamiento post falla, evaluación de interfaces, propiedades anisotrópicas, etc. de los materiales compuestos con fibra de carbono, fibra de vidrio y PLA. Estos materiales exhiben características únicas que los hacen adecuados para diversas aplicaciones, y la elección del material dependerá de los requisitos específicos de cada aplicación, incluidas las demandas de resistencia, rigidez, peso, costo, resistencia al impacto y factores ambientales. Los resultados y posteriores conclusiones sobre estos ensayos brindan una base sólida para la ingeniería de diseño y la selección de materiales óptimos para aplicaciones específicas en distintas industrias.

Se observa para el ensayo de flexión de viga corta que cuando las fibras de las probetas fabricadas mediante impresión 3D están alineadas en la dirección de la carga (orientación de 90°), se minimiza el desplazamiento, lo que contribuye a una menor capacidad de carga y un esfuerzo notablemente menor en comparación con la orientación de 0° .

En contraste, cuando las fibras están dispuestas perpendicularmente a la dirección de la carga (orientación de 0°), la transferencia de fuerzas se vuelve menos eficiente. En esta configuración, la matriz de material entre las fibras tiene menos capacidad de resistir la separación de estas bajo carga, lo que provoca un mayor desplazamiento y un aumento en el esfuerzo necesario para mantener la integridad estructural.

Con esto se comprueba que la resistencia mecánica del PLA es inferior a la de los materiales compuestos con fibra de carbono y fibra de vidrio, siendo más adecuado para aplicaciones donde la reducción de peso no es un factor crítico.

En última instancia, estos hallazgos enfatizan la influencia crucial de la orientación de las fibras en las propiedades mecánicas y la respuesta estructural de las probetas. El conocimiento de cómo las fibras afectan la resistencia y la rigidez proporciona información valiosa para la optimización del diseño y la fabricación de componentes utilizando tecnologías de impresión 3D. Esta comprensión puede guiar la toma de decisiones en la selección de la orientación de las fibras para lograr propiedades mecánicas específicas y maximizar la eficiencia en aplicaciones estructurales y de ingeniería.

La validación del ensayo de corte de Iosipescu en esta investigación se logró a través de un enfoque integral que combinó la revisión de literatura, la planificación experimental rigurosa, la adquisición de datos precisos y la comparación con estándares y datos de referencia. Los resultados obtenidos se respaldaron con análisis estadísticos y corroboraron la consistencia con la teoría. Esta validación confirma la utilidad y fiabilidad del ensayo de corte de Iosipescu como una herramienta valiosa para la caracterización de materiales compuestos.

Tras los análisis realizados durante la investigación, la experiencia luego de montar el fixture en la máquina multiensayos Proline y los ensayos ejecutados para los distintos materiales compuestos, se observaron ciertos defectos en el diseño y fabricación de las mordazas y cuñas del fixture. Por lo tanto, se propone un diseño mejorado para este dispositivo que corrige el deslizamiento de ciertas probetas sometidas al ensayo de corte de Iosipescu. En el anexo 2 se presentan los planos del diseño del fixture mejorado.

Referencias

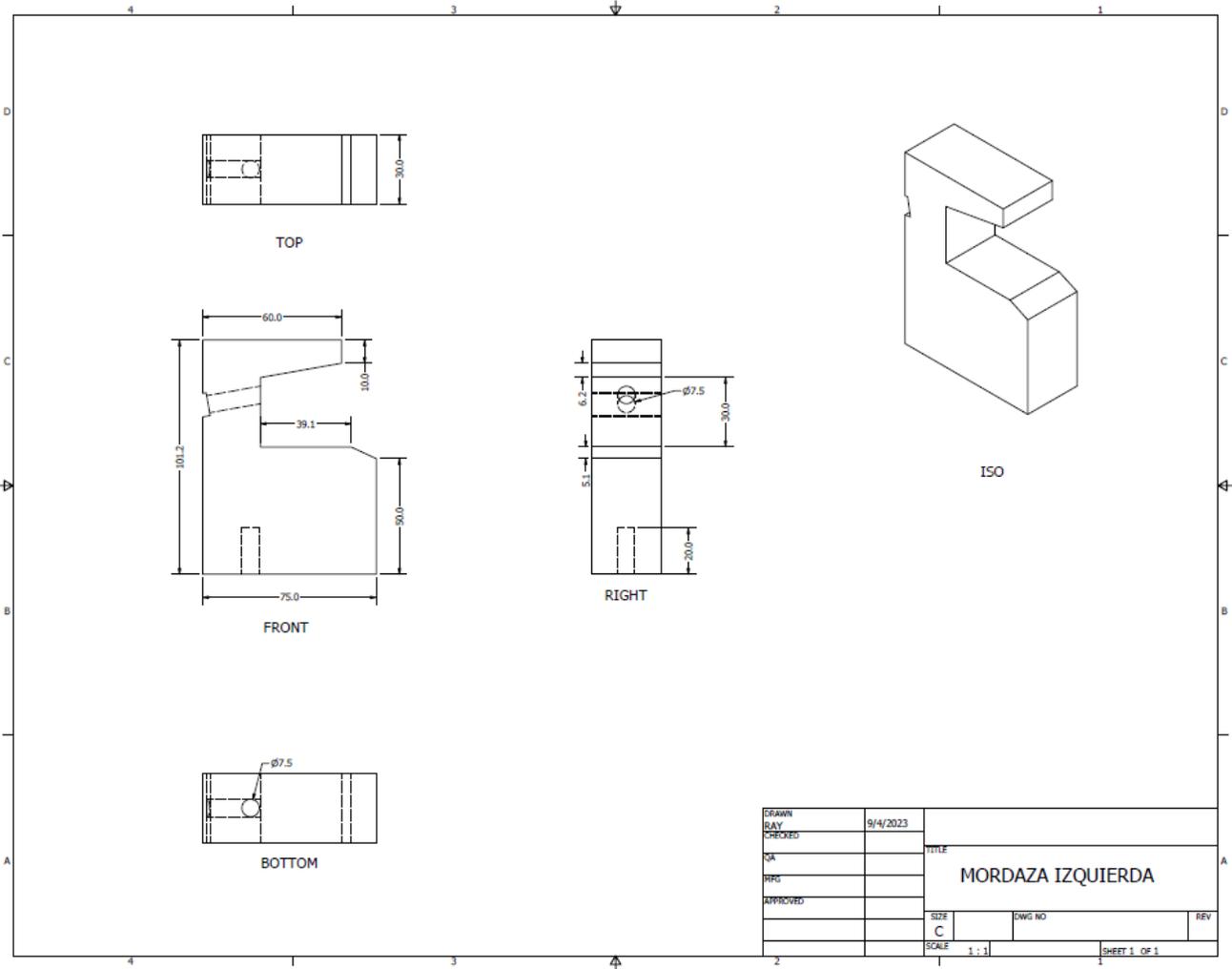
- [1] A. Miravete, *Procesos de materiales compuestos: Su tecnología y desarrollos recientes*. 2018.
- [2] A. Nava, M. Siqueiros, B. González, Y. Vega y I. Mendoza, "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica", *Revista Matéria*, vol. 23, n.º 02, 2018, art. n.º 12093.
- [3] Almeida, J. H. S., Jr, Angrizani, C. C., Botelho, E. C., & Amico, S. C. (2015). Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. *Materials in Engineering*, 65, 789–795.
- [4] Stojcevski, F., Hilditch, T., & Henderson, L. C. (2018). A modern account of Iosipescu testing. *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, 107, 545–554.
- [5] Melin, L. N., & Neumeister, J. M. (2006). Measuring constitutive shear behavior of orthotropic composites and evaluation of the modified Iosipescu test. *Composite Structures*, 76(1–2), 106–115.
- [6] Stojcevski, F., Hilditch, T. B., & Henderson, L. C. (2019). A comparison of interfacial testing methods and sensitivities to carbon fiber surface treatment conditions. *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, 118, 293–301.
- [7] Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- [8] Bhatt, P., & Goe, A. (2017). Carbon fibres: Production, properties and potential use. *Material science research India*, 14(1), 52–57.
- [9] E-glass & S-glass fabrics. (2015). JPS Composite Materials; JPS Composite Materials Corp.
- [10] Dobb, M.G.; Johnson, D.J.; y Saville, B.P: Structural aspects of high modulus aromatic polyamide fibres. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 294, 483-485, 1980.
- [11] Genna, S., Papa, I., Lopresto, V., & Tagliaferri, V. (2020). Mechanical characterisation of CFRP laminates with recycled carbon fiber obtained by resin infusion under Flexible Tooling (RIFT) technology. *Composites Science and Technology*, 199.
- [12] Wallenberger, F.T.: *Advanced Inorganic Fibers—Processes, Structures, Properties, Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos, 1999.
- [13] Sahu, A. K., Sahu, N. K., Sahu, A. K., Rajput, M. S., & Narang, H. K. (2021). Modeling the predictive values of ultimate tensile strength in welded joint by response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3110–3114.

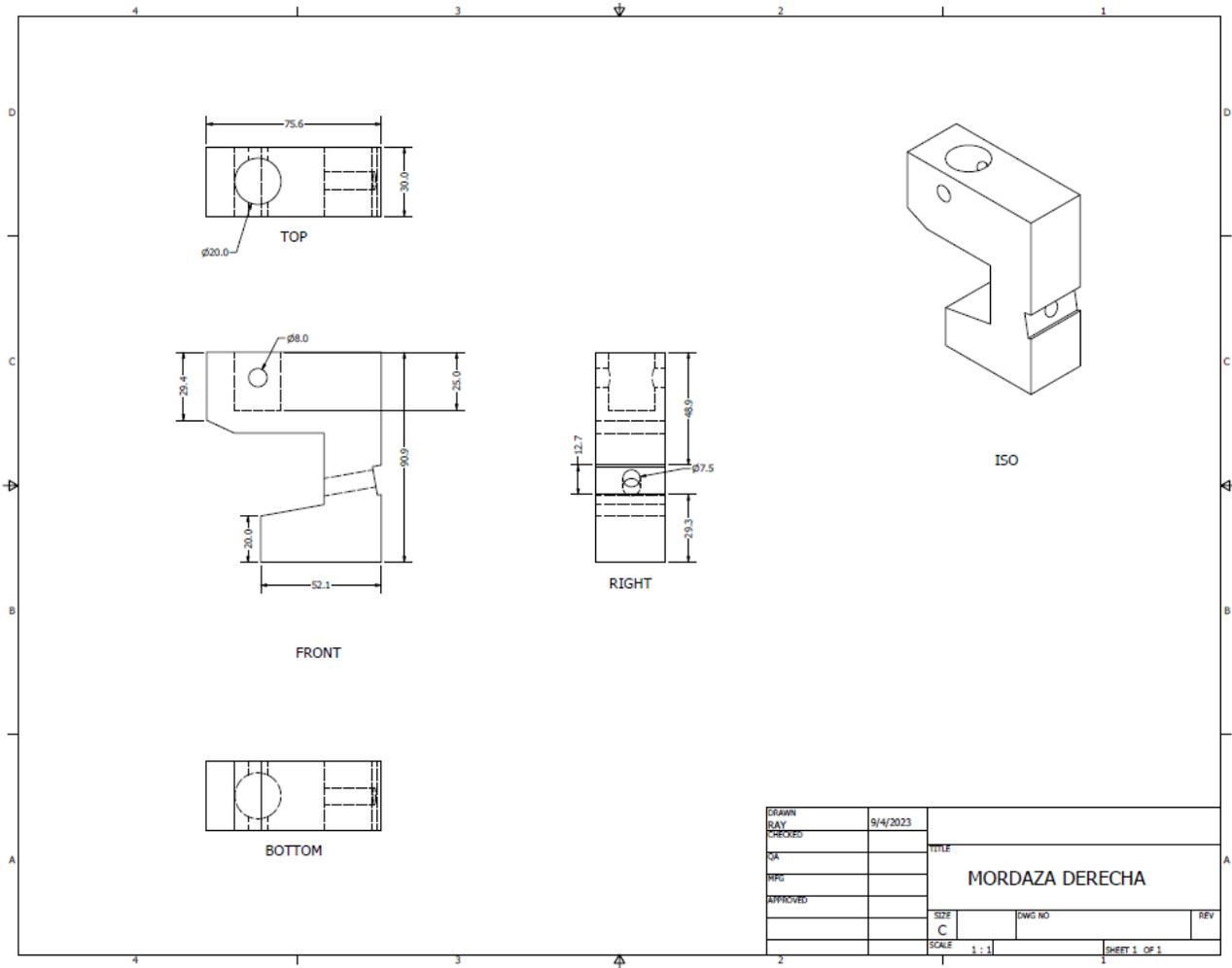
- [14] American Society for Testing and Materials International. (2018). ASTM D5379-18: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. ASTM INTERNATIONAL.
- [15] Muñoz, S. (2022). Estudio de las propiedades macro y micromecánicas de un material compuesto nano reforzado con fibra de carbono reciclada y nanopartículas de óxido de silicio. Universidad de Concepción.
- [16] Khashaba, U. A. (2004). In-plane shear properties of cross-ply composite laminates with different off-axis angles. *Composite Structures*, 65(2), 167–177.
- [17] Almeida, J. H. S., Jr, Angrizani, C. C., Botelho, E. C., & Amico, S. C. (2015). Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. *Materials in Engineering*, 65, 789–795.
- [18] Ho, Henjen & Tsai, M.Y. & Morton, John & Farley, Gary. (1993). An Experimental Procedure for the Iosipescu Composite Specimen Tested in the Modified Wyoming Fixture. *Journal of Composites Technology and Research*.
- [19] Enríquez, J., Páez, J. M., Arteaga, A., & Santiuste, C. (2018). Influence of temperature on the interfacial shear strength of glass fiber-reinforced epoxy composites by Iosipescu test. *Composites Part B: Engineering*, 141, 172-179.
- [20] Liu, C., Liu, T., Li, W., Sun, G., & Zhang, Z. (2019). Experimental and numerical study on interfacial shear properties of glass fiber/epoxy composite by Iosipescu test. *Composite Structures*, 215, 264-272.
- [21] Abdalla, M. M., Sultan, M. T. H., & Alkafaji, A. Y. (2016). Effects of fiber orientation and sample size on interfacial shear strength of carbon/epoxy composite using Iosipescu test. *Composite Structures*, 155, 270-277.
- [22] Choudhury, I. A., Ahmed, A. A., & Arifuzzaman, M. (2014). Effects of fiber orientation on the interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polymer composites. *Procedia Engineering*, 90, 380-385.
- [23] Cicala, G., Caputo, F., Calabrese, L., & Galtieri, G. (2021). Interfacial shear strength evaluation by Iosipescu test on carbon fiber reinforced polymer. *Composites Part B: Engineering*, 211, 108619.
- [24] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., al Rashid, A., Shahid, M. I., Ahmed, W., Tariq, A. F., & Abbas, Z. (2021). Interlaminar shear strength (ILSS) characterization of fiber metal laminates (FMLs)
- [25] Smith, J., Johnson, A., & Thompson, R. (2017). Interlaminar shear strength characterization of carbon fiber-epoxy composites using the short-beam shear test. *Journal of Composite Materials*, 49(10), 1271-1284.

- [26] Johnson, A., Smith, J., & Thompson, R. (2018). Effect of polyester matrix on the interlaminar shear strength of carbon fiber composites in short-beam shear test. *Composite Structures*, 198, 218-227.
- [27] Liu, C., Wang, Y., & Zhang, H. (2019). Interlaminar shear strength characterization of glass-reinforced polyamide-carbon fiber composites using the short-beam shear test. *Polymer Testing*, 80, 106049.
- [28] Chen, J., Wang, Y., & Zhang, H. (2017). Interlaminar shear strength characterization of glass fiber-reinforced epoxy composites using the short-beam shear test. *Polymer Testing*, 59, 184-191.
- [29] Smith, A., Johnson, B., & Thompson, R. (2018). Interlaminar shear strength of fiberglass-polyester composites using the short-beam shear test. *Composites Part B: Engineering*, 152, 101-109.

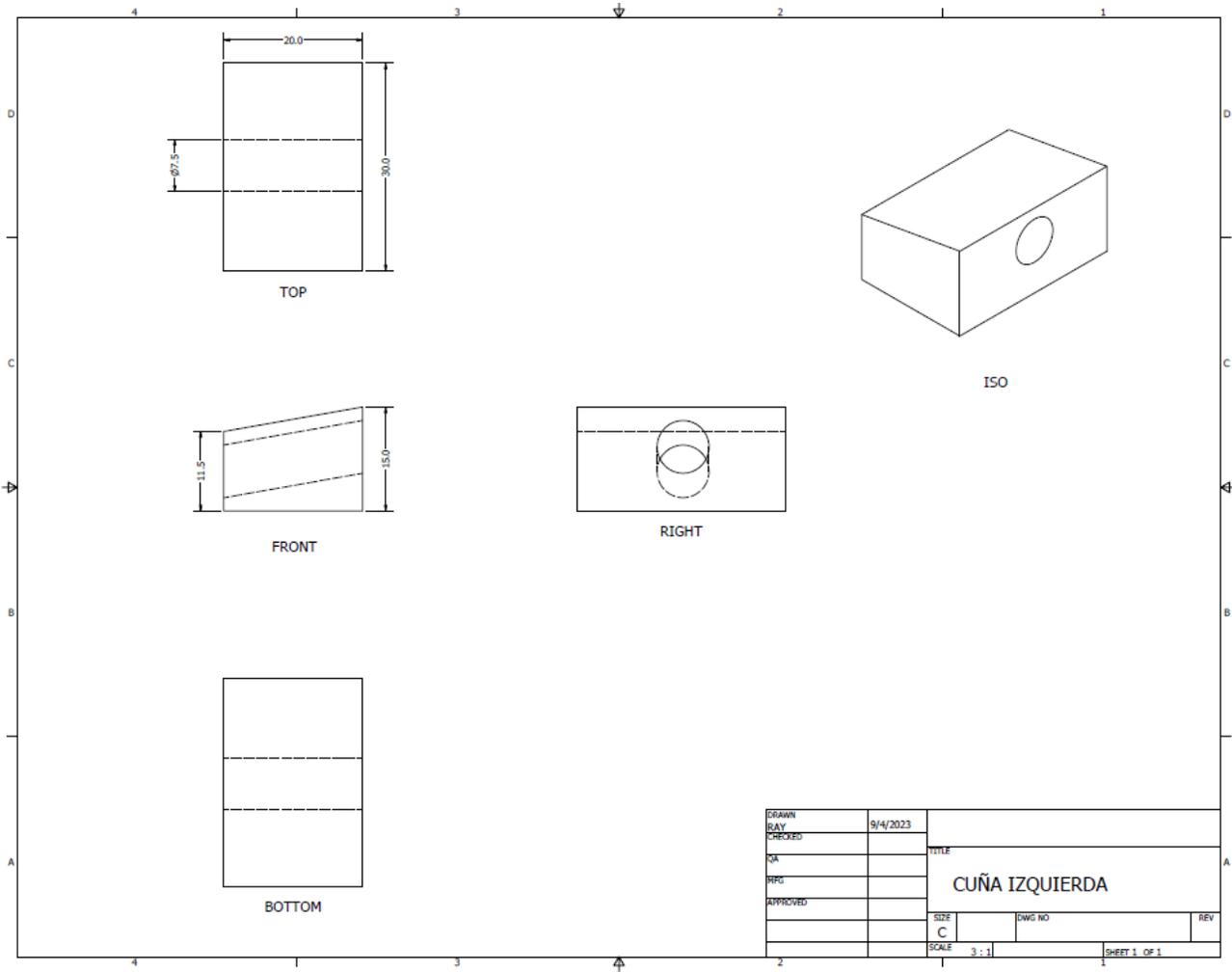
Anexos

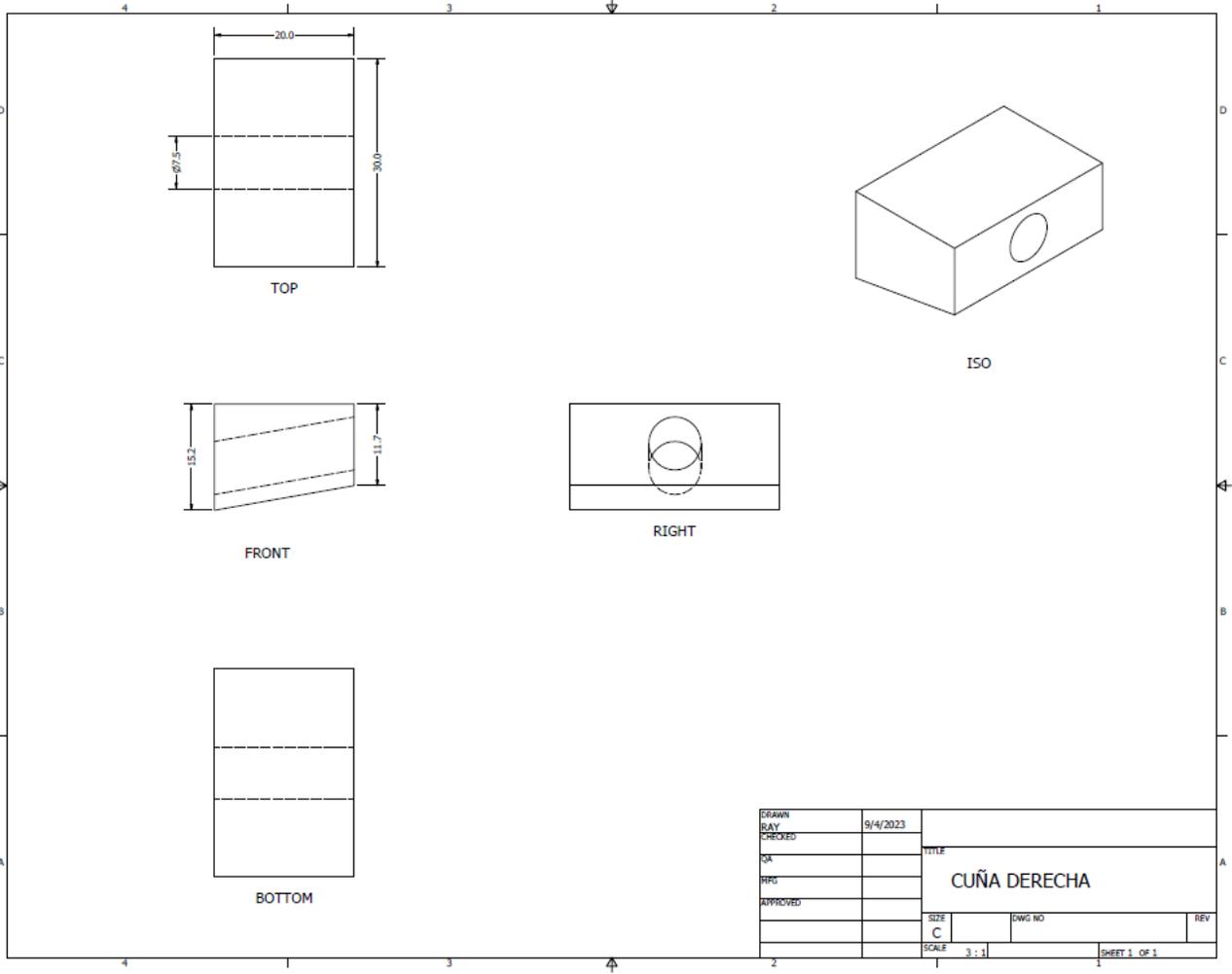
1. Plano fixture máquina de corte de Iosipescu



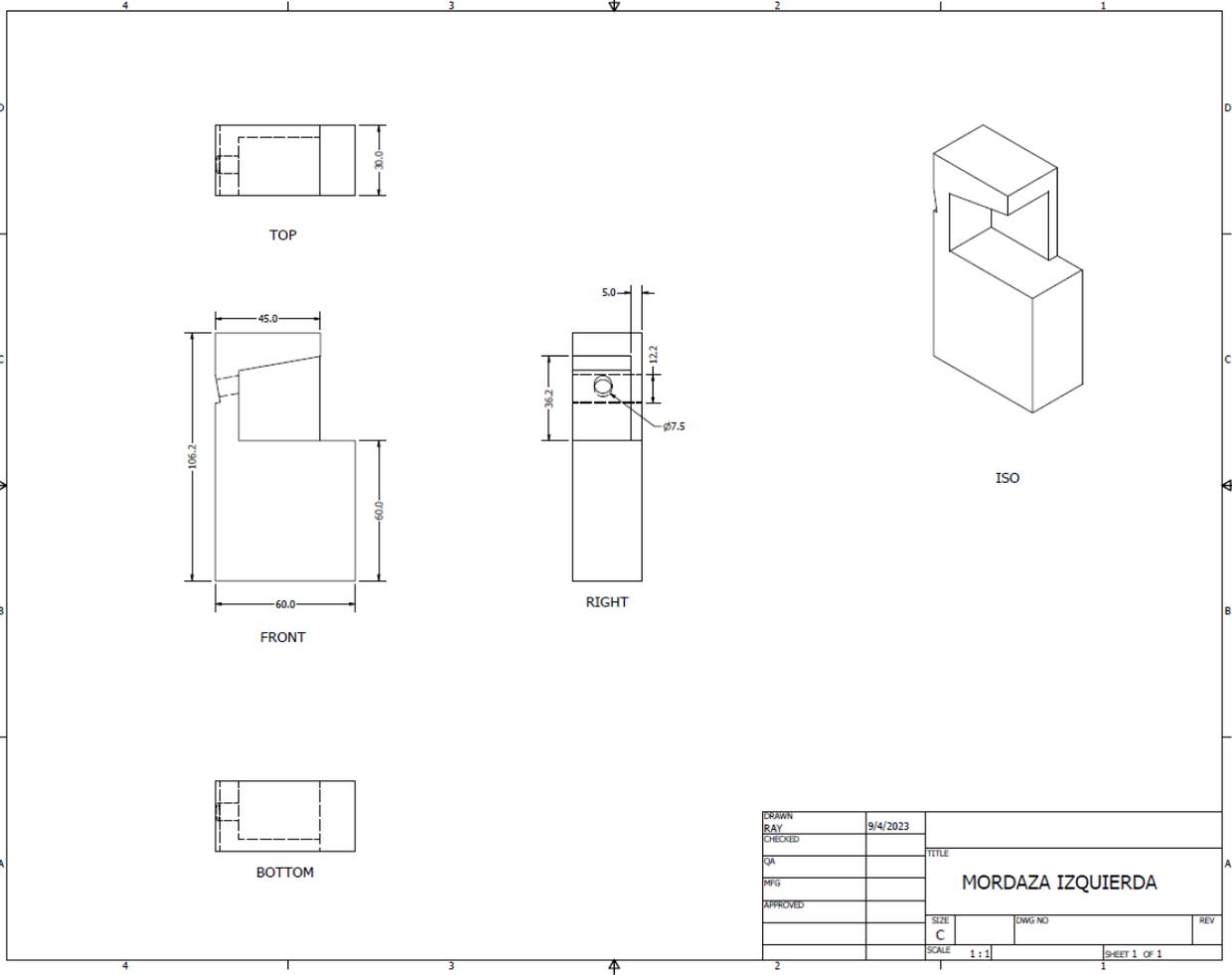


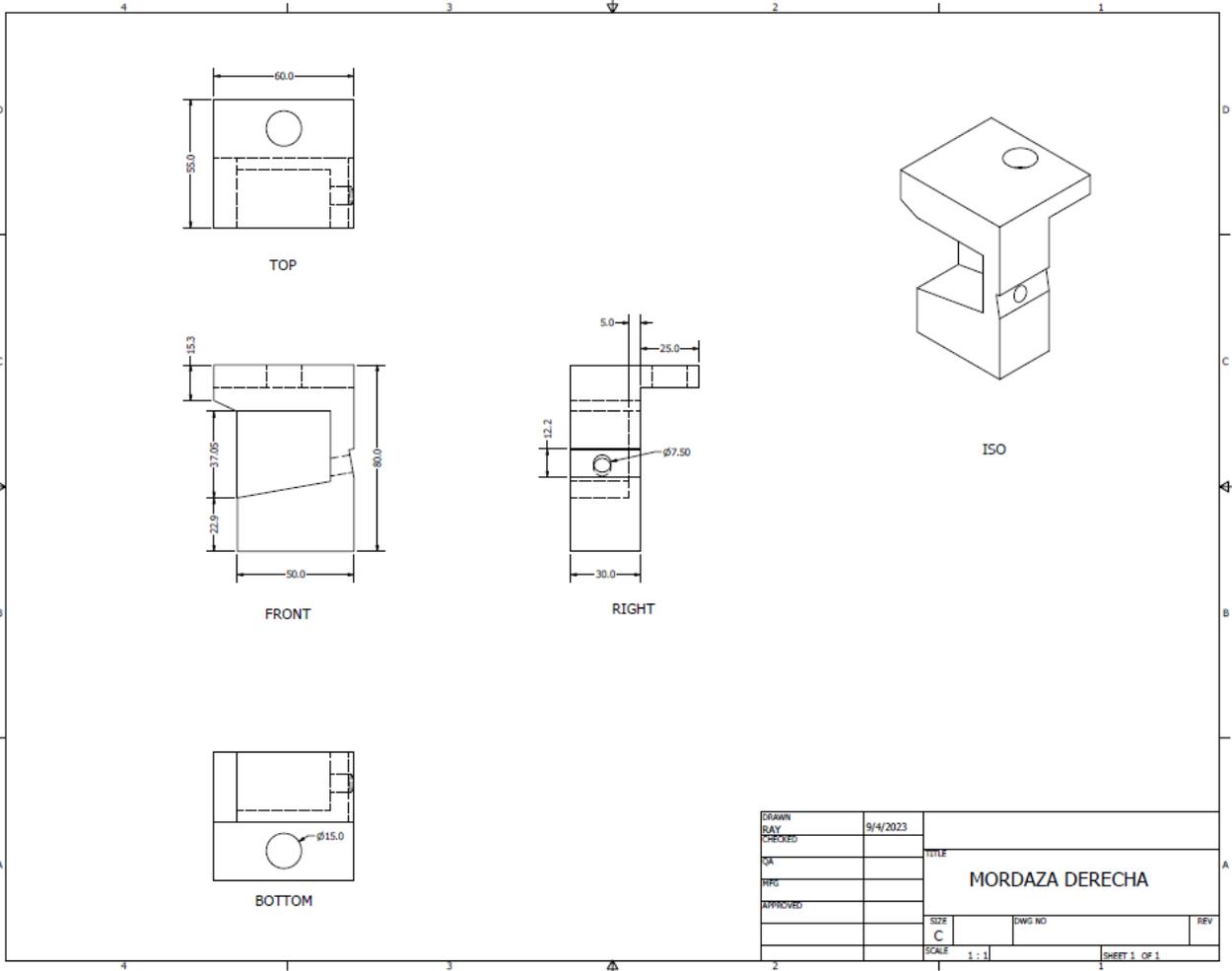
DRAWN	9/4/2023	TITLE	
CHECKED		MORDAZA DERECHA	
QA		SIZE	DWG NO
REP		C	
APPROVED		SCALE	REV
		1 : 1	
			SHEET 1 OF 1

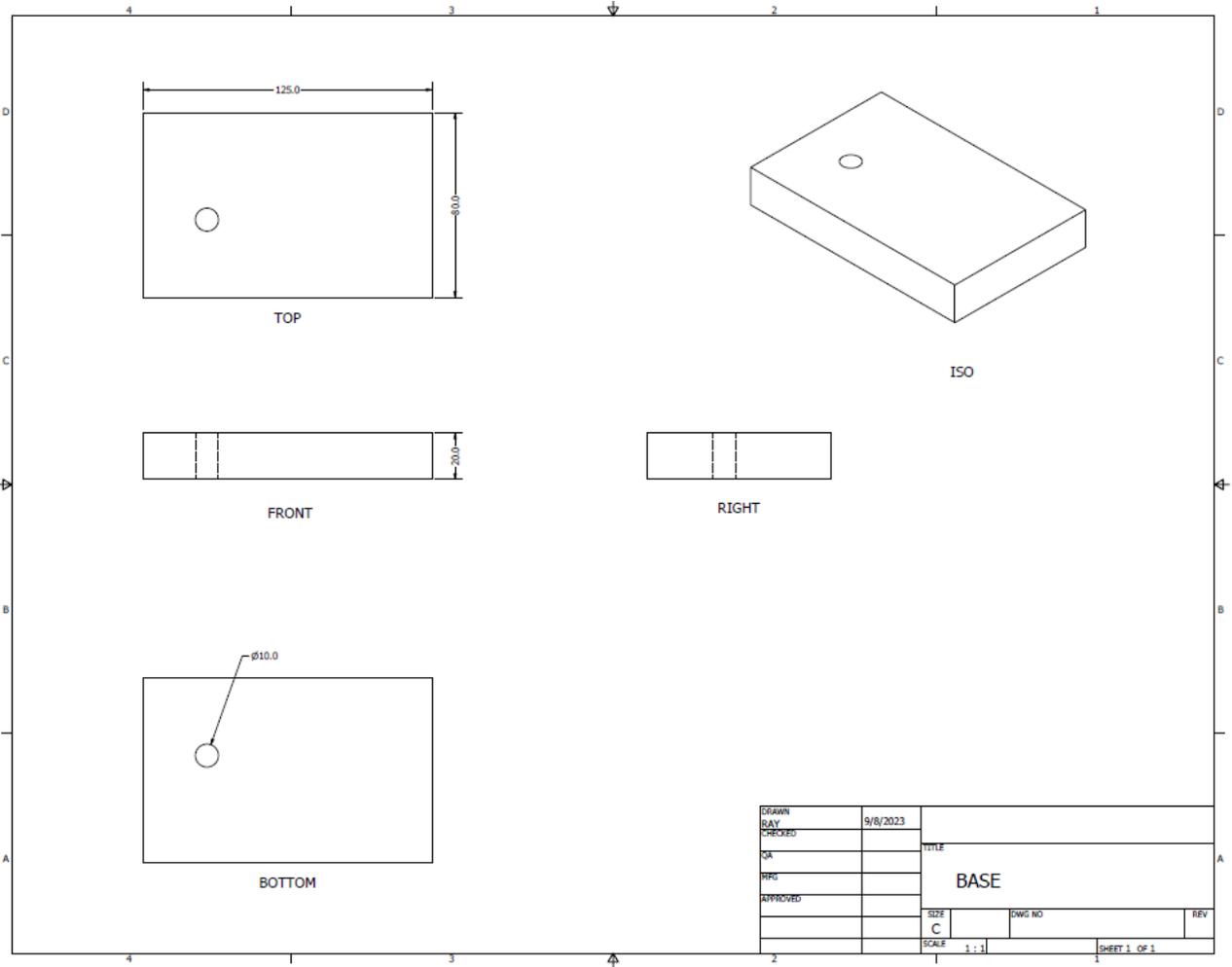


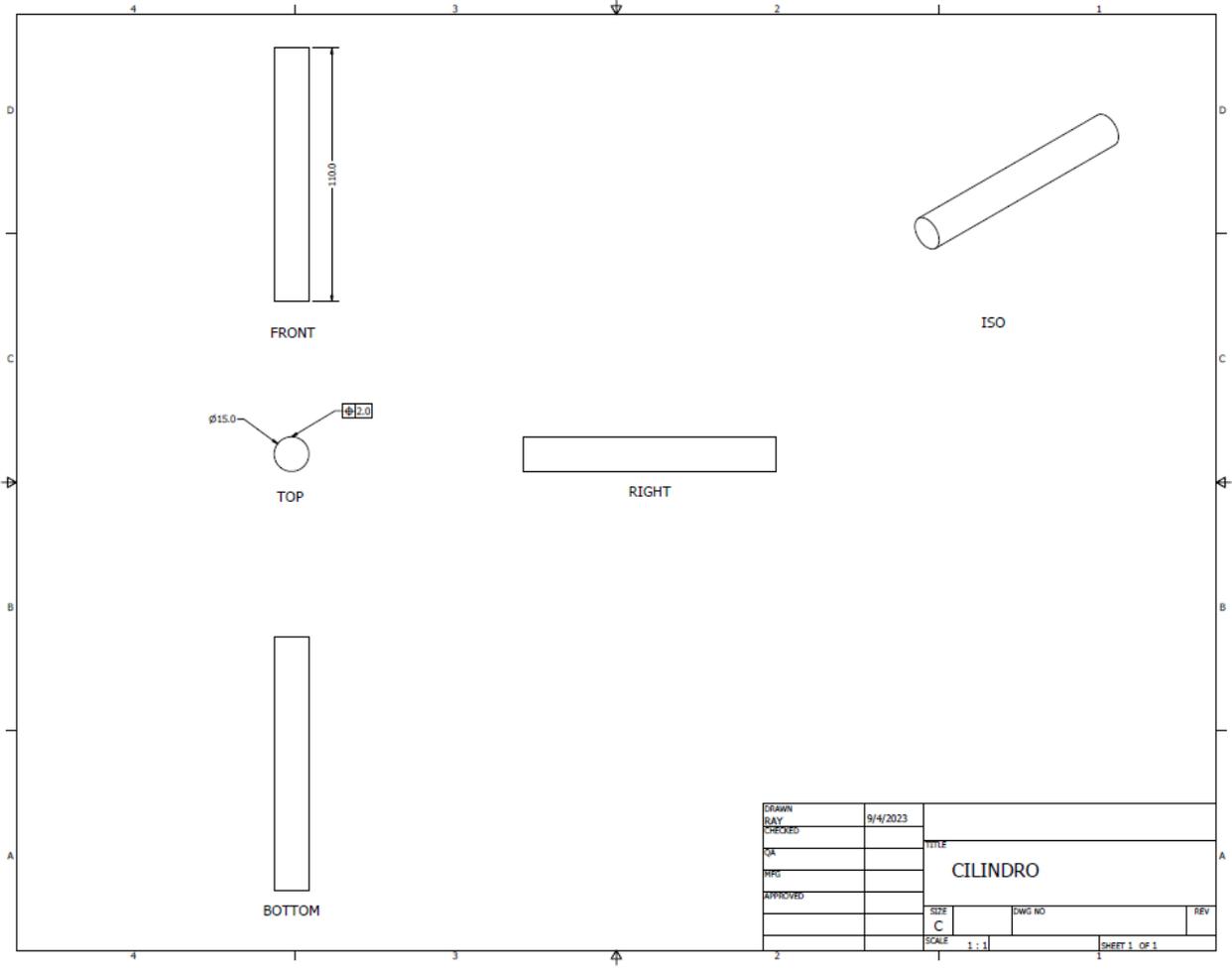


2. Mejoras al diseño de fixture

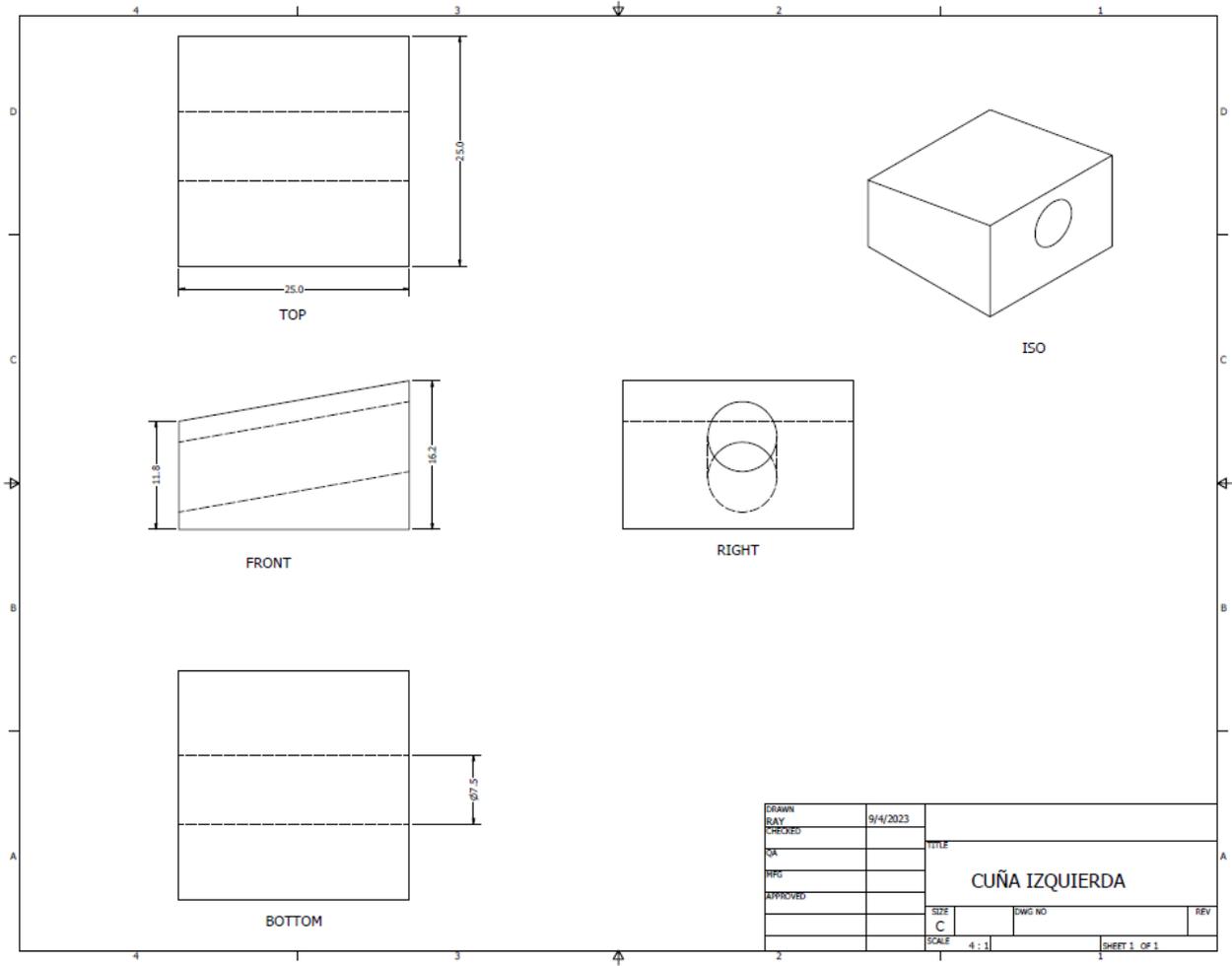


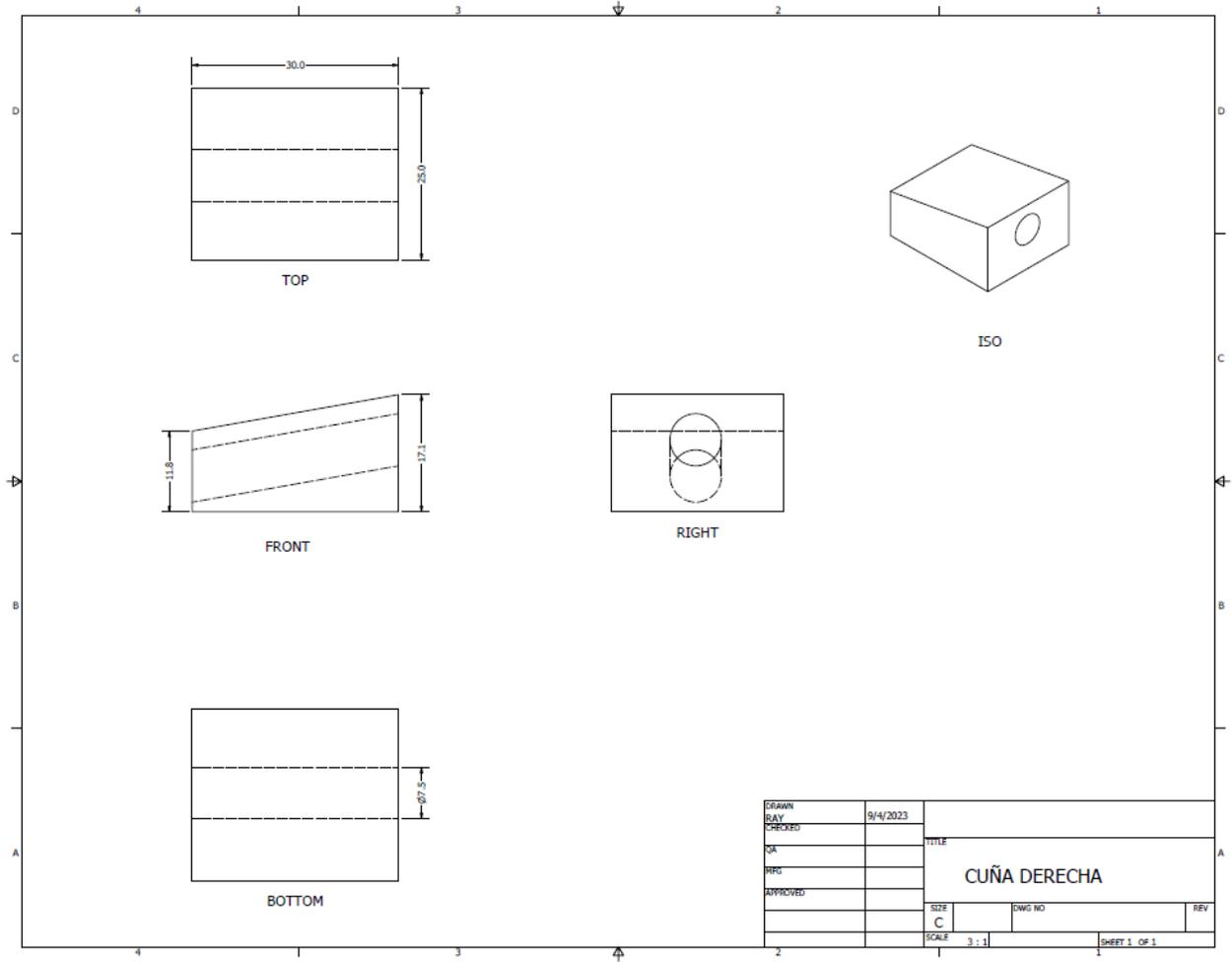






DRAWN		TITLE		
RAY	9/4/2023	CILINDRO		
CHECKED		SIZE	EWG NO	REV
QA		C		
PPS		SCALE	1 : 1	SHEET 1 OF 1
APPROVED				





DRAWN	9/4/2023	TITLE	
CHECKED		CUÑA DERECHA	
QA		SIZE	REV
RFS		C	
APPROVED		DWG NO	
		SCALE	SHEET 1 OF 1
		3 : 1	

