

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Marítima y Ciencias del Mar**

Estudio de un panel de GFRP modificado con material auxético para resistir la presión de agua de mar producida en el fondo de las naves

## **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Tais Naomi Frere Cárdenas

Gilson Rolando Jiménez Calle

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2023

## Dedicatoria

---

A Dios por darme la fuerza y la perseverancia para seguir adelante a pesar de cualquier dificultad. A mis padres Paulino y Cecilia por siempre animarme, y darme su buen consejo, su amor y ser mis mayores admiradores en cada pequeño logro en estos años de estudio. A mi hermana Viviana a quien admiro, amo y aspiro. A mi hermano Martin quien desde lejos sé que celebra mis triunfos. A Carlos, por siempre confiar en mí y ser mi calma.

***Tais Naomi Frere Cárdenas***

Este trabajo fue gracias a Dios por siempre ponerme en este sendero y mostrármelo por medio de mis madres Rosa Calle y Carmen Calle quienes con mi hermano Andy Jiménez son toda mi familia la cual nunca me dejaron de apoyar y confiar en que lo lograría hasta en mis momentos más duros y cuando ya me quería rendir, gracias a esas dos mujeres que nunca perdieron las esperanzas en mí y permitirme vivir la etapa más hermosa de mi vida hasta ahora, las amo con mi corazón.

***Gilson Rolando Jiménez Calle***

## Agradecimientos

---

A Dios por ser guía y luz y permitirnos llegar a buen término este trabajo. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral y los profesores de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar por compartir sus conocimientos y enseñanzas, en especial al PhD. Patrick Townsend, por su guía y apoyo en este proyecto, y al MsC. Daniel Falquez y al Ing. Arián Briones encargados del Laboratorio de Geotecnia y Construcción de la facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra por estar siempre prestos para ayudarnos a llevar a cabo las pruebas.

***Tais Naomi Frere Cárdenas***

***Gilson Rolando Jiménez Calle***

A mis amigos Allison, Nohely, Ronny, Daniela y Rayza quienes me han acompañado y han sido parte fundamental para sobrellevar estos años de estudio brindándome algo invaluable como lo es su amistad.

***Tais Naomi Frere Cárdenas***

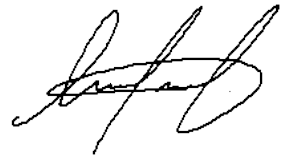
## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Tais N. Frere y Gilson R. Jiménez damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Tais Naomi Frere  
Cárdenas



Gilson Rolando Jiménez  
Calle

## Evaluadores

---

**David Plaza, MsC.**

Profesor de Materia

---

**Patrick Townsend, PhD.**

Tutor de proyecto

## Resumen

En el Ecuador existe un amplio sector pesquero artesanal donde se emplean lanchas que en su mayor parte son hechas de plástico reforzado de fibra de vidrio (PRFV). Cuando las lanchas están navegando a altas velocidades sufren un fenómeno llamado slamming, este, produce delaminaciones entre las capas del material del casco. Así, es de suma importancia realizar estudios de materiales que permitan aumentar la resistencia del casco y su vida útil.

Se presenta el estudio de probetas confeccionadas a con láminas auxéticas; material que tiene propiedades mecánicas muy particulares; con diferentes configuraciones en su geometría para poder determinar cuál será la que es capaz de absorber la mayor cantidad de energía. Para esto se realizaron ensayos de compresión uniaxial sobre las probetas diseñadas.

La ejecución mostró que la probeta en forma de "M" fue aquella capaz de absorber la mayor cantidad de energía. La compresión se consideró cuasiestática con el propósito de simular un impacto instantáneo de slamming y poder procesar la curva del ensayo uniaxial para el cálculo de la energía elástica de acuerdo con el nivel de daño en la probeta. Posteriormente se realizó la laminación de la probeta seleccionada para comparar su comportamiento con el de una probeta de fibra pura.

Se obtuvo que el laminado de PRFV con auxético mostró un rango de mayor absorción de energía sobre el material de solamente fibra. Por lo cual se concluyó que este material puede ser de uso en la construcción de fibra de vidrio, ya que será capaz de absorber mayor cantidad de energía por los golpes de slamming

**Palabras clave:** PRFV, slamming, auxético, energía

## **Abstract**

*In Ecuador there is a large artisanal fishing sector where boats are used that are mostly made of fiberglass reinforced plastic (GFRP). When boats are sailing at high speeds, they suffer a phenomenon called slamming, this produces delaminations between the layers of the hull material. Thus, it is extremely important to carry out studies of materials that allow increasing the resistance of the hull and its useful life.*

*The study of specimens made with auxetic sheets at different configurations in their geometry is presented in order to determine which one will be capable of absorbing the greatest amount of energy. For this, uniaxial compression tests were carried out using Hooke's 3D law on the designed specimens.*

*The execution showed that the auxetic specimen in the "M" shape was the one capable of absorbing the greatest amount of energy. The compression was considered quasistatic with the purpose of simulating an instantaneous slamming impact and being able to process the uniaxial test curve for the calculation of the elastic energy according to the level of damage in the specimen. Subsequently, the lamination of the selected specimen was carried out to compare its behavior with that of a pure fiber specimen.*

*It was obtained that the GFRP laminate with auxetic showed a range of greater energy absorption over the material of only fiber. Therefore, it was concluded that this material can be used in the construction of fiberglass, since it will be able to absorb a greater amount of energy from slamming impacts.*

**Keywords:** GFRP, slamming, auxetic, energy

## INDICE GENERAL

Resumen .....	V
Abstract .....	VI
Abreviaturas .....	XII
Simbología.....	XIII
Capítulo 1 .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Descripción del problema .....	3
1.2 Justificación del problema.....	4
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Materiales compuestos.....	5
1.4.2 Metamateriales .....	6
1.4.3 Materiales auxéticos.....	6
1.4.4 Tipos de estructuras Auxéticas.....	8
1.4.5 Modelo de geometría disipadora de impacto .....	11
1.4.6 Fabricación de geometría disipadora de impacto.....	11
1.4.7 Lanchas de fibra de vidrio.....	12
Capítulo 2 .....	15
2. Metodología .....	16
2.1 Ensayo de compresión .....	16
2.2 Descripción de equipos .....	16
2.2.1 Maquina SHIMADZU UH-X/UH-FX.....	16
2.3 Descripción de los especímenes .....	18



2.3.1	Diseño del espécimen de prueba.....	18
2.3.2	Impresión del espécimen.....	20
2.3.3	Laminado del espécimen.....	22
2.3.3.1.	Ley de Hook generalizada aplicada a laminas .....	23
2.4	Descripción del ensayo de compresión.....	24
2.5	Diseño del ensayo .....	24
2.6	Cálculos desarrollados .....	25
Capítulo 3	.....	29
3.	Resultados y análisis .....	30
3.1	Procedimiento.....	30
3.2	Selección del perfil más resistente.....	31
3.2.1	Fuerza-Deformación, Resultados y análisis .....	31
3.2.2	Módulo de rigidez, Resultados y análisis .....	34
3.2.3	Energía absorbida, Resultados y análisis .....	35
3.3	Laminado en fibra de vidrio.....	36
3.3.1	Ensayos Fibra de vidrio, Resultados y análisis .....	36
3.3.2	Ensayos Fibra + Auxético, Resultados y análisis .....	39
3.3.3	Comparación entre laminados .....	42
Capítulo 4	.....	44
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	45
4.1	Conclusiones .....	45
4.2	Recomendaciones .....	47
APÉNDICES	.....	50

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Combinación de propiedades mecánicas entre materiales)</i> .....	5
Figura 1.2. <i>Comportamiento normal de un material isotrópico</i> .....	7
Figura 1.3. <i>Comportamiento de metamaterial auxético</i> .....	7
Figura 1.4. <i>Geometrías auxéticas en el plano</i> .....	9
Figura 1.5. <i>Geometrías auxéticas en el espacio</i> .....	9
Figura 1.6. <i>Geometría quirál auxética</i> .....	10
Figura 1.7. <i>Geometría auxético rotante</i> .....	10
Figura 1.8. <i>Planeo de lancha bite me</i> .....	14
Figura 2.1. <i>Máquina SHIMADZU UH-X</i> .....	17
Figura 2.2. <i>Máquina SHIMADZU UH-FX</i> .....	18
Figura 2.3. <i>Bosquejo de las probetas sometidas al ensayo de compresión</i> .....	19
Figura 2.4. <i>Respuesta al impacto</i> .....	19
Figura 2.5. <i>Dimensiones relevantes de las geometrías auxéticas</i> .....	20
Figura 2.6. <i>Probeta con perfil de “T”</i> .....	21
Figura 2.7. <i>Probeta con perfil de “T”</i> .....	21
Figura 2.8. <i>Probeta con perfil de “T”</i> .....	21
Figura 2.9. <i>Proceso de laminado en fibra de vidrio</i> .....	22
Figura 2.10. <i>Representación del laminado de fibra con un núcleo</i> .....	22
Figura 2.11. <i>Respuesta de una lámina de material ortótropo al aplicar una carga</i> .....	23
Figura 2.12. <i>(a) Marco metálico diseñado para experimentación (b) Compresión de la probeta auxética</i> .....	25
Figura 2.13. <i>Forma en la que actual la energía sobre el panel.</i> .....	26
Figura 3.1. <i>Resultados de los ensayos en perfil “T”</i> .....	31

Figura 3.2. <i>Resultados de los ensayos en perfil “PI”</i> .....	32
Figura 3.3. <i>Resultados de los ensayos en perfil “M”</i> .....	33
Figura 3.4. <i>Comparación del módulo K de cada probeta</i> .....	34
Figura 3.5. <i>Rango de energía absorbida por ensayo</i> .....	36
Figura 3.6. <i>Fuerza deformación para las probetas de solo fibra</i> .....	37
Figura 3.7. <i>Módulo de rigidez de la fibra pura</i> .....	38
Figura 3.8. <i>Módulo de rigidez de la fibra pura</i> .....	39
Figura 3.9. <i>Fuerza- Deformación para las probetas de fibra-auxético</i> .....	40
Figura 3.10. <i>Módulo de Rigidez para las probetas fibra-auxético</i> .....	41
Figura 3.11. <i>Energía absorbida por cada ensayo de las probetas fibra-auxético</i> . 42	
Figura 3.12. <i>Energía absorbida por cada ensayo de las probetas de fibra pura y fibra-auxético</i> .....	43

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. <i>Coefficiente de Poisson con su respectivo comportamiento físico</i> .....	8
Tabla 2.1. <i>Dimensiones de las probetas de cada ensayo</i> .....	20
Tabla 2.2. <i>Disposición del arreglo del laminado</i> .....	24

## Abreviaturas

<i>PRFV</i>	Plástico Reforzado de Fibra de Vidrio
<i>FICT</i>	Matriz de Rigidez
<i>ASTM</i>	American Society of Testing Materials
<i>PLA</i>	Ácido Poliláctico
<i>TPU</i>	Poliruretano Termoplástico

## Simbología

$E$	Módulo de elasticidad
$Q$	Matriz de Rigidez
$\nu$	Módulo de Poisson
$\sigma$	Esfuerzo normal o axial
$\tau$	Esfuerzo Cortante
$\delta$	Desplazamiento por aplastamiento
$\epsilon$	Deformación Unitaria
$Ea$	Energía Absorbida
$Er$	Energía de retorno
$K$	Constante de rigidez a compresión
$\dot{V}$	Velocidad de deformación
$F$	Fuerza aplicada
$A$	Área de contacto a compresión
$MPa$	Mega Pascal
$W$	Trabajo o energía
$J$	Jules
$N$	Newtons
$mm$	Milímetros

# Capítulo 1

# 1. Introducción

Las lanchas son vehículos acuáticos utilizados comúnmente a lo largo de la costa ecuatoriana por pescadores artesanales los cuales tienen directa participación en la economía de los sectores costeros. Sin embargo, las lanchas sufren daños en la estructura del casco la cual es convencionalmente de fibra de vidrio, estos daños representan gastos de reparación y mantenimiento en lapsos de tiempo de mediano a corto plazo, lo que nos lleva a proponer una nueva alternativa en el diseño y construcción que prolongue la vida útil de la estructura más afectada del casco de las lanchas y reduzca costos de mantenimiento.

En los años 90 se descubrió un material con propiedades mecánicas interesantes que no se le empleaba un uso hasta después del nuevo siglo, este denominado material auxético el cual tiene como característica poseer un coeficiente de Poisson es negativo. Lo que se puede describir del comportamiento mecánico es cuando se estira o comprime el material en la dirección de un plano, en la dirección del plano transversal se replicará el comportamiento de la deformación, haciendo que cambien su escala de manera proporcional. Se han identificado tres divisiones de estudio más relevantes dentro de este material auxético y son: sólidos reticulares, polímeros y materiales compuestos de fibra de vidrio (Sierra, 2017).

El campo pesquero artesanal en el Ecuador es muy amplio lo que lleva a la innovación en la construcción y mantenimiento de las lanchas artesanales. Los pescadores utilizan lanchas de fibra de vidrio comúnmente propulsadas por motores fuera de borda, estas lanchas tienen de 4 a 12 metros de eslora aproximadamente (Reyes, 2018). El impacto de una embarcación planeadora, contra las olas del mar durante su navegación es conocido como el fenómeno de *slamming*. Producto de la velocidad de la embarcación, esta se comienza a elevar por sustentación hidrodinámica para luego, al momento de romper el equilibrio, caer verticalmente



sobre el agua, estas son grandes presiones por cortos periodos de tiempo que golpean la estructura.

En el presente trabajo, pretende estudiar el uso de material auxético como buena alternativa de aplicación en la industria naval artesanal. Esto basado en la hipótesis de que este material auxético en conjunto con el laminado de fibra de vidrio puede aumentar la resistencia del panel cerca de la proa de la lancha cuando se produce el impacto del fondo con la superficie del agua. Para ello, se realizará ensayos de compresión a 3 diferentes estructuras de material antes mencionado y se seleccionará la estructura que mayor resistencia presente al fallar debido a la carga aplicada. De manera que se incrementará la matriz elasticidad del laminado de fibra y con ello estimar el coeficiente de amortiguamiento que se introduce con el material auxético y como podrá alargar la vida útil de la nave artesanal.

### **1.1 Descripción del problema**

A lo largo de la costa ecuatoriana, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, (Cedeño, 2011), en un estudio hecho para la situación de la pesca a pequeña escala en Ecuador se obtuvo que el total de lanchas de fibra de vidrio en las zonas costeras de las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, El Oro y Los Ríos es de 20 789. Las embarcaciones pesqueras artesanales durante su ruta de navegación alcanzan velocidades considerables que hacen el bote planee y se vea afectado por el fenómeno de *slamming*.

Con el paso del tiempo y este continuo impacto de *slamming* sobre el fondo de las naves, va a provocar delaminaciones entre las capas y grietas en la matriz del material. (Townsend, 2018). Por ello, nace la necesidad del estudio del comportamiento de paneles de material auxético que puedan introducirse en el laminado de fibra de vidrio de las naves para lograr prolongar el tiempo de vida útil de las naves.

## **1.2 Justificación del problema**

El término auxético fue introducido en 1991 por el profesor Ken Evans, derivado de la palabra griega “auxético” que quiere significar que tiende a incrementar, esto es, al estirar una pieza de material auxético da como resultado una expansión lateral en lugar de una contracción. (Kolkeem & Zadpoor, 2017)

Es esta respuesta mecánica inusual que hace que los materiales auxéticos ofrezcan una ruta para alcanzar valores extremos de otras propiedades del material como una mayor resistencia a la indentación, resistencia al corte, absorción de energía, dureza y tenacidad a la fractura. La necesidad de obtener una configuración de un material que contenga un conjunto de propiedades mecánicas deseadas ha llevado al desarrollo de metamateriales mecánicos auxéticos. (Prawoto, 2012). Actualmente, no existe un estudio acerca de configuraciones auxéticas en el Ecuador por lo que, el presente estudio permitirá encontrar la configuración de material auxético introducida en el laminado de GFRP de las naves que presenten un mejor comportamiento a la presión aplicada en los ensayos de compresión realizados al panel que simulan el fondo de una nave.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Estudio las propiedades mecánicas de probetas de material auxético con diferentes estructuras bajo ensayos de compresión para determinar el efecto en la matriz de rigidez del laminado con fibra de vidrio.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Establecer el diseño de una estructura auxética a usar teniendo como base estudios anteriores para la impresión 3D de los especímenes de prueba.

2. Analizar el comportamiento mecánico de cada espécimen de material auxético sometiéndolos bajo ensayos de compresión para obtener la caracterización mecánica del material.
3. Realizar el laminado en fibra de vidrio en conjunto con paneles de material auxético para determinar el cambio en la matriz de rigidez respecto al laminado normal de fibra de vidrio.

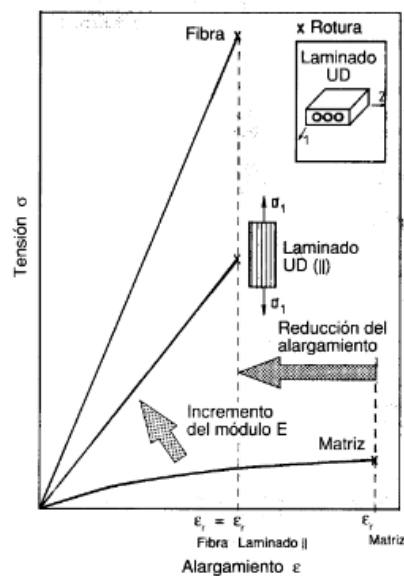
## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos nacen a partir de la combinación de 2 o más materiales que puedan fusionarse por una unión que no permita la solubilidad entre sí (Dietrich, 2005). El propósito de crear materiales compuestos es obtener una mezcla la cual presente la combinación de las propiedades mecánicas una aplicación específica como se puede observar en la figura 1.1 para (Dietrich, 2005).

**Figura 1.1.**

*Combinación de propiedades mecánicas entre materiales)*



*Nota:* ilustración tomada de materiales compuestos, proceso de fabricación de embarcaciones (2005)

Se definen dos partes importantes en un material compuesto la primera se denomina matriz y el segundo como núcleo (o fibra) (Dietrich, 2005). La matriz es el material que permanece continuo a lo largo de toda la mezcla, Por otra parte, el núcleo o fibra del material compuesto es una parte sólida colocada dentro de la matriz que permite reforzar el medio continuo (Kumar & Kumar, 2015).

Se pueden definir 3 tipos de materiales compuestos según su matriz:

- a) Materiales con matriz metálica
- b) Materiales con matriz cerámica
- c) Materiales con matriz polimérica

#### **1.4.2 Metamateriales**

Los metamateriales son aquellos que no se encuentran fácilmente en la naturaleza, estos poseen estructuras bastante inusuales, su origen proviene del griego “Meta”, lo que quiere decir que va más allá de. (Kumar & Kumar, 2015). Según Walser (2001) estos son compuestos macroscópicos que poseen una estructura celular periódica, tridimensional que se combina para producir una resultante óptima que no se encuentra de manera natural.

La familia de metamateriales que son mecánicos se subdivide en:

- Acústicos
- Con coeficiente de Poisson negativos o auxéticos
- Con módulo de compresibilidad lineal y volumétrica negativos

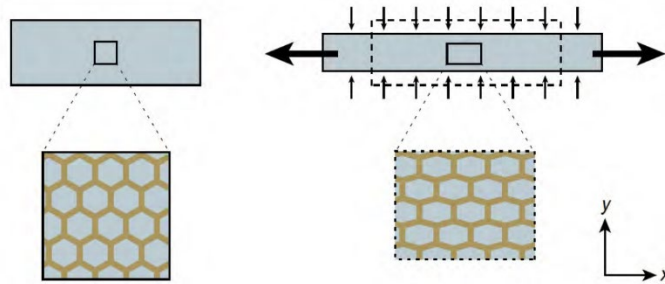
#### **1.4.3 Materiales auxéticos**

Un material auxéticos tienen la capacidad de cambiar la escala de su geometría cuando se le es aplicada una carga causando un aumento o reducción de espacios entre la estructura

molecular (Sierra, 2017). El término “auxético” fue usado por el profesor Evans (1991) para referirse a polímeros que cumplen con estas características, en la Ilustración 1.4 se puede observar una explicación gráfica.

**Figura 1.2.**

*Comportamiento normal de un material isotrópico*

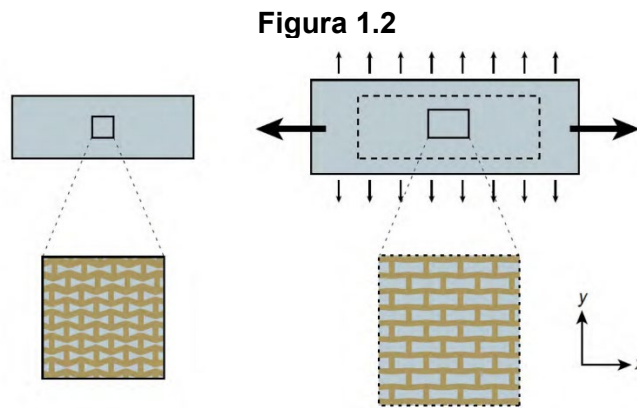


*Nota:* Ilustración tomada de un Aplicaciones de propiedades auxéticas, por (Alvarez, 2017)

En la ilustración 1.2. se muestra cuando el material no auxético es estirado, las celdas que lo componen se alargan en dirección “x” pero se acortan en dirección “y”.

**Figura 1.3.**

*Comportamiento de metamaterial auxético*



**Figura 1.2**

*Nota:* Ilustración tomada de un Aplicaciones de propiedades auxéticas, por (Alvarez)

En la ilustración 1.3 se muestra que cuando el material auxético es estirado, las celdas que lo componen se alargan en dirección “x” y también en dirección “y”

El comportamiento de las estructuras auxéticas no ha sido completamente definido por un estudio riguroso. Sin embargo, su comportamiento no tan elástico demuestra que su capacidad de absorber energía hace que la resistencia al generarse alguna fractura o abolladura sea mayor que los materiales convencionales (Taberero & Varas, 2019). Finalmente se puede interpretar el comportamiento del material tomando los valores del coeficiente de Poisson de la siguiente tabla 1.1 a continuación:

**Tabla 1.1.**

*Coefficiente de Poisson con su respectivo comportamiento físico*

Coefficiente de Poisson	Comportamiento físico
$\nu = 1$	Conservación del área
$\nu = 0,5$	Conservación del volumen
$\nu = 0$	Conservación de la sección transversal
$\nu = -0,5$	Conservación del módulo, $E = G$
$\nu = -1$	Conservación de la forma

Se muestra cada valor de coeficiente de Poisson y una simple explicación del comportamiento mecánico de su estructura aplicada una carga.

#### **1.4.4 Tipos de estructuras Auxéticas**

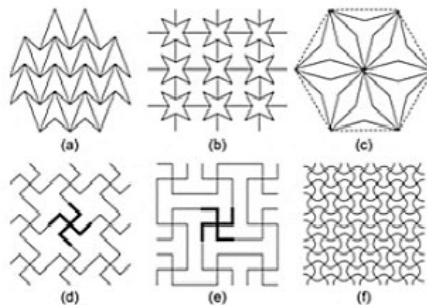
En la actualidad la descripción desde la geometría micromolécula de un material auxético está presentado de manera muy compleja. Sin embargo, los modelos propuestos por los investigadores dan simple explicación a la respuesta del material al aplicar una carga sobre ellos (Taberero & Varas, 2019).

#### 1.4.4.1 Estructura re-entrantes 2D y 3D

Los elementos en la estructura del material se encuentran en específica posición con su respectiva dirección, haciendo que los elementos adyacentes permitan los grados de libertad de la estructura del material auxético cuando son deformados permitiéndole comprimirse o expandirse (Tabernero & Varas, 2019). Su subclasificación hexagonal reentrante es la que suele usarse con mayor frecuencia y es la que presenta mayor capacidad de absorción de energía (Sevilla, 2020). En el caso de estructura 2D se puede observar la figura 1.4 y para 3D en la figura 1.5 a continuación:

**Figura 1.4.**

*Geometrías auxéticas en el plano*



*Nota:* Estructuras auxéticas en dos dimensiones tomado de (Tabernero & Varas, 2019)

**Figura 1.5.**

*Geometrías auxéticas en el espacio*



*Nota:* Estructuras auxéticas en dos dimensiones tomado de (Tabernero & Varas, 2019)

#### **1.4.4.2 Estructuras quirales**

Los elementos de esta estructura dan presencia a fibras con forma circular y triangular lo que permite que en los elementos rectos se produzca una flexión o rotación cuando se aplica una carga lo que permita los grados de libertad de movimiento caractericen el comportamiento estructural de un material auxético (Tabernero & Varas, 2019), véase la figura 1.6 a continuación.

**Figura 1.6.**

*Geometría quiral auxética*



*Nota:* tomado de estructuras auxéticas sometidas a impacto por (Tabernero & Varas, 2019)

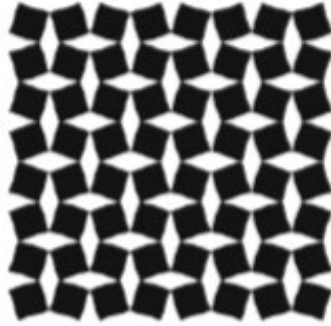
#### **1.4.4.3 Estructuras rotantes**

Este tipo de estructura se caracteriza por estar representado por bloques unidos en sus vértices lo que les permite la rotación libre cuando se es aplicada una carga ya sea de tensión o compresión, permitiendo que los bloques de cierre o apertura a espacios entre la estructura, lo que puede generar zonas de alta o baja densidad dependiendo de la carga y la dirección de esta (Tabernero & Varas, 2019), obsérvese la figura 1.7 a continuación.

**Figura 1.7.**

*Geometría auxético rotante*





*Nota:* tomado de estructuras auxéticas sometidas a impacto por (Tabernero & Varas, 2019)

Finalmente, Estas 3 estructuras antes mencionadas son modelos para comprender el comportamiento del material y esto no quiere decir que los materiales auxéticos tengan esta estructura obligatoriamente.

#### **1.4.5 Modelo de geometría disipadora de impacto**

El modelado de una estructura capaz de disipar un impacto debe ser considerando una estructura que puede recibir y transmitir las ondas de impacto de regreso a la fuente, para ello, las propiedades mecánicas de una estructura auxéticas muestran una alternativa capaz de producir este fenómeno pues la respuesta del material será de devolver la energía y no absorberla (Sevilla, 2020).

#### **1.4.6 Fabricación de geometría disipadora de impacto**

Una investigación de la Universidad Carlos III De Madrid demuestra que el estudio sugiere que la fabricación de materiales con comportamientos auxético puede aproximarse usando el método impresión 3D de fusión de filamento fundido (FFF) de polímeros, dónde es muy efectivo usar un material de PLA para modelas las estructuras auxéticas, lo que ha validado que las pruebas a los ensayos energéticos sobre probetas fabricadas con este material comprueban que las hipótesis realizadas sean validas (Tabernero & Varas, 2019).

#### **1.4.7 Lanchas de fibra de vidrio**

Las lanchas son un tipo de embarcación la cual tiene una eslora que rodea de 10-15 metros y como principal característica que tiene motores fuera de borda adaptados para la propulsión de la misma y son usualmente construidos en material de resina y fibra de vidrio (Reyes, 2018), La fibra de vidrio es un material que puede ser manipulado de manera artesanal para la construcción ofreciendo una alternativa a la reducción del peso del casco en comparación a utilizar materiales como acero naval o aluminio, la utilización de este tipo de resina y fibra reduce tiempo de construcción (Dietrich, 2005).

En la costa ecuatoriana este tipo de embarcaciones son utilizadas en mayor porcentaje para la actividad de pesca artesanal. Sin embargo, al ser construcción artesanal en gran parte, se produce un deterioro de su estructura de manera rápida lo que afecta directamente año tras año la economía de los dueños de la embarcación por gastos de mantenimiento.

Por lo que surge la necesidad de ofrecer, un nuevo método de reforzar la zona más crítica y afectada por el slamming en el casco en la zona cerca de proa para mejorar el tiempo de vida útil de la nave y se reduzcan gastos año tras año de mantenimientos.

##### **1.4.7.1 Materiales para fabricación artesanal de lanchas de fibra de vidrio**

En primer lugar, se describirá los materiales más importantes para la producción de este tipo de lanchas:

**Fibra de vidrio:** Es un material compuesto de finas fibras de vidrio que estando en cohesión con resina generan una estructura bastante resistente el cual se vuelve un indispensable material en la construcción artesanal embarcaciones para personas naturales o jurídicas artesanales (Reyes, 2018).

**Resinas:** Es la matriz termoestable más usada en la industria, contiene propiedades adherentes y de gelificación en función de la temperatura de ambiente (Reyes, 2018), la resina de uso más común en la construcción naval es la resina poliéster (Dietrich, 2005).

**Gelcoat:** Es la primera capa de resina que tiene como función cumplir como protección ante el desgaste de la superficie del casco de la embarcación, lo que demanda muchas precauciones para impedir la formación de un laminado desequilibrado, donde el espesor del laminado debe estar dentro (0,25-0,4 mm) (Dietrich, 2005).

#### **1.4.7.2 Slamming del casco**

El *slamming* del casco es uno de los grandes problemas para la construcción y operación de una embarcación que se debe considerar al momento de su diseño (Townsend, 2018). El *slamming* del casco hace referencia al impacto que tiene el casco al golpear con el agua, las embarcaciones al alcanzar cierta velocidad empiezan a planear elevándose sobre la superficie del agua para luego caer de forma vertical sobre las olas (Abrate, 2011).

El fenómeno de Slamming es el principal responsable de que la estructura del casco en el fondo sea afectada con micro fisuras generas por los impactos del panel del fondo del casco del bote con la superficie del agua (Townsend, 2018) tal como se puede observar las fases para que ocurran este fenómeno en la figura 1.8, estas micro fisuras se transmiten desde la cara exterior del casco la cual recibe todo el impacto y se dirige hacia la cara interior provocando la destrucción en la zona permitiendo el paso del agua y el naufragio de la embarcación si esta no se soporta hasta llegar a puerto (Abrate, 2011).

**Figura 1.8.**

*Planeo de lancha bite me*



*Nota:* Obtenido de la tesis doctoral de (Townsend, 2018) en el estudio de comportamiento de materiales compuestos sometidos a impacto

Los efectos negativos de este fenómeno en la navegación dependerán mucho del estado de mar en el que se encuentra navegando (Abrate, 2011). En la costa ecuatoriana es común tener estados de mar 3 y 4 en donde las lanchas artesanales operan.

## Capítulo 2

## **2. Metodología**

Para realizar el estudio de los paneles modificados con material auxético se sometió a ensayos de compresión uniaxial cada probeta, con tres diferentes configuraciones. Para cada espécimen se realizaron 5 pruebas, lo cual permitió definir y caracterizar el material. Contando con esta información se realizó un panel de PRFV con un núcleo auxético, el mismo que a su vez fue sometido bajo ensayos de compresión para poder determinar la presión máxima soportada y establecer diferencias entre el panel de fibra de vidrio con auxético y sin auxético. Los ensayos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción en la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencia de la Tierra), empleando la máquina de SHIMADZU UH-FX.

### **2.1 Ensayo de compresión**

Se realiza este tipo de ensayo con el fin de determinar el comportamiento de un material sometido bajo una carga de presión que va aumentando constantemente, es decir que va a permitir establecer la caracterización del material. Cabe destacar que para este ensayo no se hace uso de alguna norma en específico debido a que el material a probar no se encuentra previamente analizado, sin embargo, para determinar el número de ensayos que se hacían por cada probeta se tomó como guía la ASTM D695-15 donde usan materiales plásticos e indica que el número adecuado de especímenes por ensayos es de 5.

### **2.2 Descripción de equipos**

Se usaron los siguientes equipos para llevar a cabo los ensayos de compresión a los especímenes:

#### **2.2.1 Máquina SHIMADZU UH-X/UH-FX**

La máquina de ensayo universal consta de dos partes, la UH-X y UH-FX

### **2.2.1.1 UH-X Series**

Existen de 7 tipos 200,300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 KN. Para el caso del presente estudio se utilizó la de 500 KN. Misma que controla en: desplazamiento [mm/min], Fuerza/Tiempo [KN/seg], Esfuerzo/tiempo [MPa/min]. Es controlada por computadora a través de un servo hidráulico y una bomba que opera cuando es necesario. Posee un indicador análogo de gran tamaño y una pantalla digital, ver figura 2.1, que permite observar cualquier cambio en la fuerza de prueba.

#### **Figura 2.1.**

*Máquina SHIMADZU UH-X*



*Nota:* Obtenido del catálogo de instrumentos presentado por (SHIMADZU, 2023)

### **2.2.1.2 UH-FX Series**

Este componente está disponible en 6 tipos, los cuales pueden ser 300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 KN. De igual manera, fue usada versión compatible con la UF-X descrita previamente, que es la 500 KN. Está equipada con mordazas hidráulicas.

## **Figura 2.2.**

*Máquina SHIMADZU UH-FX*



*Nota:* Obtenido del catálogo de instrumentos presentado por (SHIMADZU, 2023)

### **2.3 Descripción de los especímenes**

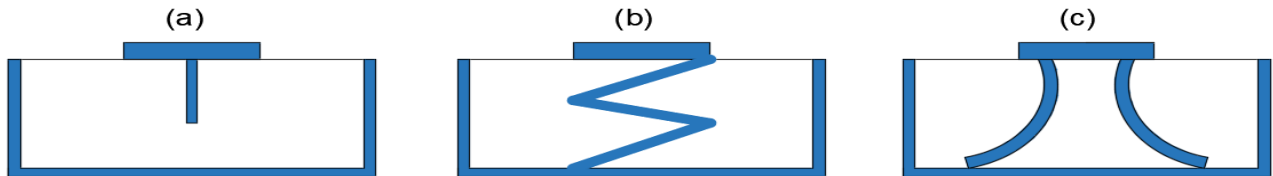
#### **2.3.1 Diseño del espécimen de prueba**

Para establecer la geometría disipadora se sustenta en que la respuesta del material elastómero reconduciendo la presión generada sobre el material (Sevilla, 2020). Se proponen 3 geometrías auxéticas para el estudio, cada geometría se define como un prototipo de probeta de ensayo y estas poseen geometrías diferentes y simples en las cuales las encargadas de recibir el impacto son de filamentos de ácido poliláctico PLA y tienen forma de T (a), M (b) y Pi (c) como se muestran.



### Figura 2.3.

*Bosquejo de las probetas sometidas al ensayo de compresión*

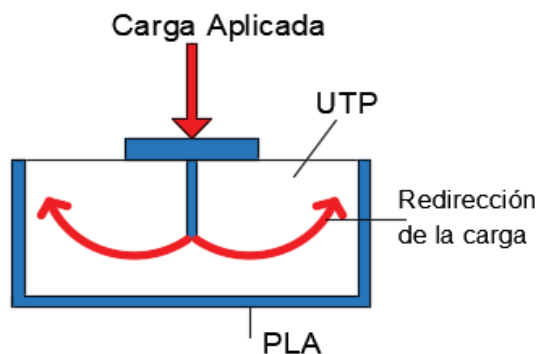


*Nota:* elaboración propia

El comportamiento de los especímenes de prueba se puede explicar cuando el impacto o la carga sobre el material hace que absorba en gran cantidad la energía recibida haciendo que este se comprima en un factor en sus direcciones transversales donde el material blanco UTP un instante después la aplicación la carga hace que se genere una expansión provocando el restablecimiento de las dimensiones originales usando la energía absorbida, se simula el comportamiento en la figura 2.4 mostrada a continuación, el UTP representa el elastómero que hace posible el proceso antes descrito.

### Figura 2.4.

*Respuesta al impacto*

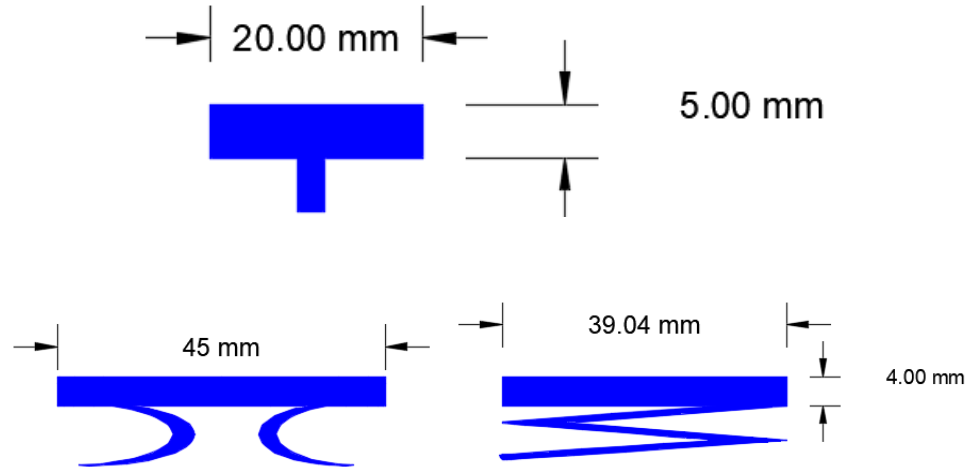


*Nota:* elaboración propia

Las medidas para cada geometría se muestran a continuación:

**Figura 2.5.**

*Dimensiones relevantes de las geometrías auxéticas*



*Nota:* elaboración propia

**Tabla 2.1.**

*Dimensiones de las probetas de cada ensayo*

Característica	Probeta "T"	Probeta "PI"	Probeta "M"	Unidades
Longitud	55,5	55,5	55,5	mm
Ancho	55,5	55,5	55,5	mm
Alto	9	9	9	mm
Área de amortiguamiento	400	2025	1775	mm <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

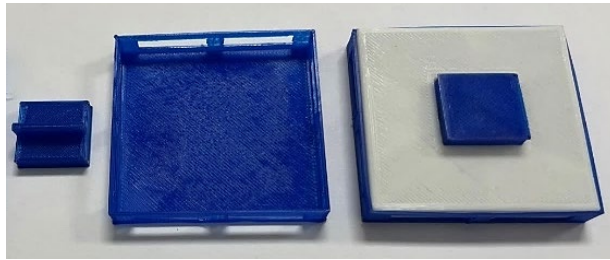
### 2.3.2 Impresión del espécimen

Para la impresión de las probetas se usaron 2 impresoras 3D, la Ender 6 que posee una resolución de capa de 0.1 mm a una velocidad máxima de 180 mm/s y también una Anet ET4 que posee un extrusor de gran calidad que ofrece muy detallados niveles de impresión. El material usado para la fabricación de las geometrías son filamentos PLA (material semirrígido) y TPU (Elastómero más blando), la sinergia de los dos materiales sin necesidad de estar en cohesión presenta propiedades mecánicas de disipación de energía que es lo más cercano a un

comportamiento auxético (Sevilla, 2020), donde la estructura de PLA (azul) recibe el impacto el cual lo transmite al TPU el cual retorna la energía, produciendo el proceso que indica la figura.

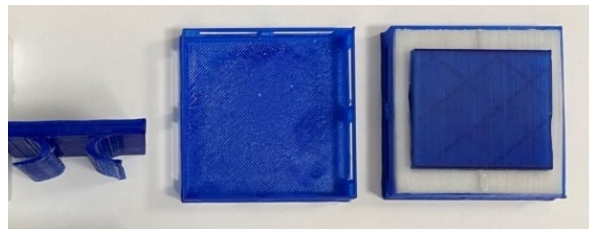
**Figura 2.6.**

*Probeta con perfil de "T"*



**Figura 2.7.**

*Probeta con perfil de "T"*



**Figura 2.8.**

*Probeta con perfil de "T"*



### 2.3.3 Laminado del espécimen

El perfil de material auxético que se seleccione luego de someter al ensayo de compresión a los especímenes, será laminado como GFRP posteriormente, ver figura 2.9.

**Figura 2.9.**

*Proceso de laminado en fibra de vidrio*



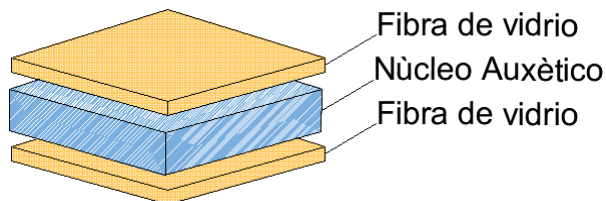
*Nota:* aplicaciones de la resina sobre la fibra de vidrio, tomado de (ARQUIMI, 2020)

El laminado de materiales consiste en sobreponer capa sobre capa de láminas de mismo o diferente material, en la figura 2.10 se puede observar un laminado de PRFV con un núcleo auxético los cuales van a poseer diferentes espesores, las láminas poseen espesores  $t_i$  y también un módulo de elasticidad  $E_i$ , para estimar el módulo total del laminado es suficiente aplicar la siguiente ecuación (Barbero, 1999).

$$E_T = \frac{\sum E_i t_i}{t_i} \quad (1)$$

**Figura 2.10.**

*Representación del laminado de fibra con un núcleo*



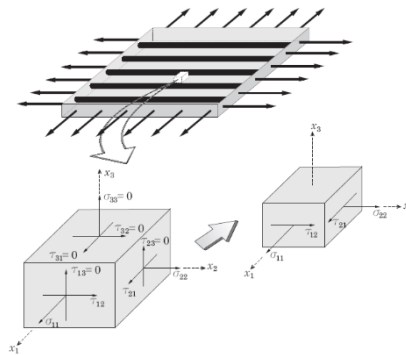
*Fuente:* Elaboración propia

### 2.3.3.1. Ley de Hook generalizada aplicada a laminas

Para un estudio generalizado de las tensiones internas en laminas delgadas implica considerar que cada lamina es un material cuasi - homogéneo y ortótropo, donde las láminas tienen un comportamiento lineal hasta la rotura (Barbero, 1999), en la figura 2.11 se observa la lámina sometida a tensiones.

**Figura 2.11.**

*Respuesta de una lámina de material ortótropo al aplicar una carga*



*Nota:* Obtenido de (Kolkeen & Zadpoor, 2017)

Considerando el Estado Plano de Tensiones EPT donde cada punto está en tensión en el mismo plano, se puede considerar que las deformaciones y tensiones solo están presentes en el plano  $x_1x_2$ , permite reducir el análisis solo a una matriz de tensión – deformación (Tabernero & Varas, 2019).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Donde cada elemento es definido como lo siguiente:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (3)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (5)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (6)$$

Donde Q es conocida como la matriz de rigidez del material compuesto, la misma matriz Q representa propiedades mecánicas del material compuesto.

**Tabla 2.2.**

*Disposición del arreglo del laminado*

5-Capas de fibra de vidrio
Núcleo Auxético
5-Capas de fibra de vidrio

Fuente: elaboración propia

**2.4 Descripción del ensayo de compresión**

El ensayo de compresión se realizará en dos partes. La primera parte es para la caracterización de la configuración de material auxético, donde se tomó la que presentó mejores propiedades mecánicas. Y la segunda, para evaluar el comportamiento de la probeta seleccionada en conjunto con el laminado de GFRP para simular se forma simplificada una corta sección del fondo de una nave de GFRP con núcleo auxético.

**2.5 Diseño del ensayo**

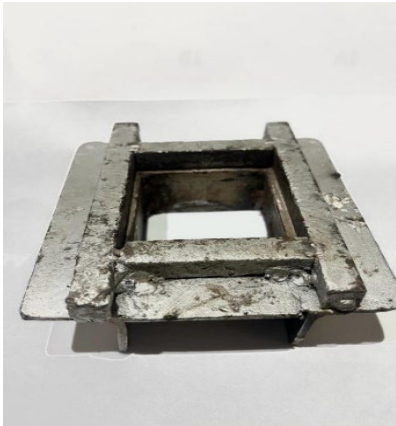
La compresión del ensayo se consideró cuasi estática con el propósito de simular un impacto instantáneo de slamming y poder procesar la curva del ensayo para el cálculo de energía elástica de acuerdo con el nivel de daño de la probeta.

Este ensayo consistió en someter los especímenes a una fuerza de compresión hasta que el material elastómero colapse o desgarre. La probeta fue introducida en marco metálico

para inmovilizarla, esta tenía un bloque de base que poseía una holgura de aproximadamente 1 mm que permitirá sacar la probeta luego de su ensayo como se muestra en Figura 2.12.

**Figura 2.12.**

*(a) Marco metálico diseñado para experimentación (b) Compresión de la probeta auxética*



(a)



(b)

*Nota:* Elaboración propia

## 2.6 Cálculos desarrollados

De acuerdo con la teoría de los materiales de constante de Poisson negativos, durante el ensayo de compresión la carga aplicada sobre la probeta auxética, va a devolver un valor de fuerza.

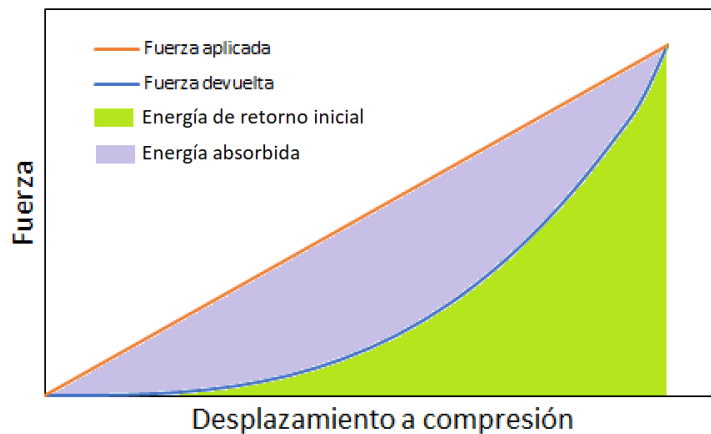
La definición universal de la energía es el trabajo ( $W$ ), en relación directa con el esfuerzo de compresión ( $\sigma$ ) y la variación de la deformación unitaria de aplastamiento ( $\varepsilon$ ), de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

Su comportamiento para el cálculo de las energías de acuerdo con los resultados del ensayo uniaxial de compresión es de acuerdo con la siguiente Ilustración 2.10. El área bajo la curva de fuerza devuelta corresponde a la energía de retorno inicial ideal de la probeta a medida que va sufriendo la deformación, por ello es recta. Pero esta energía cambia por los micro daños que se producen en el material viscoelástico de la capa auxética y por ello su comportamiento no lineal mostrado mediante la curva de fuerza devuelta en color azul claro. Y la energía absorbida que corresponde a la diferencia de áreas bajo las curvas de la fuerza aplicada y la fuerza devuelta mostrado en la figura 2.13.

**Figura 2.13.**

*Forma en la que actual la energía sobre el panel.*



*Nota:* Elaboración propia



De tal forma, que se ha desarrollado una formulación para poder evaluar esta energía con los resultados del ensayo de compresión restringida y establecer diferentes parámetros de comparación.

La energía absorbida ( $E_a$ ), relacionado con el desplazamiento obtenido durante el aplastamiento del equipo ( $\delta$ ), la fuerza dónde se visualiza el límite de compresión con tendencia en la curva ( $L_{límite}$ ) correspondiente a su deformación límite ( $\delta$ ) es la siguiente:

$$E_a = C \int_0^{F_{Límite}} dF \int_0^{\delta_{Límite}} d\delta - \int_0^{\delta_{Límite}} F(\delta) d\delta \quad (6)$$

Dónde (C) es un constante de forma de la fuerza aplicada, siendo para este caso de  $\frac{1}{2}$  por la triangularidad lineal de la curva. La cual para el manejo de datos puede ser procesada. Y se presenta en la siguiente ecuación.

$$E_a = \frac{1}{2} F_{Límite} \delta_{Límite} - \sum_{i=0}^n F_i(\delta) \Delta\delta \quad ; \quad n = \text{frecuencia de datos} \quad (7)$$

Otro factor de comparación importante para evaluar la constante de rigidez de compresión (K), la cual se obtiene de la curva con la siguiente expresión, siendo (A) el área de contacto de la capa auxética del material ABS.

$$K_n = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} \quad ; \quad n = \text{frecuencia de datos} \quad (8)$$

Así mismo resulta importante evaluar la velocidad de deformación del material durante la prueba de acuerdo con el módulo de rigidez a la compresión. Siendo ( $\dot{V}$ ) la velocidad de deformación, la deformación unitaria en el tiempo ( $\dot{\varepsilon}$ ), el esfuerzo en un instante de tiempo ( $\dot{\sigma}$ ) y ( $h_0$ ) la altura inicial de la lámina auxética sin deformación, se calcula con la siguiente expresión.

$$d\dot{V} = d\dot{\varepsilon} h_0 = \frac{d\dot{\sigma}}{K} h_0 = \frac{d\dot{F}}{AK} h_0 \quad (9)$$

De esto se deduce que:

$$d\dot{V} = \frac{dF(\delta)}{A} h_0 \quad (10)$$

Para el manejo de los resultados del ensayo de compresión la ecuación a aplicar es la siguiente.

$$\varepsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \quad (11)$$

$$\dot{V}_n = \frac{d\dot{F}_n}{AK_n} \quad ; \quad n = \text{frecuencia de datos} \quad (12)$$

Además, se espera mostrar la comparación entre la energía absorbida y el número de ensayos a diferentes deformaciones como se explicó anteriormente, con esta representación se puede establecer los rangos de absorción de energía para cada tipo de probeta utilizada.

De esta manera, se escoge la probeta que mayor rigidez presente durante el análisis y se procederá a realizar 5 pruebas de compresión con la mejor probeta laminada con fibra de vidrio siendo el núcleo el material Auxético y otra de fibra de vidrio pura simulando una sección diferencial del bote. Entonces, se podrá verificar el cambio en las propiedades mecánicas en el panel de GFRP.

## Capítulo 3

### **3. Resultados y análisis**

El siguiente capítulo presenta los resultados obtenidos luego de las experimentaciones realizadas para el material auxético diseñado que se pretende incluir en el nuevo diseño y construcción de botes. Se obtuvo 5 resultados por cada probeta con su respectivo perfil y luego del análisis se seleccionó el mejor, posteriormente se procedió a laminar 5 especímenes del material auxético con fibra y también se realizaron 5 láminas de fibra de vidrio para hacer una nueva experimentación y comparar resultados.

#### **3.1 Procedimiento**

La primera parte consiste en calibrar las máquinas para recoger datos de la experimentación y establecer la deformación a comprimir sobre los especímenes de material auxético, con lo que se puede obtener datos de tiempo, fuerza y deformación.

La máquina aplica una carga sobre la cual va incrementando a medida de la resistencia que presente el material, las fuerzas registradas en los archivos del laboratorio es la fuerza que retorna el material y que la máquina es capaz de percibir, pero, la deformación aplicada se establece durante cada ensayo, esto quiere decir que, la máquina deberá deformar la probeta en los valores 9, 9.5, 10, 10.5 y 11 mm lo que significa que la energía aplicada del pistón encargado de comprimir el espécimen será diferente. Al final, los datos obtenidos se selecciona una cantidad de 200 valores para poder graficar los mismos.

## 3.2 Selección del perfil más resistente

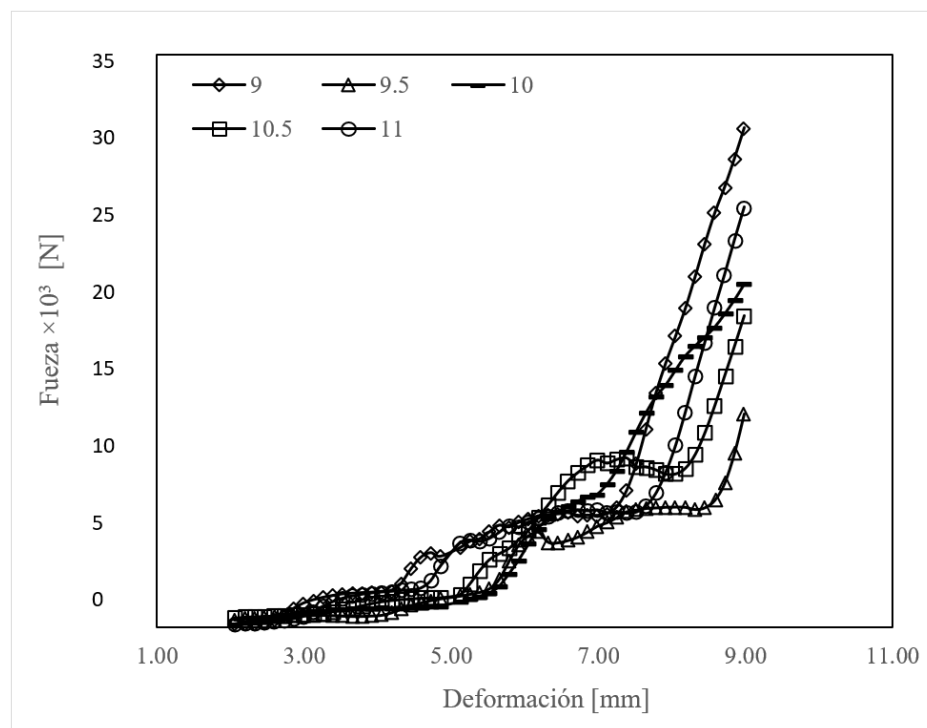
### 3.2.1 Fuerza-Deformación, Resultados y análisis

#### 3.2.1.1 *Espécimen Perfil "T"*

La figura 3.1 muestra el desarrollo de las curvas en relación con la fuerza – deformación para el espécimen de pruebas de perfil en "T", las curvas muestran que su forma cambia gradualmente durante la compresión que la máquina genera sobre la probeta indicando que el material presenta comportamiento irregular mientras incrementa la deformación provocando que la fuerza que marca el programa muestre una irregular curva hasta que después de una deformación de 8 mm todas las curva presentan una tendencia lineal aproximada. Por último, la máxima fuerza que es soportada por el perfil "T" es 30502 N, como muestra el apéndice C.

**Figura 3.1.**

*Resultados de los ensayos en perfil "T"*



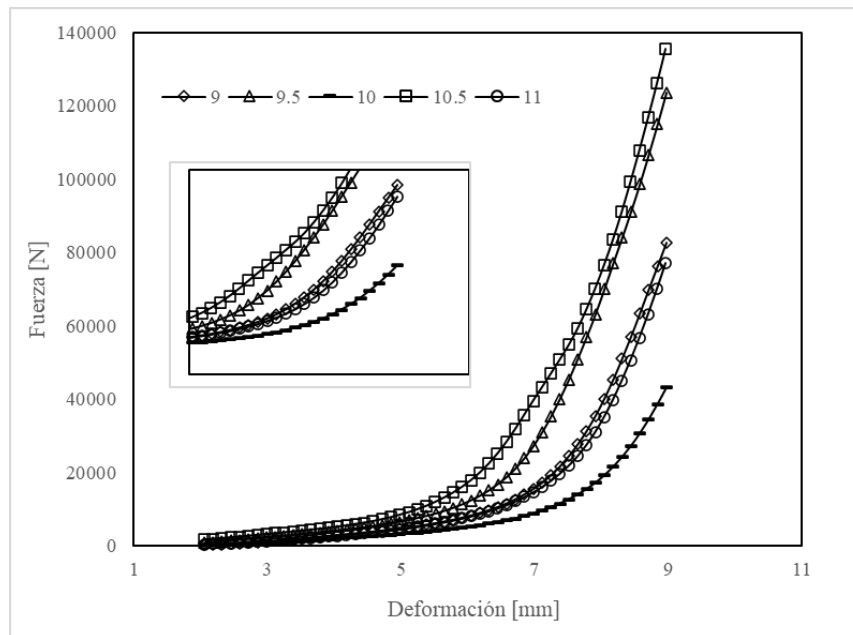
*Fuente:* Elaboración propia

### 3.2.1.2 *Espécimen Perfil "PI"*

La ilustración 3.2 muestra curvas más suaves y bien definidas, se puede prestar atención que este espécimen de perfil en "PI" muestra mejor crecimiento de resistencia al incrementar la deformación lo cual indica que el prototipo esta presentado las características teóricas del material auxético. También, puede notar un comportamiento lineal hasta comprimirse 5.5 mm y luego el material a 10mm de compresión observar que decae la funcionalidad por motivo que le materia empezó a reacomodarse por efecto de su geometría particular y luego incrementa su resistencia de forma exponencial mostrando que al comprimirse hasta 10.5 mm presenta una alta resistencia para después en el siguiente ensayo a comprimir y 11 mm observar que fallar al final ya que llego a su límite en soportar lo posible la compresión que se le está generando. Por último, este perfil en "PI" muestra una máxima resistencia de 135656,8 N, mostrado en el apéndice D.

**Figura 3.2.**

*Resultados de los ensayos en perfil "PI"*



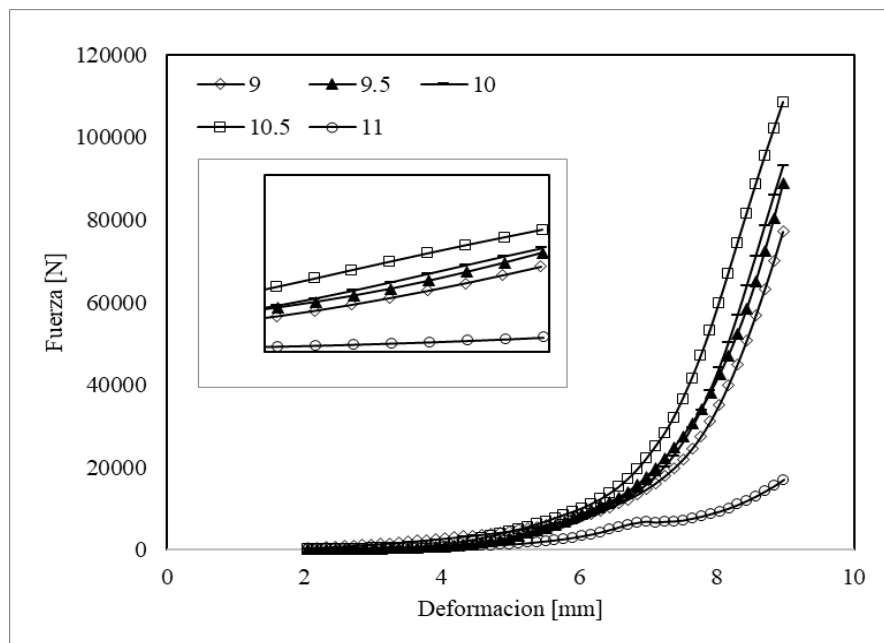
*Fuente:* Elaboración propia

### 3.2.1.3 *Espécimen Perfil “M”*

La Figura 3.3 representa la curva fuerza – deformación de las pruebas de un perfil “M”, la cual muestra que la se mantiene lineal hasta casi 4.5 mm de comprimirse y luego cambia a incrementarse más la fuerza. Seguido, el mejor comportamiento de su resistencia se muestra hasta 10.5 mm de deformación para luego decaer cuando se prueba a 11mm de compresión motivo que el material deja de resistir, sin embargo, el factor de resistencia que incrementa el material con el perfil en “M” es más estable pues las curvas mostradas incrementan mucho mejor y de forma directa con el aumento de compresión sobre el prototipo que los perfiles antes analizados, además su máxima resistencia es de 108458,8 N. Por lo tanto, el perfil que tiene geometría con función más amortiguadora presenta mejores respuestas mecánicas que los anteriores, se puede verificar en el apéndice E en las tablas E de la 1 a la 5.

**Figura 3.3.**

*Resultados de los ensayos en perfil “M”*



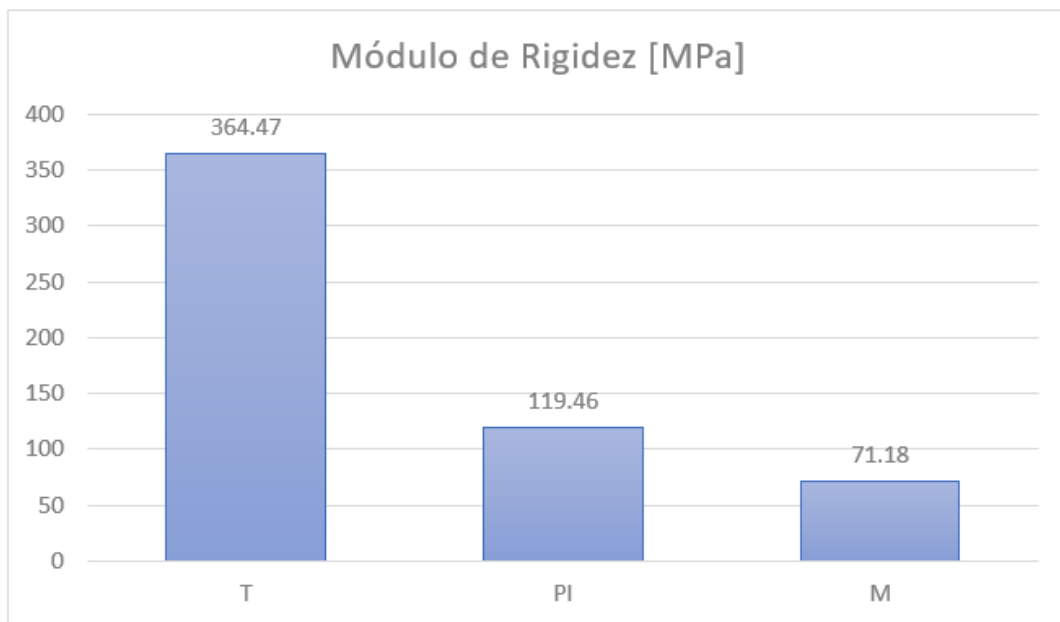
*Fuente:* Elaboración propia

### 3.2.2 Módulo de rigidez, Resultados y análisis

Se presenta la Figura 3.4 muestra para el análisis para el módulo de rigidez del material donde se muestran lo que muestra que los perfiles “T” y “PI” tienden a ser 36,45 y 11,94 MPa lo que los hace muy elásticos durante la compresión realizando la expansión del material se genere sin problemas, mientras que el perfil “M” presenta una valor máximo de 7,12 MPa y menor expansión del material en sus direcciones transversales mientras se aplica la carga que es capaz de soportar durante la compresión, esta respuesta mecánica indica que se resiste a expandirse hasta que se produzca una falla lo que hace que el material emule muy bien las características teóricas de una material auxético lo que hace que el diseño del espécimen de perfil “M” sea el más prometedor.

**Figura 3.4.**

*Comparación del módulo K de cada probeta*



*Fuente:* Elaboración propia



### 3.2.3 Energía absorbida, Resultados y análisis

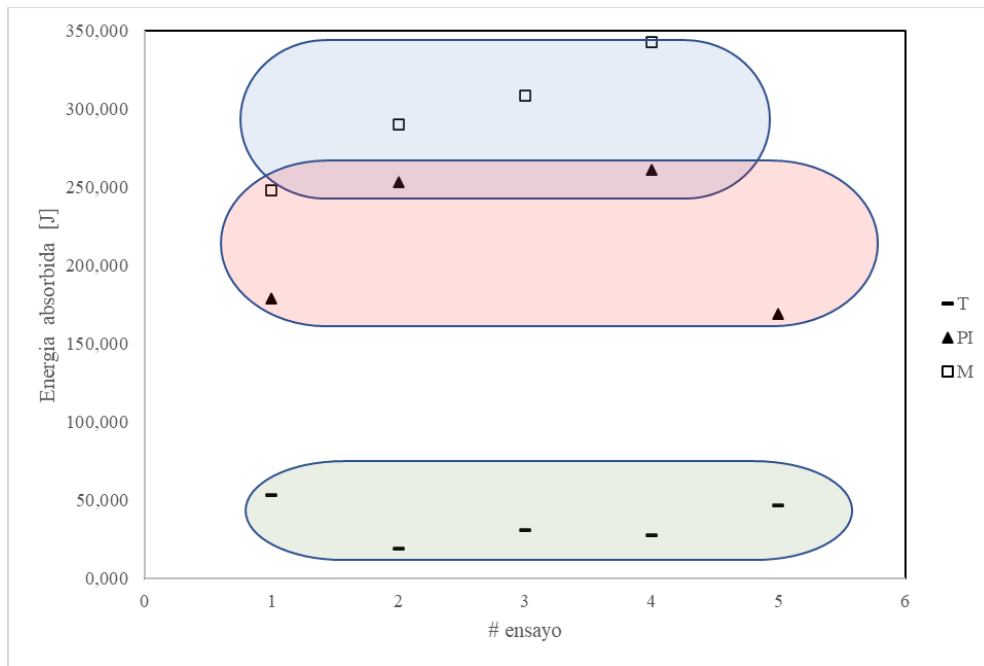
En la Figura 3.5 se indican los rangos de energía mínimos y máximos absorbidos por cada espécimen y perfil en sus respectivos ensayos de 9 , 9.5 , 10, 10.5 y 11mm de deformación se muestra que los perfiles “T” poseen rangos muy bajos entre 25 – 50 J con irregulares comportamientos y el perfil “PI” tiene un incremento, pero cuando se deforma con velocidad de 10mm/min se muestra que el perfil tiene un comportamiento menos eficiente y luego comienza a decaer su rendimiento mientras se aumenta la velocidad de compresión del ensayo lo que limita su rango de absorción de energía dentro de 100 – 255 J.

Los resultados de los especímenes con perfil “M” muestran un incremento con tendencia lineal mientras se aumenta la velocidad de deformación donde dentro de las experimentaciones se muestra un rango acotado que limite la absorción de energía de 250 – 350 J, por lo que se asegura que muestra mejor rendimiento al incremento de velocidad de deformación además su comportamiento es posible modelarlo de forma matemática con una función lineal que aproxima bastante sus puntos demostrando mejores características que los otros diseños.

Por lo tanto, luego de los análisis realizados se escoge el perfil “M” como el mejor diseño que modela las características teóricas de un material auxético haciendo posible imitarlas en base a polímeros usando UTP y PLA como base con la correcta geometría amortiguadora para cargas aplicadas, seguido, la última parte será laminar con base de resina y fibra de vidrio para el análisis de comparación en el incremento de rigidez del panel de fibra.

**Figura 3.5.**

*Rango de energía absorbida por ensayo*



*Fuente:* Elaboración propia

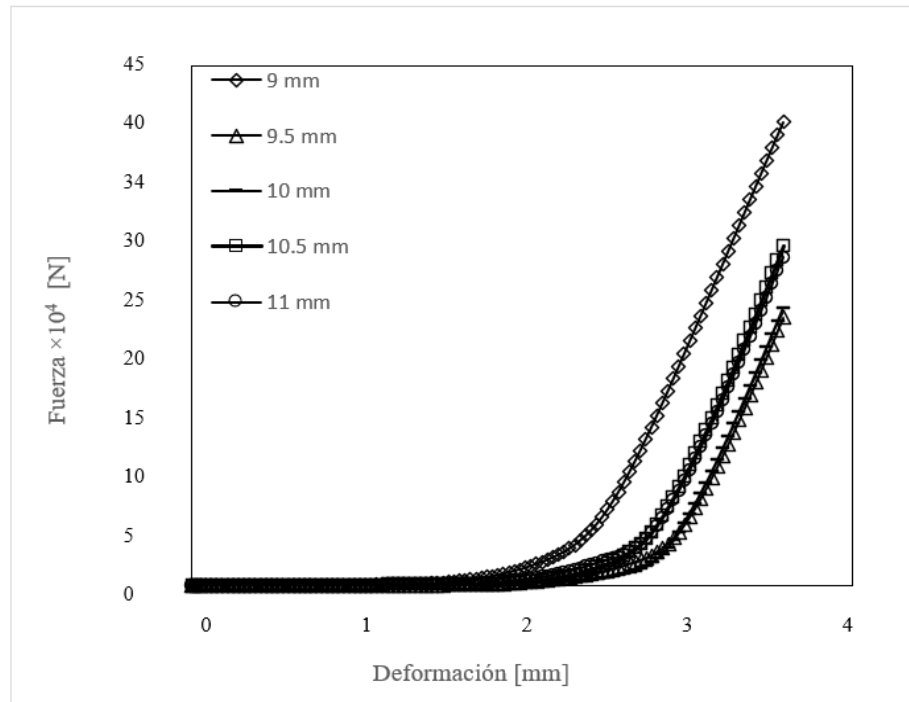
### 3.3 Laminado en fibra de vidrio

#### 3.3.1 Ensayos Fibra de vidrio, Resultados y análisis

En la Figura 3.6 se presenta las curvas de fuerza-deformación para el material compuesto de solo fibra de vidrio, se puede observar que para el caso de la fibra pura el material falla a una compresión de 10.5 mm.

**Figura 3.6.**

*Fuerza deformación para las probetas de solo fibra*



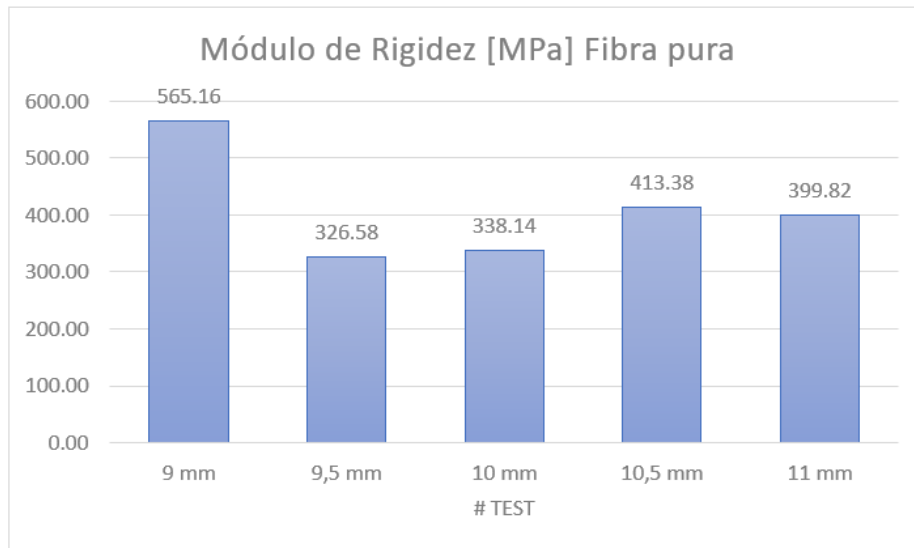
*Fuente:* Elaboración propia

La energía que puede absorber un laminado de fibra pura está dentro del rango de 318,26 J – 458,20 J dentro de margen que el equipo de laboratorio puede registrar y se aprecia la falla dentro de dicho rango de fuerza esto puede ser verificado en las tablas del apéndice F de la 1 a la 5.

Puede observar que las proporciones de parámetros de módulo de rigidez y energía absorbida en las siguientes ilustraciones poseen un parecido en la forma de graficar, lo indica que son directamente proporcionales o cual es un comportamiento normal para polímeros convencionales sin estructura particular.

**Figura 3.7.**

*Módulo de rigidez de la fibra pura*

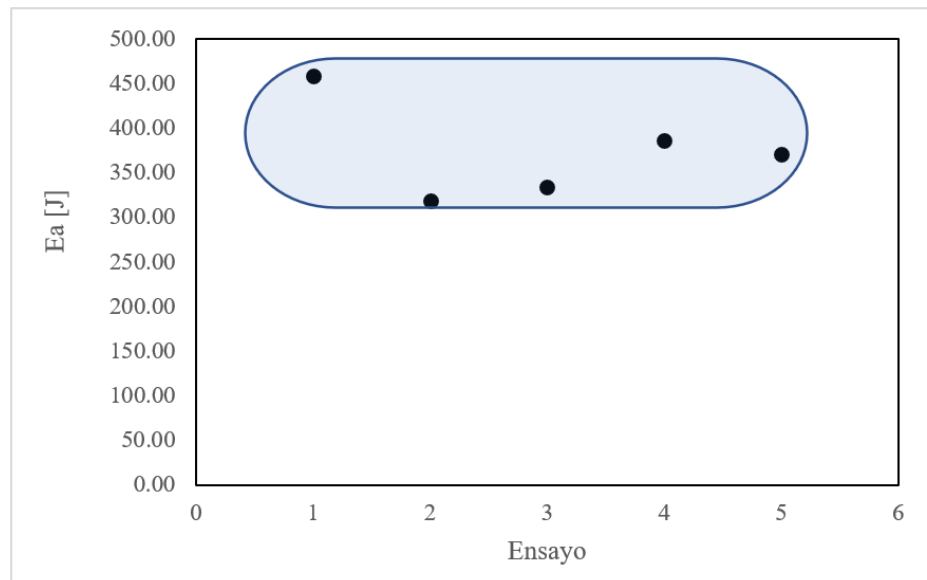


*Fuente:* Elaboración propia

A continuación, se muestra la capacidad de absorción de energía con las que contaban las probetas de solamente fibra de vidrio, esto se obtiene sumando la energía diferencia de cada dato proporcionado en la recolección de resultados por la computadora.

**Figura 3.8.**

*Módulo de rigidez de la fibra pura*



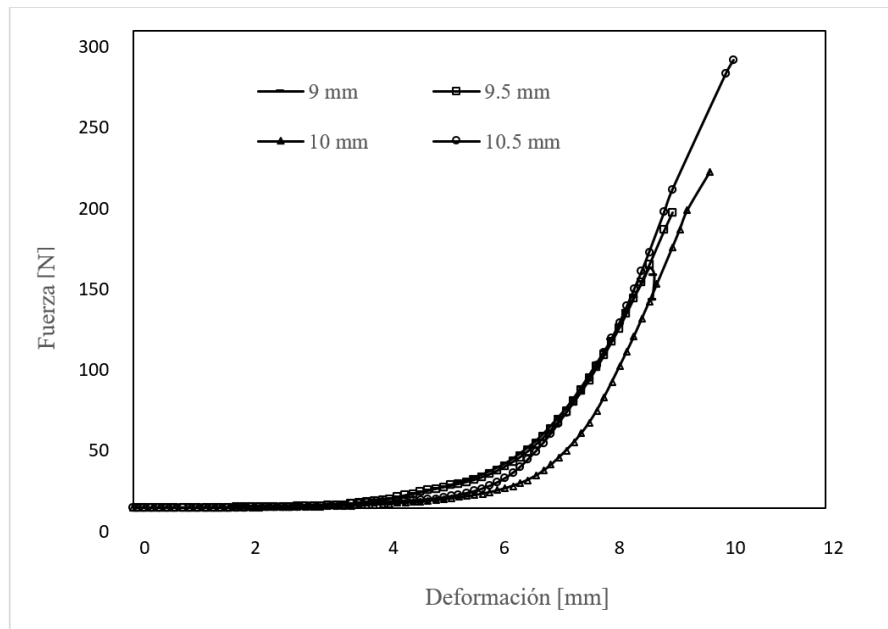
*Fuente:* Elaboración propia

### **3.3.2 Ensayos Fibra + Auxético, Resultados y análisis**

La Figura 3.9 presenta las curvas de fuerza-deformación para el material compuesto Fibra de vidrio + Auxético, indica que mientras se aumenta la deformación final, en el laminado compuesto es necesario aplicar más fuerza para poder comprimirlo hasta la deformación esperada por cada ensayo.

**Figura 3.9.**

*Fuerza- Deformación para las probetas de fibra-auxético*



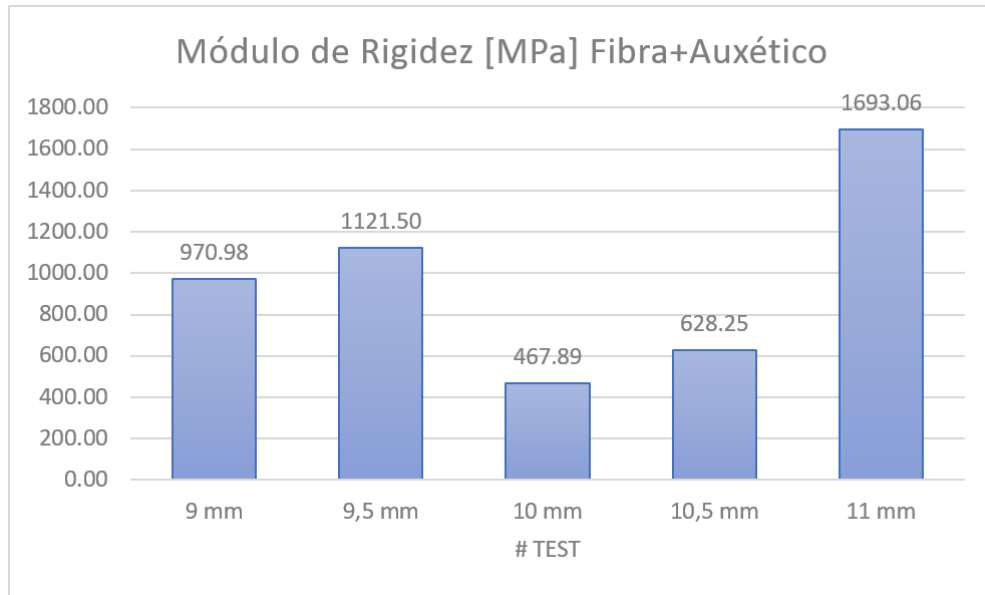
*Nota:* Elaboración propia

Analizando la diferencia entre las curvas de solo fibra y el laminado compuesto, se puede resaltar que la compresión necesaria para llegar a la falla del laminado compuesto es mayor que solo si se tiene fibra de vidrio ya que se aprecia la falla de la fibra pura a 4mm de compresión por efecto de la poca flexibilidad, sin embargo, el laminado compuesto presenta resultados de falla cuando está cerca de los 9.5 mm de compresión con una fuerza de 281,54 kN por incluir el Auxético que es el núcleo del laminado.

Considerando que la fuerza donde se produce la falla se reduce, pero se compensa por el aumento de compresión necesaria para la falla del elemento pues mejora la flexibilidad del material permitiéndose que el elemento analizado mejore sus propiedades mecánicas entrando en lo descrito por la teoría de la mecánica de laminados al combinar y formar materiales compuestos.

**Figura 3.10.**

*Módulo de Rigidez para las probetas fibra-auxético*



*Nota:* Elaboración propia

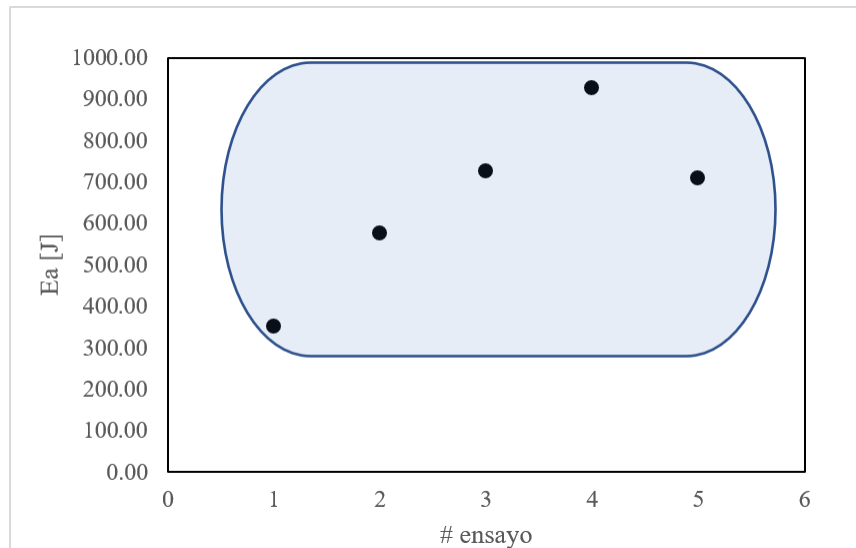
El análisis del módulo de rigidez del laminado compuesto entre fibra + auxético muestra resultados donde el laminado adopta el comportamiento mecánico del núcleo material auxético que fue descrito en la sección 3.2.3 concluyendo que se da el mejoramiento de la rigidez del elemento analizado hasta que no soporta la compresión y comienza a expandirse el material después de 10,5 mm de compresión perdiendo la capacidad de absorber más energía y permitiendo que se expanda el material como muestra la figura 3.10, puede verse en el apéndice G detalles de los cálculos.

Se puede observar que durante el incremento de compresión sobre el elemento, la capacidad de energía como muestra la Figura 3.11 de cada ensayo con diferencia de incrementos de compresión iguales muestra valores de 350,97 J; 576,08 J; 725,03 J; 927,36 J y 708,12 J con una tendencia de aproximación lineal de los valores como se muestra en la

ilustración 3.11 salvo el último, cabe recalcar que esto se da para el diseño de material con geometría de perfil “M”, lo que no es aplicable para otro tipo de perfil sin un estudio previo.

**Figura 3.11.**

*Energía absorbida por cada ensayo de las probetas fibra-auxético*



*Nota:* Elaboración propia

Nótese que la energía que absorbe el material después de comprimir el elemento 10,5 mm comienza a decaer, debido que el material ya presenta falla y entra no le permite almacenar más energía pues se empieza a expandir por el exceso de fuerza aplicada notando que la máxima compresión admisible podría establecerse en 10,5 mm para tener un buen desempeño del laminado frente a cargas aplicada o impactos.

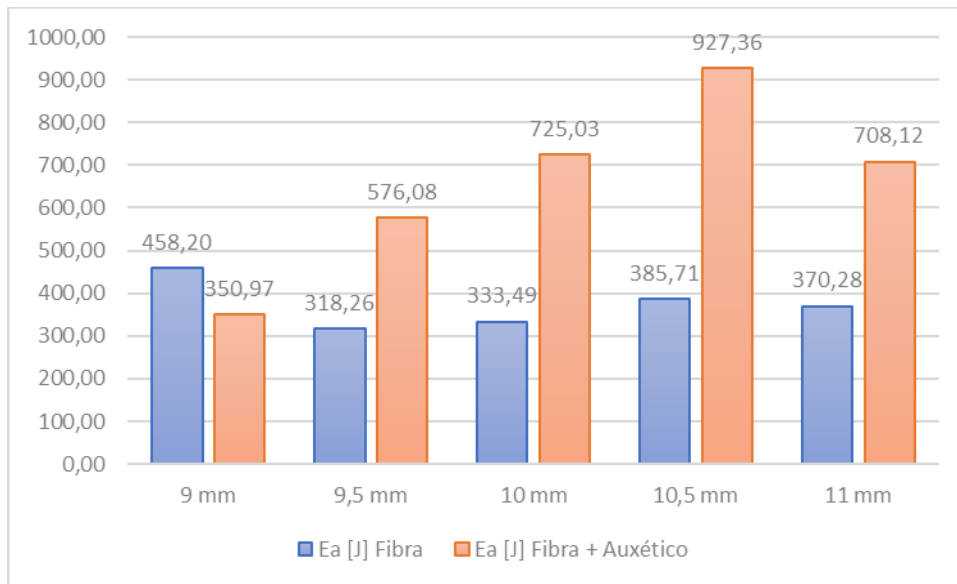
### 3.3.3 Comparación entre laminados

Se puede notar la diferencia que se produce en el laminado durante la absorción de energía en la figura 3.12 en un elemento solo con fibra y otro con el conjunto fibra-auxético.



**Figura 3.12.**

*Energía absorbida por cada ensayo de las probetas de fibra pura y fibra-auxético*



*Nota:* Elaboración propia

El análisis de la comparación de la energía absorbida entre un elemento de fibra pura (Azul) y el laminado compuesto de fibra + auxético (Naranja) muestra el incremento de 0,5 mm por cada prueba desde 9 mm – 11 mm se presenta una diferencia de energía de 31%, 45%, 54%, 58%, 48% por cada ensayo realizado, con ello se puede aseverar que es posible incluir este material dentro del laminado y se puede obtener mejoras en la estructura sección de una lancha durante el impacto con la superficie del agua evitando su falla repentina en la sección de impacto.

Puede Observarse adicional que la capa de fibra que se daña solo es la que esta en contacto con la carga, la cara posterior al núcleo de material Auxético esta casi intacta como puede observarse en el Apéndice H.

## Capítulo 4

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

La continua construcción de lanchas menores de fibra de vidrio para el sector pesquero artesanal y los comunes daños que se producen por los golpes de slamming durante su navegación, hace que el estudio de nuevas configuraciones de materiales que ayuden para el amortiguamiento de estos golpes en conjunto con el laminado de PRFV sea esencial.

Durante el desarrollo de este trabajo se sometió diferentes configuraciones de material auxético para evaluar su comportamiento bajo ensayos de compresión uniaxial a diferentes desplazamientos para cada prueba. Estos resultados permitieron definir cuál de las geometrías fue capaz de absorber la mayor cantidad de energía, simulada como una fuerza instantánea de compresión.

De forma posterior se analizó el conjunto fibra + auxético para evaluar el comportamiento de la inserción de una lámina auxética dentro del laminado de fibra de vidrio y poder definir su rango de absorción de energía en comparación con el que tiene una probeta convencional de solo fibra de vidrio.

Al final, se analizó lo que ocurrirá con un elemento de cuaderna de la sección de una lancha en base a las deformaciones que permitirá el laminado final cuando se aplique una carga y como como influirá entre las capas de fibra antes y después del núcleo auxético.

### **4.1 Conclusiones**

- La teoría de las propiedades mecánicas de un material auxético fue mejor representada por el perfil de geometría “M” el cual fue capaz emular mejor el comportamiento mecánico de un material auxético en base al bajo módulo de rigidez y la relación de la capacidad de absorber mayor cantidad de energía durante la compresión hasta 250 J con máximo de 10.5 mm de compresión antes

de forzar que ceda a su comportamiento plástico. Por lo tanto, una geometría con característica amortiguadora como el perfil "M" y proporciones correctas de material PLA y TPU son capaces de imitar las propiedades mecánicas de un material auxético.

- Los resultados del comportamiento mecánico de las diferentes geometrías mostraron que el módulo de rigidez cambia a negativo, esto es debido a que el material durante la compresión no se expande mostrando resistencia y durante esto se almacena hasta un 58% más de energía hasta que deja de resistir la compresión donde se mostró claramente su límite elástico, por lo que empieza a expandirse hacia las direcciones transversales; esto nos permite concluir que efectivamente el material diseñado simular el comportamiento auxético hasta un grado de compresión de 10.5 milímetros asegurando un buen desempeño para el laminado.
- Los resultados de la investigación durante la comparación visual y analítica de las láminas de fibra de vidrio pura y el laminado compuesto entre fibra + auxético; se observó que la fibra en contacto directo con la fuente que la comprime se ajusta a la respuesta mecánica del auxético permitiendo un alto grado de rigidez antes que las fibras comiencen a deslizarse entre capas y empiece a destruirse el laminado, mientras la capa posterior al auxético está intacta. Por lo tanto, la aplicación de este núcleo auxético entre capas en una sección de cuaderna de una lancha de fibra de vidrio evitará que las deformaciones por efecto de impacto durante el slamming sean graves y comprometan la estructura de la embarcación.
- Para el mantenimiento y construcción de las embarcaciones artesanales de fibra de vidrio a lo largo de la costa ecuatoriana; al incluir un núcleo de material auxético en laminado de fibra en la zona de 1/3 de proa en el panel del fondo de las embarcaciones, se mejorará la resistencia del hasta en un 50% mínimo,

permitiendo que solo se vea afectada la capa externa de fibra y dejando en buenas condiciones la capa posterior al núcleo de auxético. Por lo tanto, es recomendable el uso del material auxético en mantenimiento y construcción de embarcaciones de fibra de vidrio debido al mejoramiento en la matriz de rigidez del laminado con fibra de vidrio.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Expandir la investigación a geometrías más complejas, se observó que la geometría en “M” presento mejores resultados y bastantes características de material auxético en comparación al resto propuesto como perfiles de geometrías “T” y “PI” en un principio, pero esta geometría propuesta en el trabajo de investigación es sencilla, si se realiza un estudio sobre una geometría más compleja es posible obtener mejores resultados con menos inversión de material.
- Realizar otras clases de ensayos, que permitan simular mejor el impacto o fenómeno de slamming para medir la energía absorbida y observar el daño sobre la capa directa de impacto de la fibra de vidrio y la capa posterior para determinar mejor el daño que puede producirse y hasta que grado de resistencia mejora la estructura.
- Realizar un modelado en ANSYS que permita adaptar la caracterización de los parámetros de investigación y puedan ser usados para un diseño más detallado y un mejoramiento de las embarcaciones que sean propensas a sufrir daños en la estructura de fibra de vidrio por el efecto de slamming.

## **Bibliografía**

- Abrate, S. (2011). Hull Slamming . *Applied Mechanics Reviews*.
- Alvarez, D. (2017). *Aplicaciones de las propiedades auxéticas en la arquitectura*. Escuela Técnica Superior de Madrid , Madrid.
- Álvarez, M. D. (2017). *Aplicaciones de las Propiedades Auxéticas en la Arquitectura, Tesis doctoral*. Madrid.
- ARQUIMI. (2020). *La fibra de vidrio, sus tipos y aplicaciones* . Retrieved from <https://www.arquimi.com/blog/p20304-fibra-de-vidrio.html>
- Askelad, D. R. (2016). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. United States Of American: Cengage Learning.
- Barbero, E. J. (1999). *Introducción a materiales compuestos*. New York, NY.
- Cedeño, G. (2011). *Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca* . Retrieved from [http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/dircient/2013/marzo/directrices\\_pesca\\_peq\\_escala/present/pesca\\_pe\\_ecuador\\_2013.pdf](http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/dircient/2013/marzo/directrices_pesca_peq_escala/present/pesca_pe_ecuador_2013.pdf)
- Dietrich, A. B. (2005). *Materiales compuestos - Proceso de fabricacion de embarcaciones*. Barcelona, España.
- Evans, K. (1991). Auxetic Polymers: a new range of materials . *Endeavour*, 170.
- Kolkeen, E., & Zadpoor, A. (2017). Auxetic Mechanical Metamaterials. *Royal Society of Chemistry Advances*. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2017/ra/c6ra27333e>
- Kumar, M., & Kumar, M. (2015). Analysis of Metamaterials –for its Different Properties And Areas of Applications. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2. Retrieved from <https://www.ijert.org/research/analysis-of-metamaterials-for-its-different-properties-and-areas-of-applications-IJERTV4IS030085.pdf>
- Liu, Y., & Hu, H. (2010). A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 1053-1055.
- Palo, C. (2020). *Dinámica de las placas con amortiguamiento viscoelástico no local*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

- Prawoto, Y. (2012). Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational Material Science*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702561200078X?via%3Dihub>
- Reyes, J. (2018). Estudio Técnico Para Industrializar Lanchas De Fibra De Vidrio En El Taller "Zambrano Océano De Fibra" Ubicado en la parroquia de Anconcito, Provincia de Santa Elena . La Libertad - Ecuador.
- Sevilla, A. (2020). *Diseño, fabricación y caracterización de una capa disipadora de impactos para laminado de fibra de vidrio*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- SHIMADZU. (2023). *Shimadzu Analytical and Measuring instruments*. Retrieved from [https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim\\_document\\_file/brochures/10435/c10g-e050.pdf](https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10435/c10g-e050.pdf)
- Sierra, A. (2017). Diseño, construcción y caracterización de un material auxético. In A. Sierra, *Diseño, construcción y caracterización de un material auxético* (p. 13). Madrid, España.
- Taberero, A., & Varas, D. (2019). *Estudio de estructuras auxéticas sometidas a impacto. Tesis de grado de ingeniería mecánica*. Madrid. Retrieved from <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29608>
- Townsend, P. (2018). Comportamiento a impacto de materiales compuestos sometidos a fenómenos de slamming en embarcaciones de alta velocidad. Tesis. In P. Townsend. Universidad Politécnica de Madrid.
- Walser, R. (2001). Electromagnetic metamaterials. *SPIE 4467 Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics*.

## **Apéndices**



**APÉNDICE A**  
**PROBETAS DE MATERIAL AUXÉTICO LISTAS PARA PRUEBA**

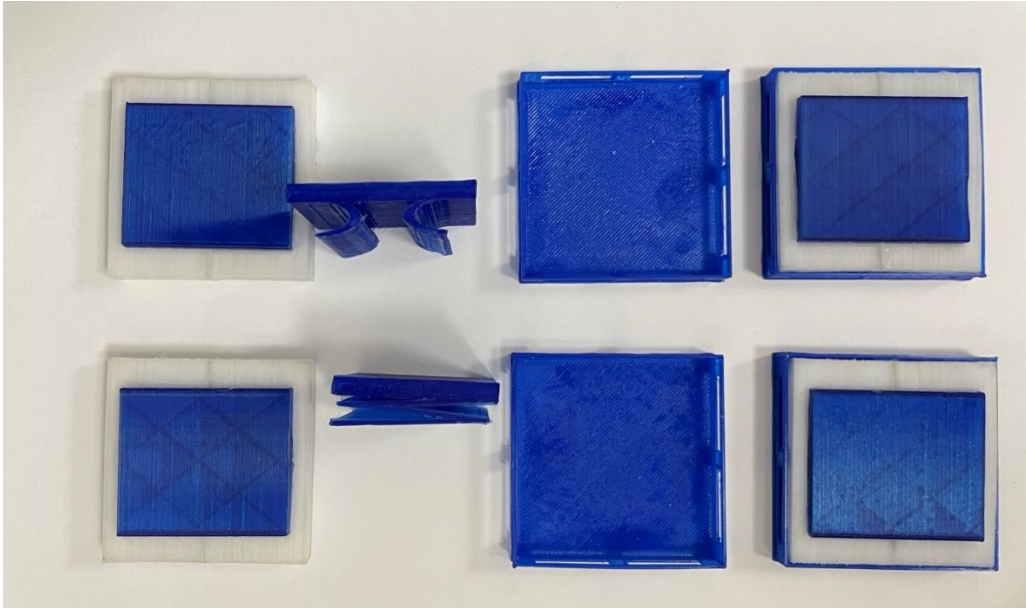


Figura A.1 Probetas impresas para el ensayo, perfil PI y M

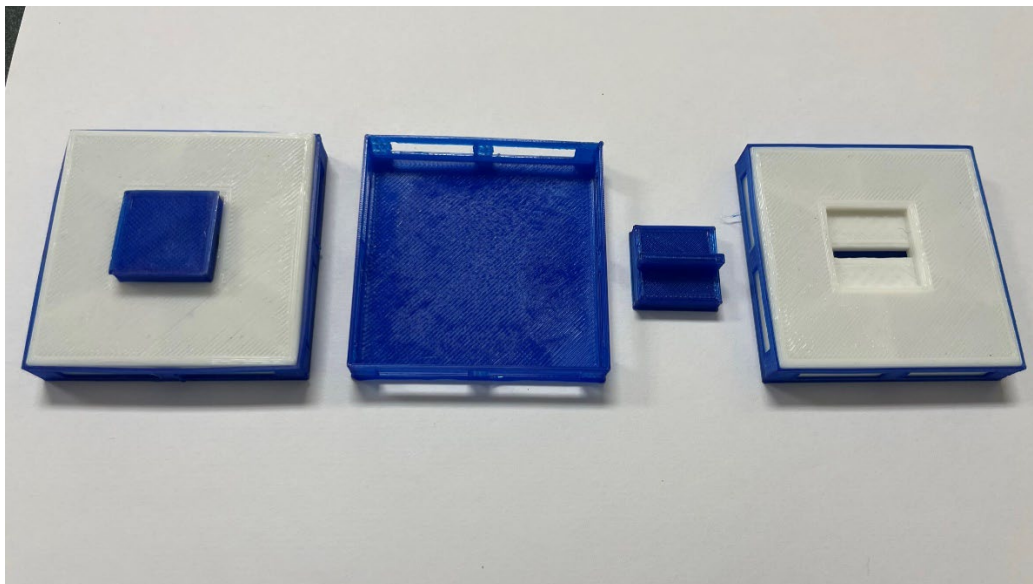


Figura A.2 Probetas impresas para el ensayo, perfil T

**APÉNDICE B**  
**VISTA MICROSCOPICA DEL MATERIAL POLIMÉRICO x150**



Figura B.1 Acercamiento del material PLA

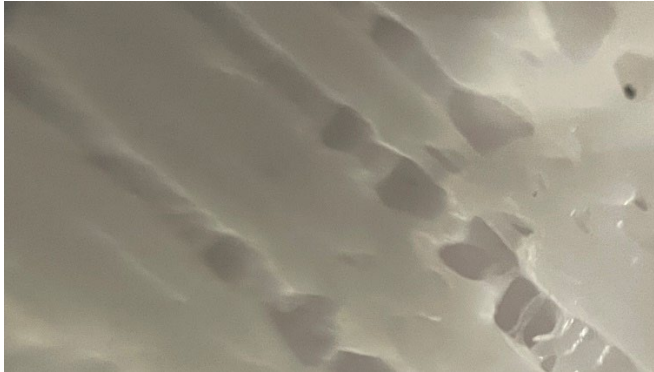


Figura B.2 Acercamiento del material PLA

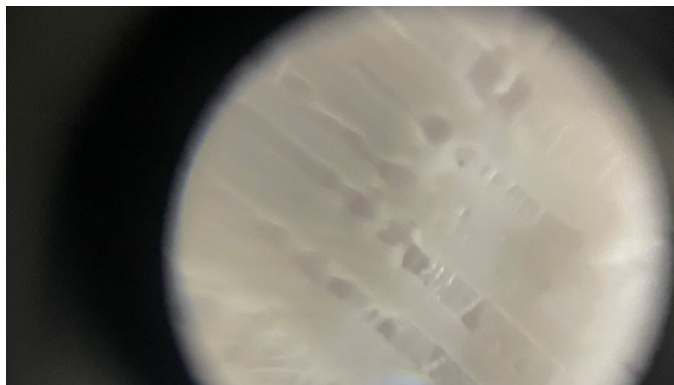


Figura B.3 Acercamiento del material PLA

**APÉNDICE C**  
**PROBETA 1 - LUEGO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN**

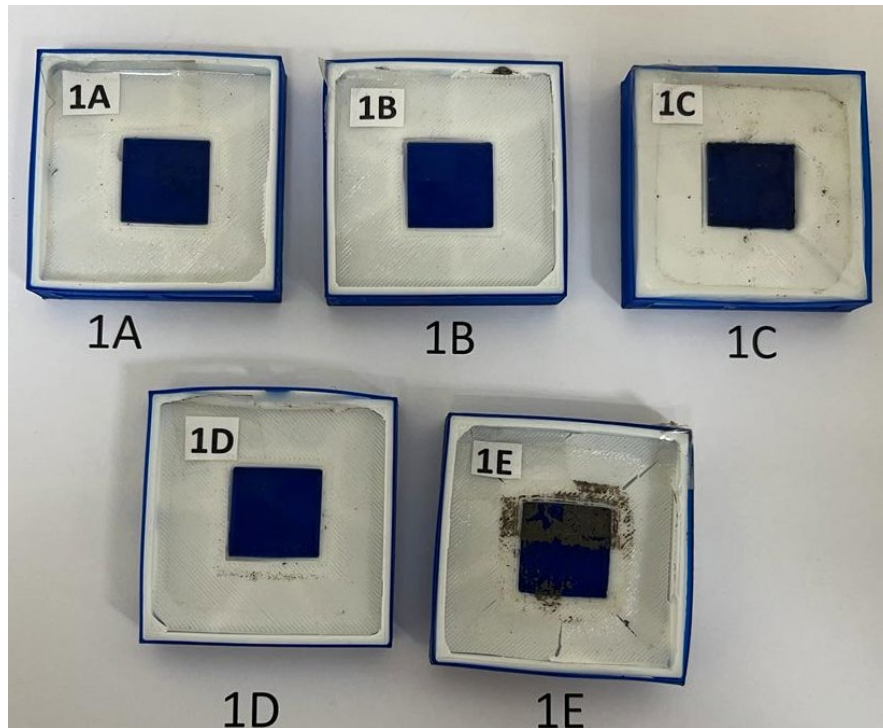


Figura C.1 Vista frontal de las probetas en T luego del ensayo de compresión

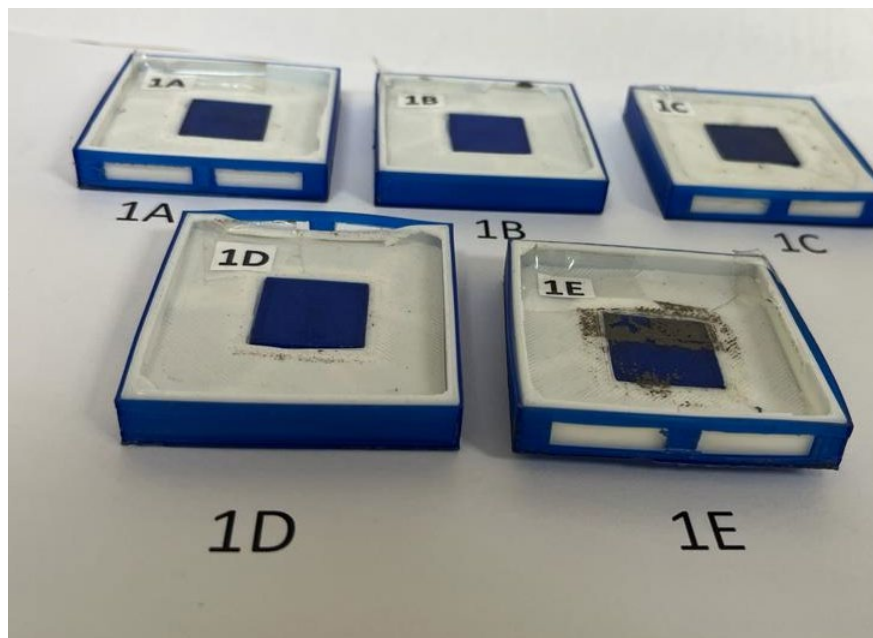


Figura C.2 Vista lateral de las probetas en T luego del ensayo de compresión

## PROBETA 1 - RESULTADOS NUMÉRICOS DURANTE ENSAYOS

**Tabla C.1 Resultado para ensayo de 9mm**

9 mm						
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	ε [mm/mm]	K [Pa]	V [m/s]
2,05	0,00205	178,73		0,589	7,58E+05	1,44E-01
2,19	0,00219	198,52	0,025	0,563	8,82E+05	1,38E-01
2,32	0,00232	231,03	0,029	0,536	1,08E+06	1,26E-01
2,72	0,00272	741,32	0,079	0,456	4,06E+06	4,59E-02
2,85	0,00285	1119,77	0,124	0,429	6,52E+06	3,18E-02
2,99	0,00299	1447,20	0,171	0,403	8,98E+06	2,58E-02
3,12	0,00312	1653,43	0,207	0,376	1,10E+07	2,36E-02
3,25	0,00325	1802,68	0,230	0,349	1,29E+07	2,26E-02
3,39	0,00339	1922,13	0,248	0,323	1,49E+07	2,20E-02
3,52	0,00352	2014,64	0,263	0,296	1,70E+07	2,18E-02
3,65	0,00365	2059,86	0,272	0,269	1,91E+07	2,22E-02
3,79	0,00379	2093,95	0,276	0,243	2,16E+07	2,26E-02
3,92	0,00392	2123,67	0,281	0,216	2,46E+07	2,31E-02
4,05	0,00405	2171,68	0,286	0,190	2,86E+07	2,33E-02
4,19	0,00419	2235,73	0,293	0,163	3,43E+07	2,34E-02
4,32	0,00432	2659,32	0,325	0,136	4,88E+07	2,03E-02
4,45	0,00445	3542,34	0,412	0,110	8,07E+07	1,57E-02
4,58	0,00458	4249,73	0,520	0,083	1,28E+08	1,35E-02
4,72	0,00472	4537,19	0,587	0,056	2,01E+08	1,30E-02
4,85	0,00485	4315,30	0,592	0,030	3,64E+08	1,41E-02
5,12	0,00512	4842,52	1,219	-0,024	-5,12E+08	1,32E-02
5,25	0,00525	5225,34	0,670	-0,050	-2,60E+08	1,26E-02
5,65	0,00565	6217,40	0,801	-0,130	-1,19E+08	1,14E-02
5,78	0,00578	6111,94	0,823	-0,157	-9,74E+07	1,18E-02
5,92	0,00592	6387,47	0,834	-0,184	-8,70E+07	1,16E-02
6,05	0,00605	6603,48	0,865	-0,210	-7,85E+07	1,15E-02
6,18	0,00618	6794,21	0,891	-0,237	-7,17E+07	1,14E-02
6,32	0,00632	6860,26	0,911	-0,264	-6,51E+07	1,15E-02
6,45	0,00645	6918,83	0,917	-0,290	-5,96E+07	1,17E-02
6,58	0,00658	6980,50	0,926	-0,317	-5,51E+07	1,18E-02
6,72	0,00672	6821,55	0,921	-0,344	-4,96E+07	1,23E-02
6,85	0,00685	6835,22	0,910	-0,370	-4,62E+07	1,25E-02
6,98	0,00698	6817,18	0,910	-0,397	-4,29E+07	1,28E-02
7,12	0,00712	6922,25	0,914	-0,423	-4,09E+07	1,29E-02
7,25	0,00725	7341,54	0,947	-0,450	-4,08E+07	1,23E-02
7,38	0,00738	8337,66	1,042	-0,477	-4,37E+07	1,11E-02
7,52	0,00752	9982,27	1,216	-0,503	-4,96E+07	9,41E-03
7,65	0,00765	12135,03	1,469	-0,530	-5,73E+07	7,88E-03
7,78	0,00778	14298,20	1,761	-0,556	-6,43E+07	6,80E-03
7,92	0,00792	16133,71	2,031	-0,583	-6,92E+07	6,13E-03
8,05	0,00805	17773,87	2,261	-0,610	-7,29E+07	5,66E-03
8,18	0,00818	19477,13	2,482	-0,636	-7,65E+07	5,25E-03
8,31	0,00831	21416,74	2,719	-0,663	-8,08E+07	4,85E-03
8,71	0,00871	26879,47	3,477	-0,743	-9,05E+07	4,05E-03
8,85	0,00885	28627,24	3,698	-0,770	-9,30E+07	3,86E-03
8,98	0,00898	30502,00	3,939	-0,796	-9,58E+07	3,68E-03

**Tabla C.2 Resultado para ensayo de 9.5 mm**

9.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,05	0,00205	461,74		1,96E+06	5,56E-02
2,19	0,00219	521,10	0,0655	2,32E+06	5,25E-02
2,32	0,00232	552,57	0,0715	2,58E+06	5,25E-02
2,72	0,00272	666,70	0,0863	3,65E+06	5,10E-02
2,85	0,00285	692,13	0,0906	4,03E+06	5,15E-02
2,99	0,00299	710,01	0,0934	4,41E+06	5,26E-02
3,12	0,00312	739,89	0,0965	4,92E+06	5,27E-02
3,25	0,00325	753,80	0,0995	5,39E+06	5,39E-02
3,39	0,00339	733,85	0,0993	5,68E+06	5,77E-02
3,52	0,00352	713,11	0,0963	6,02E+06	6,17E-02
3,65	0,00365	682,20	0,0930	6,33E+06	6,69E-02
3,79	0,00379	684,10	0,0911	7,05E+06	6,92E-02
3,92	0,00392	709,93	0,0928	8,21E+06	6,90E-02
4,05	0,00405	750,46	0,0973	9,90E+06	6,75E-02
4,19	0,00419	899,87	0,1099	1,38E+07	5,81E-02
4,32	0,00432	1137,58	0,1356	2,09E+07	4,75E-02
4,45	0,00445	1354,54	0,1662	3,09E+07	4,11E-02
4,59	0,00459	1501,48	0,1903	4,53E+07	3,82E-02
4,72	0,00472	1639,05	0,2092	7,28E+07	3,60E-02
4,85	0,00485	1751,58	0,2261	1,48E+08	3,46E-02
5,12	0,00512	1917,92	0,4887	-2,02E+08	3,34E-02
5,25	0,00525	2024,17	0,2629	-1,00E+08	3,24E-02
5,65	0,00565	2939,78	0,3527	-5,64E+07	2,40E-02
5,78	0,00578	4020,61	0,4629	-6,41E+07	1,80E-02
5,92	0,00592	5041,84	0,6038	-6,87E+07	1,47E-02
6,05	0,00605	5595,84	0,7107	-6,66E+07	1,35E-02
6,18	0,00618	5811,85	0,7608	-6,13E+07	1,33E-02
6,32	0,00632	5197,13	0,7397	-4,93E+07	1,52E-02
6,45	0,00645	5168,92	0,6906	-4,45E+07	1,56E-02
6,59	0,00659	5301,79	0,6963	-4,18E+07	1,55E-02
6,72	0,00672	5508,03	0,7182	-4,01E+07	1,52E-02
6,85	0,00685	5812,65	0,7521	-3,93E+07	1,47E-02
6,98	0,00698	6171,39	0,7977	-3,89E+07	1,41E-02
7,12	0,00712	6392,80	0,8410	-3,77E+07	1,39E-02
7,25	0,00725	6704,65	0,8702	-3,72E+07	1,35E-02
7,38	0,00738	7053,69	0,9166	-3,70E+07	1,31E-02
7,52	0,00752	7159,79	0,9461	-3,56E+07	1,31E-02
7,65	0,00765	7261,91	0,9608	-3,43E+07	1,32E-02
7,78	0,00778	7293,70	0,9689	-3,28E+07	1,33E-02
7,92	0,00792	7334,39	0,9755	-3,14E+07	1,35E-02
8,05	0,00805	7345,28	0,9790	-3,01E+07	1,37E-02
8,18	0,00818	7328,03	0,9767	-2,88E+07	1,40E-02
8,32	0,00832	7194,36	0,9685	-2,71E+07	1,44E-02
8,72	0,00872	8792,24	1,1010	-2,96E+07	1,24E-02
8,85	0,00885	10610,02	1,2866	-3,45E+07	1,04E-02
8,98	0,00898	13014,55	1,5681	-4,09E+07	8,63E-03



**Tabla C.3 Resultado para ensayo de 10 mm**

10 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,05	0,00205	196,85		8,35E+05	1,30E-01
2,19	0,00219	279,43	0,0317	1,24E+06	9,78E-02
2,32	0,00232	370,18	0,0433	1,73E+06	7,83E-02
2,72	0,00272	644,92	0,0791	3,54E+06	5,27E-02
2,85	0,00285	758,73	0,0935	4,42E+06	4,70E-02
2,99	0,00299	863,00	0,1080	5,36E+06	4,33E-02
3,12	0,00312	964,48	0,1216	6,41E+06	4,04E-02
3,25	0,00325	993,17	0,1304	7,11E+06	4,09E-02
3,39	0,00339	1095,06	0,1391	8,48E+06	3,87E-02
3,52	0,00352	1122,71	0,1478	9,48E+06	3,92E-02
3,65	0,00365	1175,96	0,1531	1,09E+07	3,88E-02
3,79	0,00379	1198,61	0,1584	1,23E+07	3,95E-02
3,92	0,00392	1153,15	0,1565	1,33E+07	4,25E-02
4,05	0,00405	1208,62	0,1575	1,59E+07	4,19E-02
4,19	0,00419	1180,01	0,1591	1,81E+07	4,43E-02
4,32	0,00432	1170,87	0,1566	2,15E+07	4,61E-02
4,45	0,00445	1209,02	0,1586	2,76E+07	4,60E-02
4,59	0,00459	1222,85	0,1619	3,69E+07	4,69E-02
4,72	0,00472	1321,16	0,1695	5,87E+07	4,46E-02
4,85	0,00485	1312,65	0,1758	1,11E+08	4,62E-02
5,12	0,00512	1553,62	0,3816	-1,64E+08	4,12E-02
5,25	0,00525	1768,83	0,2214	-8,79E+07	3,71E-02
5,65	0,00565	2505,94	0,3058	-4,81E+07	2,82E-02
5,78	0,00578	3263,16	0,3833	-5,20E+07	2,22E-02
5,92	0,00592	4104,14	0,4908	-5,59E+07	1,80E-02
6,05	0,00605	5086,10	0,6123	-6,05E+07	1,49E-02
6,18	0,00618	6038,19	0,7405	-6,38E+07	1,28E-02
6,32	0,00632	6653,47	0,8472	-6,31E+07	1,19E-02
6,45	0,00645	7033,75	0,9136	-6,06E+07	1,15E-02
6,58	0,00658	7389,70	0,9601	-5,83E+07	1,11E-02
6,72	0,00672	7700,60	1,0063	-5,61E+07	1,09E-02
6,85	0,00685	7933,70	1,0426	-5,36E+07	1,08E-02
6,98	0,00698	8125,07	1,0699	-5,12E+07	1,07E-02
7,12	0,00712	8739,15	1,1204	-5,16E+07	1,02E-02
7,25	0,00725	9596,98	1,2205	-5,33E+07	9,44E-03
7,38	0,00738	10725,10	1,3527	-5,63E+07	8,60E-03
7,52	0,00752	11966,39	1,5104	-5,95E+07	7,85E-03
7,65	0,00765	13123,83	1,6716	-6,19E+07	7,29E-03
7,78	0,00778	14092,76	1,8150	-6,33E+07	6,90E-03
7,92	0,00792	14810,32	1,9293	-6,35E+07	6,68E-03
8,05	0,00805	15713,45	2,0298	-6,44E+07	6,40E-03
8,18	0,00818	16577,56	2,1514	-6,51E+07	6,17E-03
8,32	0,00832	17197,29	2,2545	-6,48E+07	6,04E-03
8,72	0,00872	19133,81	2,4967	-6,44E+07	5,69E-03
8,85	0,00885	19995,05	2,6020	-6,49E+07	5,53E-03
8,98	0,00898	20954,37	2,7257	-6,58E+07	5,36E-03

**Tabla C.4 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

10.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,053	0,0021	575,384		2,44E+06	4,46E-02
2,186	0,0022	625,610	0,080	2,78E+06	4,37E-02
2,319	0,0023	665,585	0,086	3,10E+06	4,36E-02
2,719	0,0027	748,634	0,097	4,10E+06	4,54E-02
2,852	0,0029	784,159	0,102	4,56E+06	4,55E-02
2,985	0,0030	809,670	0,106	5,02E+06	4,61E-02
3,119	0,0031	842,651	0,110	5,60E+06	4,63E-02
3,252	0,0033	877,619	0,115	6,27E+06	4,63E-02
3,385	0,0034	968,138	0,123	7,49E+06	4,37E-02
3,518	0,0035	1089,891	0,137	9,19E+06	4,03E-02
3,651	0,0037	1184,781	0,152	1,10E+07	3,85E-02
3,785	0,0038	1327,991	0,167	1,37E+07	3,56E-02
3,918	0,0039	1464,049	0,186	1,69E+07	3,35E-02
4,051	0,0041	1578,093	0,202	2,08E+07	3,21E-02
4,185	0,0042	1652,559	0,215	2,53E+07	3,17E-02
4,318	0,0043	1708,508	0,224	3,13E+07	3,16E-02
4,451	0,0045	1744,191	0,230	3,97E+07	3,19E-02
4,584	0,0046	1792,351	0,236	5,39E+07	3,20E-02
4,718	0,0047	1800,458	0,239	7,97E+07	3,28E-02
4,851	0,0049	1819,293	0,241	1,52E+08	3,33E-02
5,117	0,0051	2016,942	0,511	-2,15E+08	3,17E-02
5,250	0,0053	2660,274	0,311	-1,33E+08	2,47E-02
5,650	0,0057	4506,906	0,577	-8,67E+07	1,57E-02
5,783	0,0058	4838,148	0,623	-7,72E+07	1,49E-02
5,916	0,0059	5367,994	0,679	-7,32E+07	1,38E-02
6,050	0,0060	5940,834	0,753	-7,08E+07	1,27E-02
6,183	0,0062	6719,033	0,843	-7,10E+07	1,15E-02
6,316	0,0063	7494,847	0,946	-7,12E+07	1,05E-02
6,449	0,0064	8254,846	1,050	-7,12E+07	9,77E-03
6,582	0,0066	8935,850	1,145	-7,06E+07	9,21E-03
6,716	0,0067	9454,250	1,226	-6,89E+07	8,88E-03
6,849	0,0068	9875,854	1,290	-6,68E+07	8,67E-03
6,983	0,0070	10223,710	1,339	-6,45E+07	8,54E-03
7,116	0,0071	10036,630	1,356	-5,93E+07	8,86E-03
7,249	0,0072	10262,810	1,349	-5,70E+07	8,83E-03
7,382	0,0074	10352,370	1,372	-5,43E+07	8,91E-03
7,517	0,0075	9824,355	1,353	-4,88E+07	9,56E-03
7,650	0,0076	9807,428	1,308	-4,63E+07	9,75E-03
7,783	0,0078	9616,772	1,298	-4,32E+07	1,01E-02
7,917	0,0079	9357,690	1,268	-4,01E+07	1,06E-02
8,050	0,0081	9381,135	1,246	-3,84E+07	1,07E-02
8,183	0,0082	9734,948	1,266	-3,82E+07	1,05E-02
8,315	0,0083	10576,720	1,342	-3,99E+07	9,83E-03
8,713	0,0087	15361,150	1,925	-5,17E+07	7,09E-03
8,847	0,0088	17168,200	2,169	-5,58E+07	6,44E-03
8,980	0,0090	19033,110	2,410	-5,98E+07	5,90E-03

**Tabla C.5 Resultado para ensayo de 11 mm**

11 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,051	0,00205	213,703		9,06E+05	1,20E-01
2,184	0,00218	240,564	0,03027	1,07E+06	1,13E-01
2,317	0,00232	278,473	0,03455	1,30E+06	1,04E-01
2,717	0,00272	437,975	0,05357	2,40E+06	7,75E-02
2,850	0,00285	529,607	0,06453	3,08E+06	6,73E-02
2,983	0,00298	674,963	0,08025	4,18E+06	5,52E-02
3,116	0,00312	959,794	0,10871	6,37E+06	4,06E-02
3,250	0,00325	1285,791	0,14975	9,18E+06	3,16E-02
3,383	0,00338	1568,794	0,19019	1,21E+07	2,70E-02
3,516	0,00352	1779,238	0,22306	1,50E+07	2,47E-02
3,650	0,00365	1919,111	0,24663	1,78E+07	2,38E-02
3,783	0,00378	2028,227	0,26299	2,08E+07	2,33E-02
3,916	0,00392	2106,428	0,27547	2,43E+07	2,32E-02
4,049	0,00405	2162,615	0,28469	2,84E+07	2,34E-02
4,183	0,00418	2204,974	0,29072	3,37E+07	2,37E-02
4,316	0,00432	2256,791	0,29727	4,12E+07	2,39E-02
4,449	0,00445	2306,302	0,30402	5,23E+07	2,41E-02
4,582	0,00458	2406,120	0,31397	7,20E+07	2,38E-02
4,715	0,00472	2841,075	0,34894	1,25E+08	2,07E-02
4,848	0,00485	3741,105	0,43771	3,08E+08	1,62E-02
5,115	0,00511	5155,722	1,18606	-5,61E+08	1,24E-02
5,248	0,00525	5337,080	0,70039	-2,69E+08	1,23E-02
5,648	0,00565	5801,916	0,74763	-1,12E+08	1,22E-02
5,782	0,00578	6232,897	0,80633	-9,96E+07	1,16E-02
5,915	0,00592	6135,702	0,82174	-8,38E+07	1,21E-02
6,048	0,00605	6435,076	0,83596	-7,68E+07	1,17E-02
6,181	0,00618	6674,767	0,87262	-7,06E+07	1,16E-02
6,314	0,00631	6818,215	0,89897	-6,48E+07	1,16E-02
6,448	0,00645	6985,108	0,92051	-6,03E+07	1,15E-02
6,581	0,00658	7119,020	0,93881	-5,63E+07	1,16E-02
6,714	0,00671	7180,691	0,95361	-5,24E+07	1,17E-02
6,848	0,00685	7115,603	0,95428	-4,81E+07	1,20E-02
6,981	0,00698	7173,936	0,95026	-4,53E+07	1,22E-02
7,114	0,00711	7008,473	0,94756	-4,14E+07	1,27E-02
7,248	0,00725	7062,992	0,93839	-3,93E+07	1,28E-02
7,381	0,00738	6966,829	0,93561	-3,66E+07	1,32E-02
7,514	0,00751	7043,997	0,93260	-3,50E+07	1,33E-02
7,647	0,00765	7429,918	0,95980	-3,51E+07	1,29E-02
7,780	0,00778	8206,050	1,03784	-3,69E+07	1,19E-02
7,913	0,00791	9479,205	1,17496	-4,07E+07	1,04E-02
8,045	0,00805	11119,680	1,36725	-4,56E+07	9,04E-03
8,178	0,00818	13153,000	1,61262	-5,17E+07	7,77E-03
8,311	0,00831	15346,050	1,89520	-5,79E+07	6,77E-03
8,711	0,00871	21551,850	2,73788	-7,26E+07	5,05E-03
8,844	0,00884	23645,560	3,00845	-7,69E+07	4,68E-03
8,977	0,00898	25656,540	3,29089	-8,06E+07	4,37E-03



**APÉNDICE D**  
**PROBETA 2 - LUEGO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN**

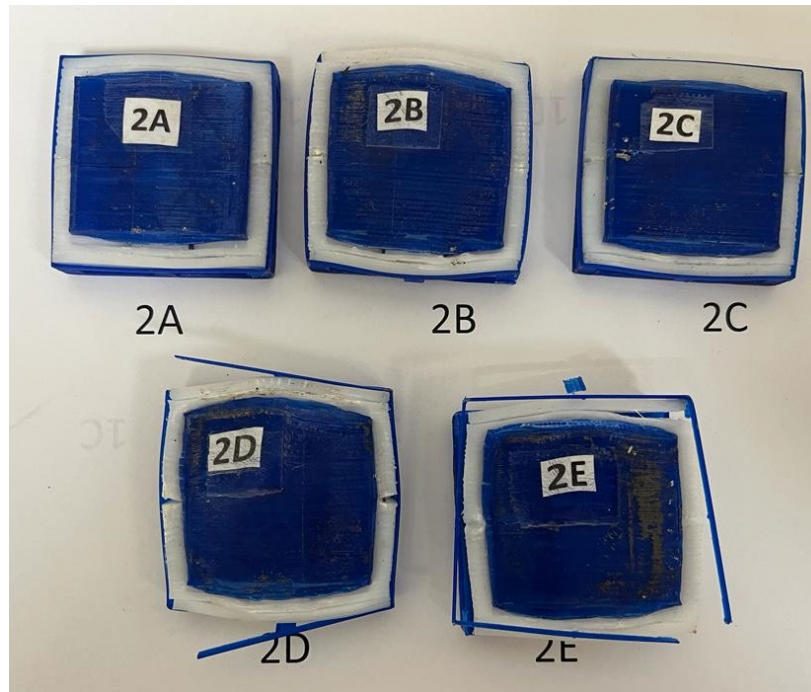


Figura D.1 Vista frontal de las probetas PI luego del ensayo de compresión

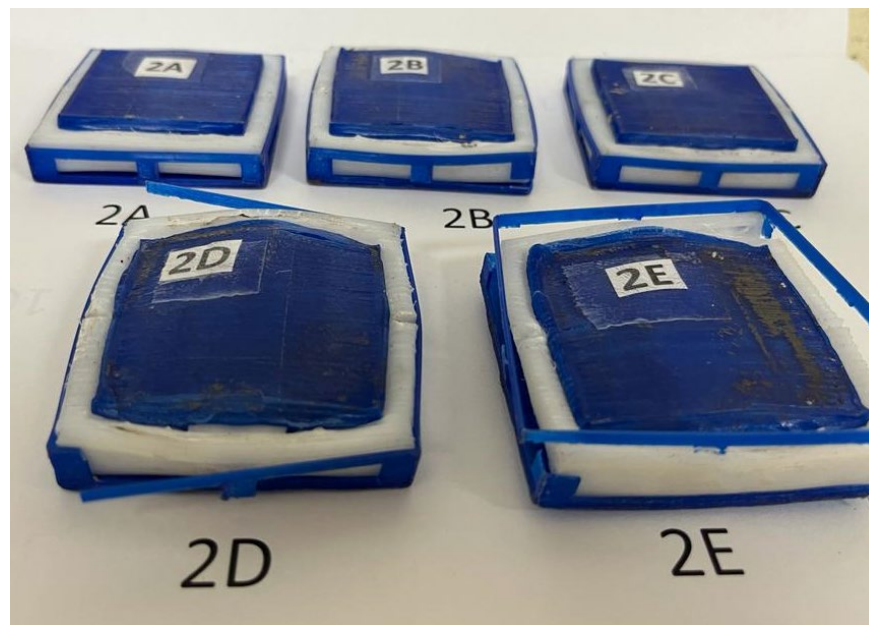


Figura D.2 Vista lateral de las probetas PI luego del ensayo de compresión

## PROBETA 2 - RESULTADOS NUMÉRICOS DURANTE ENSAYOS

### Tabla D.1 Resultado para ensayo de 9 mm

9 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,053	0,002053	284,274		2,88E+05	1,43E-02
2,186	0,002186	367,483	0,043	4,00E+05	1,18E-02
2,586	0,002586	712,633	0,086	9,95E+05	7,17E-03
2,719	0,002719	871,420	0,105	1,34E+06	6,16E-03
2,852	0,002852	1049,519	0,128	1,81E+06	5,37E-03
2,986	0,002986	1242,876	0,153	2,42E+06	4,75E-03
3,119	0,003119	1444,578	0,179	3,24E+06	4,26E-03
3,252	0,003252	1658,758	0,207	4,38E+06	3,87E-03
3,385	0,003385	1880,725	0,236	6,04E+06	3,56E-03
3,518	0,003518	2109,845	0,266	8,65E+06	3,29E-03
3,652	0,003652	2331,734	0,296	1,32E+07	3,09E-03
3,785	0,003785	2553,542	0,325	2,35E+07	2,93E-03
3,918	0,003918	2779,722	0,355	6,72E+07	2,78E-03
4,052	0,004052	3000,339	0,385	-1,15E+08	2,67E-03
4,185	0,004185	3214,598	0,414	-3,43E+07	2,57E-03
4,451	0,004451	3675,302	0,474	-1,61E+07	2,39E-03
4,585	0,004585	3924,211	0,506	-1,33E+07	2,31E-03
4,718	0,004718	4187,902	0,540	-1,15E+07	2,23E-03
4,851	0,004851	4464,706	0,577	-1,04E+07	2,15E-03
4,984	0,004984	4753,033	0,614	-9,54E+06	2,07E-03
5,384	0,005384	5787,690	0,745	-8,26E+06	1,84E-03
5,517	0,005517	6197,055	0,798	-8,07E+06	1,76E-03
5,650	0,005650	6644,011	0,855	-7,95E+06	1,68E-03
5,784	0,005784	7144,451	0,919	-7,91E+06	1,60E-03
5,917	0,005917	7714,828	0,990	-7,95E+06	1,51E-03
6,050	0,006050	8320,729	1,067	-8,02E+06	1,44E-03
6,316	0,006316	9762,843	1,250	-8,33E+06	1,28E-03
6,449	0,006449	10606,920	1,356	-8,55E+06	1,20E-03
6,582	0,006582	11596,680	1,477	-8,87E+06	1,12E-03
6,716	0,006716	12758,250	1,623	-9,28E+06	1,04E-03
6,849	0,006849	14074,250	1,784	-9,76E+06	9,61E-04
6,982	0,006982	15563,330	1,971	-1,03E+07	8,86E-04
7,115	0,007115	17287,410	2,189	-1,10E+07	8,13E-04
7,248	0,007248	19298,230	2,431	-1,17E+07	7,42E-04
7,381	0,007381	21711,910	2,727	-1,27E+07	6,71E-04
7,646	0,007646	27729,040	3,468	-1,50E+07	5,45E-04
7,779	0,007779	31385,030	3,931	-1,64E+07	4,90E-04
7,912	0,007912	35518,250	4,436	-1,79E+07	4,40E-04
8,045	0,008045	40176,870	5,020	-1,96E+07	3,96E-04
8,177	0,008177	45416,750	5,681	-2,15E+07	3,56E-04
8,310	0,008310	51100,650	6,394	-2,34E+07	3,21E-04
8,575	0,008575	63393,750	7,989	-2,74E+07	2,67E-04
8,708	0,008708	69893,280	8,847	-2,93E+07	2,46E-04
8,841	0,008841	76337,410	9,733	-3,11E+07	2,29E-04
8,974	0,008974	82748,250	10,579	-3,29E+07	2,14E-04

**Tabla D.2 Resultado para ensayo de 9.5 mm**

9.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,054	0,00205	857,830		8,71E+05	4,73E-03
2,187	0,00219	1035,690	0,1262	1,13E+06	4,17E-03
2,587	0,00259	1644,770	0,2044	2,30E+06	3,11E-03
2,720	0,00272	1866,659	0,2339	2,88E+06	2,88E-03
2,853	0,00285	2086,242	0,2636	3,59E+06	2,70E-03
2,987	0,00299	2305,905	0,2926	4,49E+06	2,56E-03
3,120	0,00312	2519,290	0,3212	5,65E+06	2,45E-03
3,253	0,00325	2742,052	0,3509	7,25E+06	2,34E-03
3,386	0,00339	2957,900	0,3794	9,52E+06	2,26E-03
3,519	0,00352	3178,438	0,4088	1,31E+07	2,19E-03
3,653	0,00365	3412,644	0,4395	1,94E+07	2,11E-03
3,786	0,00379	3652,175	0,4703	3,37E+07	2,05E-03
3,919	0,00392	3893,534	0,5027	9,51E+07	1,99E-03
4,053	0,00405	4148,642	0,5363	-1,56E+08	1,93E-03
4,186	0,00419	4427,910	0,5709	-4,71E+07	1,87E-03
4,452	0,00445	5037,785	0,6503	-2,20E+07	1,75E-03
4,585	0,00459	5381,902	0,6936	-1,82E+07	1,68E-03
4,719	0,00472	5744,139	0,7420	-1,58E+07	1,62E-03
4,852	0,00485	6141,424	0,7919	-1,42E+07	1,56E-03
4,985	0,00499	6591,082	0,8475	-1,32E+07	1,49E-03
5,385	0,00538	8182,923	1,0508	-1,17E+07	1,30E-03
5,518	0,00552	8820,136	1,1339	-1,15E+07	1,24E-03
5,651	0,00565	9562,492	1,2224	-1,14E+07	1,17E-03
5,784	0,00578	10391,080	1,3282	-1,15E+07	1,10E-03
5,918	0,00592	11339,110	1,4491	-1,17E+07	1,03E-03
6,051	0,00605	12459,520	1,5826	-1,20E+07	9,59E-04
6,317	0,00632	15151,100	1,9207	-1,29E+07	8,24E-04
6,450	0,00645	16855,800	2,1284	-1,36E+07	7,56E-04
6,583	0,00658	18810,430	2,3740	-1,44E+07	6,91E-04
6,716	0,00672	21140,420	2,6542	-1,54E+07	6,28E-04
6,849	0,00685	23946,520	2,9955	-1,66E+07	5,65E-04
6,982	0,00698	27244,090	3,4010	-1,80E+07	5,06E-04
7,114	0,00711	31029,300	3,8643	-1,97E+07	4,53E-04
7,247	0,00725	35340,710	4,4095	-2,15E+07	4,05E-04
7,380	0,00738	40128,310	5,0140	-2,35E+07	3,63E-04
7,646	0,00765	50991,060	6,4010	-2,76E+07	2,96E-04
7,778	0,00778	56930,460	7,1700	-2,98E+07	2,70E-04
7,911	0,00791	63234,170	7,9835	-3,19E+07	2,47E-04
8,044	0,00804	70013,130	8,8443	-3,42E+07	2,27E-04
8,177	0,00818	77065,230	9,7714	-3,64E+07	2,10E-04
8,310	0,00831	84049,550	10,7242	-3,85E+07	1,95E-04
8,576	0,00858	98734,930	12,6201	-4,26E+07	1,72E-04
8,709	0,00871	106766,000	13,6274	-4,48E+07	1,61E-04
8,841	0,00884	115050,900	14,6954	-4,69E+07	1,52E-04
8,974	0,00897	123714,600	15,8330	-4,91E+07	1,43E-04

**Tabla D.3 Resultado para ensayo de 10 mm**

10 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,053	0,002053	240,33		2,44E+05	1,95E-03
2,186	0,002186	292,06	0,0355	3,18E+05	1,81E-03
2,586	0,002586	475,80	0,0583	6,65E+05	1,41E-03
2,719	0,002719	569,58	0,0697	8,79E+05	1,28E-03
2,853	0,002853	684,02	0,0834	1,18E+06	1,15E-03
2,986	0,002986	810,46	0,0997	1,58E+06	1,01E-03
3,119	0,003119	958,84	0,1179	2,15E+06	8,81E-04
3,252	0,003252	1096,33	0,1369	2,90E+06	7,48E-04
3,386	0,003386	1264,25	0,1573	4,06E+06	6,14E-04
3,519	0,003519	1427,49	0,1793	5,86E+06	4,81E-04
3,652	0,003652	1603,37	0,2017	9,10E+06	3,48E-04
3,785	0,003785	1778,05	0,2255	1,64E+07	2,15E-04
3,919	0,003919	1953,05	0,2486	4,74E+07	8,14E-05
4,052	0,004052	2124,31	0,2714	-8,11E+07	-5,18E-05
4,185	0,004185	2295,10	0,2947	-2,45E+07	-1,85E-04
4,452	0,004452	2630,31	0,3394	-1,15E+07	-4,52E-04
4,585	0,004585	2794,11	0,3617	-9,44E+06	-5,85E-04
4,718	0,004718	2956,31	0,3831	-8,13E+06	-7,18E-04
4,851	0,004851	3134,65	0,4054	-7,27E+06	-8,51E-04
4,985	0,004985	3315,53	0,4301	-6,65E+06	-9,85E-04
5,384	0,005384	3939,71	0,5098	-5,62E+06	-1,38E-03
5,518	0,005518	4188,14	0,5415	-5,45E+06	-1,52E-03
5,651	0,005651	4448,97	0,5749	-5,32E+06	-1,65E-03
5,784	0,005784	4738,01	0,6127	-5,25E+06	-1,78E-03
5,917	0,005917	5045,33	0,6512	-5,20E+06	-1,92E-03
6,051	0,006051	5374,03	0,6948	-5,18E+06	-2,05E-03
6,317	0,006317	6111,86	0,7884	-5,21E+06	-2,32E-03
6,450	0,006450	6529,65	0,8415	-5,26E+06	-2,45E-03
6,583	0,006583	6990,59	0,9016	-5,35E+06	-2,58E-03
6,716	0,006716	7510,90	0,9643	-5,46E+06	-2,72E-03
6,850	0,006850	8139,21	1,0427	-5,64E+06	-2,85E-03
6,983	0,006983	8855,98	1,1323	-5,86E+06	-2,98E-03
7,116	0,007116	9677,81	1,2337	-6,13E+06	-3,12E-03
7,249	0,007249	10585,23	1,3500	-6,44E+06	-3,25E-03
7,382	0,007382	11596,84	1,4765	-6,77E+06	-3,38E-03
7,649	0,007649	14011,22	1,7800	-7,59E+06	-3,65E-03
7,782	0,007782	15497,29	1,9642	-8,09E+06	-3,78E-03
7,915	0,007915	17228,60	2,1763	-8,69E+06	-3,91E-03
8,048	0,008048	19237,84	2,4250	-9,39E+06	-4,05E-03
8,181	0,008181	21603,35	2,7160	-1,02E+07	-4,18E-03
8,314	0,008314	24269,26	3,0476	-1,11E+07	-4,31E-03
8,579	0,008579	30768,71	3,8512	-1,33E+07	-4,58E-03
8,712	0,008712	34565,77	4,3448	-1,45E+07	-4,71E-03
8,845	0,008845	38742,62	4,8658	-1,58E+07	-4,85E-03
8,978	0,008978	43215,83	5,4452	-1,71E+07	-4,98E-03

**Tabla D.4 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

10.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,053	0,00205	1729,73		1,75E+06	1,95E-03
2,186	0,00219	1927,14	0,244	2,10E+06	1,81E-03
2,586	0,00259	2549,25	0,325	3,56E+06	1,41E-03
2,719	0,00272	2767,09	0,354	4,27E+06	1,28E-03
2,852	0,00285	2990,64	0,384	5,15E+06	1,15E-03
2,985	0,00299	3223,58	0,414	6,28E+06	1,01E-03
3,119	0,00312	3453,18	0,445	7,74E+06	8,82E-04
3,252	0,00325	3686,35	0,476	9,73E+06	7,48E-04
3,385	0,00339	3927,79	0,507	1,26E+07	6,15E-04
3,518	0,00352	4172,72	0,540	1,71E+07	4,82E-04
3,652	0,00365	4426,48	0,573	2,51E+07	3,48E-04
3,785	0,00378	4679,20	0,607	4,30E+07	2,15E-04
3,918	0,00392	4959,27	0,642	1,19E+08	8,20E-05
4,051	0,00405	5261,42	0,682	-2,02E+08	-5,14E-05
4,185	0,00418	5580,98	0,722	-5,98E+07	-1,85E-04
4,451	0,00445	6332,00	0,817	-2,77E+07	-4,51E-04
4,584	0,00458	6776,49	0,873	-2,29E+07	-5,84E-04
4,717	0,00472	7288,30	0,937	-2,01E+07	-7,17E-04
4,851	0,00485	7866,86	1,009	-1,83E+07	-8,51E-04
4,984	0,00498	8510,59	1,090	-1,71E+07	-9,84E-04
5,383	0,00538	10958,51	1,396	-1,57E+07	-1,38E-03
5,516	0,00552	12025,20	1,531	-1,57E+07	-1,52E-03
5,649	0,00565	13209,18	1,680	-1,58E+07	-1,65E-03
5,782	0,00578	14570,40	1,847	-1,61E+07	-1,78E-03
5,916	0,00592	16148,96	2,047	-1,67E+07	-1,92E-03
6,049	0,00605	17954,83	2,268	-1,73E+07	-2,05E-03
6,315	0,00631	22463,48	2,824	-1,92E+07	-2,31E-03
6,447	0,00645	25268,71	3,171	-2,04E+07	-2,45E-03
6,580	0,00658	28440,47	3,568	-2,18E+07	-2,58E-03
6,713	0,00671	31972,65	4,014	-2,33E+07	-2,71E-03
6,846	0,00685	35806,18	4,503	-2,49E+07	-2,85E-03
6,979	0,00698	39635,74	5,026	-2,63E+07	-2,98E-03
7,112	0,00711	43324,63	5,522	-2,75E+07	-3,11E-03
7,246	0,00725	47055,16	6,022	-2,86E+07	-3,25E-03
7,379	0,00738	50874,95	6,518	-2,97E+07	-3,38E-03
7,645	0,00764	59267,92	7,581	-3,21E+07	-3,64E-03
7,777	0,00778	64517,58	8,209	-3,37E+07	-3,78E-03
7,910	0,00791	70291,20	8,931	-3,55E+07	-3,91E-03
8,042	0,00804	76657,85	9,745	-3,75E+07	-4,04E-03
8,175	0,00817	83581,05	10,596	-3,95E+07	-4,17E-03
8,307	0,00831	91192,96	11,568	-4,18E+07	-4,31E-03
8,571	0,00857	107948,60	13,698	-4,67E+07	-4,57E-03
8,703	0,00870	116891,60	14,797	-4,91E+07	-4,70E-03
8,834	0,00883	126174,90	15,982	-5,16E+07	-4,83E-03
8,964	0,00896	135656,80	17,003	-5,40E+07	-4,96E-03

**Tabla D.5 Resultado para ensayo de 11 mm**

11 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,051	0,00205	480,175		4,87E+05	1,95E-03
2,184	0,00218	578,880	0,071	6,30E+05	1,82E-03
2,584	0,00258	922,124	0,115	1,29E+06	1,42E-03
2,717	0,00272	1055,002	0,132	1,62E+06	1,28E-03
2,851	0,00285	1192,490	0,150	2,05E+06	1,15E-03
2,984	0,00298	1345,396	0,169	2,62E+06	1,02E-03
3,117	0,00312	1509,269	0,190	3,38E+06	8,83E-04
3,250	0,00325	1678,228	0,212	4,42E+06	7,50E-04
3,384	0,00338	1850,685	0,235	5,93E+06	6,17E-04
3,517	0,00352	2035,856	0,259	8,32E+06	4,83E-04
3,650	0,00365	2223,889	0,284	1,26E+07	3,50E-04
3,783	0,00378	2426,942	0,310	2,21E+07	2,17E-04
3,917	0,00392	2633,333	0,337	6,24E+07	8,34E-05
4,050	0,00405	2842,108	0,364	-1,13E+08	-4,98E-05
4,183	0,00418	3057,321	0,393	-3,30E+07	-1,83E-04
4,450	0,00445	3509,124	0,452	-1,54E+07	-4,50E-04
4,583	0,00458	3754,536	0,484	-1,27E+07	-5,83E-04
4,716	0,00472	4006,386	0,517	-1,11E+07	-7,16E-04
4,849	0,00485	4275,719	0,552	-9,94E+06	-8,49E-04
4,983	0,00498	4570,166	0,589	-9,19E+06	-9,83E-04
5,382	0,00538	5657,673	0,728	-8,09E+06	-1,38E-03
5,516	0,00552	6089,290	0,783	-7,94E+06	-1,52E-03
5,649	0,00565	6546,338	0,841	-7,84E+06	-1,65E-03
5,782	0,00578	7023,017	0,904	-7,79E+06	-1,78E-03
5,915	0,00592	7552,067	0,971	-7,79E+06	-1,92E-03
6,048	0,00605	8137,464	1,044	-7,85E+06	-2,05E-03
6,315	0,00631	9536,188	1,220	-8,14E+06	-2,31E-03
6,448	0,00645	10351,420	1,324	-8,35E+06	-2,45E-03
6,581	0,00658	11231,020	1,438	-8,60E+06	-2,58E-03
6,714	0,00671	12247,480	1,563	-8,91E+06	-2,71E-03
6,847	0,00685	13405,160	1,708	-9,30E+06	-2,85E-03
6,980	0,00698	14700,330	1,871	-9,74E+06	-2,98E-03
7,114	0,00711	16173,280	2,055	-1,03E+07	-3,11E-03
7,246	0,00725	17864,710	2,261	-1,09E+07	-3,25E-03
7,379	0,00738	19772,930	2,503	-1,16E+07	-3,38E-03
7,645	0,00765	24511,020	3,086	-1,33E+07	-3,65E-03
7,778	0,00778	27562,700	3,453	-1,44E+07	-3,78E-03
7,911	0,00791	31104,170	3,894	-1,57E+07	-3,91E-03
8,043	0,00804	35204,250	4,397	-1,72E+07	-4,04E-03
8,176	0,00818	39882,180	4,970	-1,89E+07	-4,18E-03
8,308	0,00831	45077,560	5,623	-2,07E+07	-4,31E-03
8,572	0,00857	56785,420	7,109	-2,45E+07	-4,57E-03
8,704	0,00870	63224,230	7,921	-2,65E+07	-4,70E-03
8,837	0,00884	70065,980	8,805	-2,86E+07	-4,84E-03
8,968	0,00897	77168,460	9,699	-3,07E+07	-4,97E-03



**APÉNDICE E**  
**PROBETA 3 LUEGO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN**

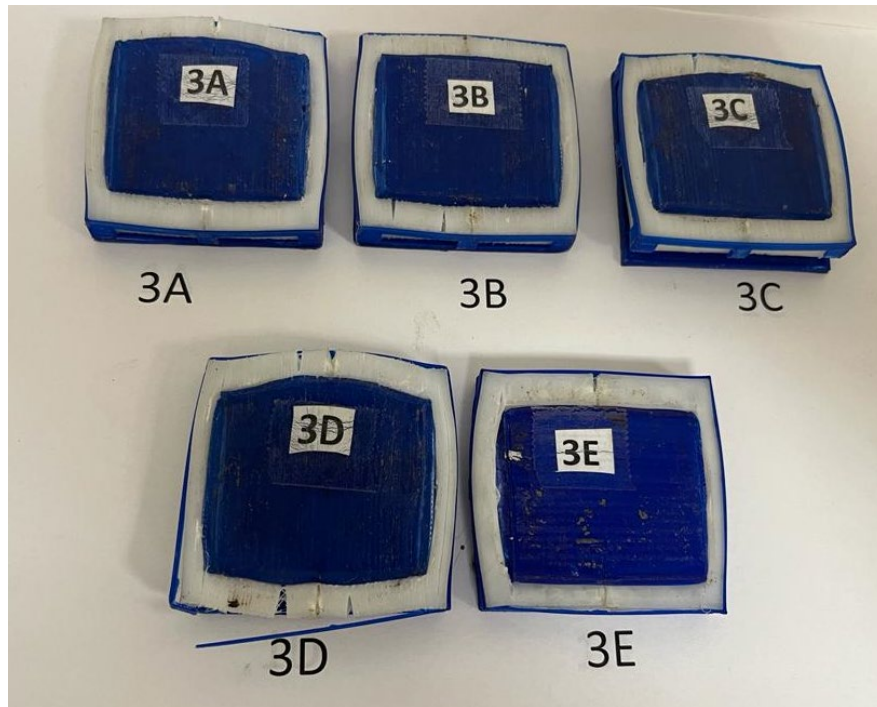


Figura E.1 Vista frontal de las probetas M luego del ensayo de compresión

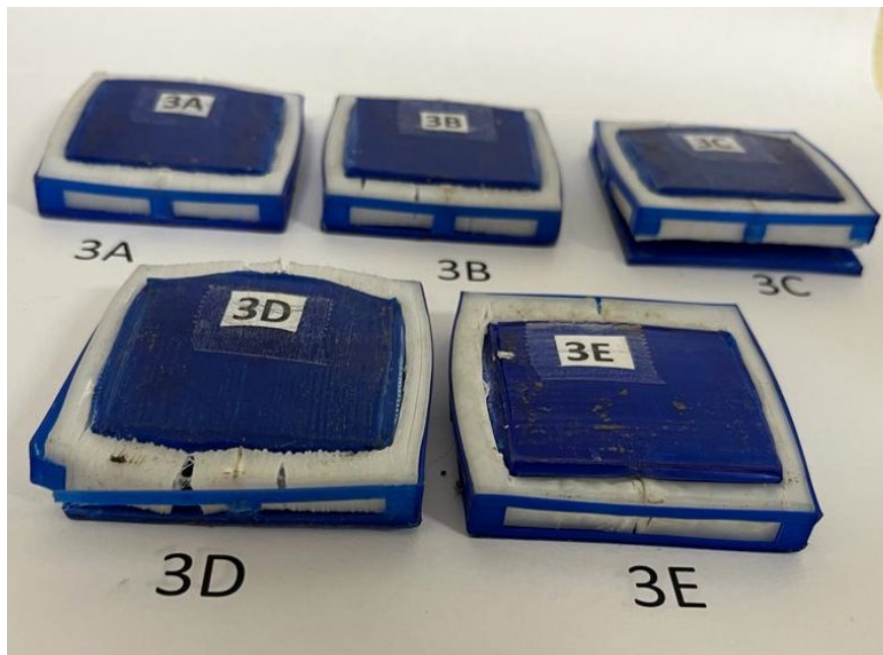


Figura E.2 Vista lateral de las probetas M luego del ensayo de compresión

## PROBETA 3 - RESULTADOS NUMÉRICOS DURANTE ENSAYOS

### Tabla E.1 Resultado para ensayo de 9 mm

9 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,051	0,00205	480,175		5,55E+05	1,95E-03
2,184	0,00218	578,880	0,0706	7,18E+05	1,82E-03
2,318	0,00232	683,308	0,0841	9,15E+05	1,68E-03
2,451	0,00245	802,199	0,0990	1,17E+06	1,55E-03
2,584	0,00258	922,124	0,1149	1,47E+06	1,42E-03
2,717	0,00272	1055,002	0,1317	1,85E+06	1,28E-03
2,851	0,00285	1192,490	0,1497	2,34E+06	1,15E-03
2,984	0,00298	1345,396	0,1689	2,98E+06	1,02E-03
3,117	0,00312	1509,269	0,1904	3,85E+06	8,83E-04
3,250	0,00325	1678,228	0,2124	5,05E+06	7,50E-04
3,384	0,00338	1850,685	0,2349	6,76E+06	6,17E-04
3,517	0,00352	2035,856	0,2592	9,50E+06	4,83E-04
3,650	0,00365	2223,889	0,2835	1,43E+07	3,50E-04
3,783	0,00378	2426,942	0,3099	2,52E+07	2,17E-04
3,917	0,00392	2633,333	0,3375	7,12E+07	8,34E-05
4,050	0,00405	2842,108	0,3645	-1,29E+08	-4,98E-05
4,183	0,00418	3057,321	0,3930	-3,76E+07	-1,83E-04
4,317	0,00432	3277,620	0,4229	-2,33E+07	-3,17E-04
4,450	0,00445	3509,124	0,4517	-1,76E+07	-4,50E-04
4,583	0,00458	3754,536	0,4839	-1,45E+07	-5,83E-04
4,716	0,00472	4006,386	0,5171	-1,26E+07	-7,16E-04
4,849	0,00485	4275,719	0,5518	-1,13E+07	-8,49E-04
4,983	0,00498	4570,166	0,5894	-1,05E+07	-9,83E-04
5,116	0,00512	4913,807	0,6319	-9,92E+06	-1,12E-03
5,249	0,00525	5274,693	0,6782	-9,52E+06	-1,25E-03
5,382	0,00538	5657,673	0,7284	-9,22E+06	-1,38E-03
5,516	0,00552	6089,290	0,7826	-9,05E+06	-1,52E-03
5,649	0,00565	6546,338	0,8411	-8,95E+06	-1,65E-03
5,782	0,00578	7023,017	0,9041	-8,88E+06	-1,78E-03
5,915	0,00592	7552,067	0,9711	-8,89E+06	-1,92E-03
6,048	0,00605	8137,464	1,0443	-8,95E+06	-2,05E-03
6,182	0,00618	8794,863	1,1281	-9,09E+06	-2,18E-03
6,315	0,00631	9536,188	1,2202	-9,28E+06	-2,31E-03
6,448	0,00645	10351,420	1,3238	-9,53E+06	-2,45E-03
6,581	0,00658	11231,020	1,4379	-9,81E+06	-2,58E-03
6,714	0,00671	12247,480	1,5628	-1,02E+07	-2,71E-03
6,847	0,00685	13405,160	1,7075	-1,06E+07	-2,85E-03
6,980	0,00698	14700,330	1,8708	-1,11E+07	-2,98E-03
7,114	0,00711	16173,280	2,0550	-1,17E+07	-3,11E-03
7,246	0,00725	17864,710	2,2614	-1,24E+07	-3,25E-03
7,379	0,00738	19772,930	2,5029	-1,32E+07	-3,38E-03
7,512	0,00751	21943,730	2,7716	-1,41E+07	-3,51E-03
7,645	0,00765	24511,020	3,0863	-1,52E+07	-3,65E-03
7,778	0,00778	27562,700	3,4531	-1,64E+07	-3,78E-03
7,911	0,00791	31104,170	3,8940	-1,79E+07	-3,91E-03
8,043	0,00804	35204,250	4,3970	-1,96E+07	-4,04E-03
8,176	0,00818	39882,180	4,9698	-2,15E+07	-4,18E-03
8,308	0,00831	45077,560	5,6233	-2,36E+07	-4,31E-03
8,440	0,00844	50722,840	6,3348	-2,57E+07	-4,44E-03
8,572	0,00857	56785,420	7,1090	-2,80E+07	-4,57E-03
8,704	0,00870	63224,230	7,9206	-3,03E+07	-4,70E-03
8,837	0,00884	70065,980	8,8055	-3,26E+07	-4,84E-03
8,968	0,00897	77168,460	9,6991	-3,50E+07	-4,97E-03



**Tabla E.2 Resultado para ensayo de 9.5 mm**

9.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,0541	0,00205	104,348		1,21E+05	1,95E-03
2,1875	0,00219	120,958	0,0150	1,50E+05	1,81E-03
2,3208	0,00232	146,071	0,0178	1,96E+05	1,68E-03
2,4539	0,00245	166,416	0,0208	2,43E+05	1,55E-03
2,5873	0,00259	189,463	0,0237	3,02E+05	1,41E-03
2,7204	0,00272	218,630	0,0272	3,85E+05	1,28E-03
2,8536	0,00285	250,896	0,0313	4,93E+05	1,15E-03
2,9869	0,00299	287,692	0,0359	6,40E+05	1,01E-03
3,1201	0,00312	331,084	0,0412	8,48E+05	8,80E-04
3,2534	0,00325	375,748	0,0471	1,13E+06	7,47E-04
3,3866	0,00339	431,061	0,0538	1,58E+06	6,13E-04
3,5199	0,00352	499,010	0,0620	2,34E+06	4,80E-04
3,6531	0,00365	577,132	0,0717	3,75E+06	3,47E-04
3,7864	0,00379	661,850	0,0825	6,98E+06	2,14E-04
3,9196	0,00392	765,642	0,0951	2,15E+07	8,04E-05
4,0529	0,00405	882,308	0,1098	-3,76E+07	-5,29E-05
4,1861	0,00419	1025,041	0,1271	-1,24E+07	-1,86E-04
4,3193	0,00432	1201,153	0,1482	-8,48E+06	-3,19E-04
4,4526	0,00445	1420,816	0,1749	-7,07E+06	-4,53E-04
4,5859	0,00459	1702,944	0,2081	-6,55E+06	-5,86E-04
4,7190	0,00472	2045,472	0,2495	-6,41E+06	-7,19E-04
4,8523	0,00485	2459,924	0,3002	-6,50E+06	-8,52E-04
4,9855	0,00499	2949,953	0,3604	-6,75E+06	-9,86E-04
5,1186	0,00512	3494,978	0,4290	-7,04E+06	-1,12E-03
5,2519	0,00525	4102,707	0,5062	-7,39E+06	-1,25E-03
5,3851	0,00539	4722,992	0,5880	-7,68E+06	-1,39E-03
5,5183	0,00552	5359,411	0,6711	-7,95E+06	-1,52E-03
5,6515	0,00565	6062,667	0,7610	-8,27E+06	-1,65E-03
5,7846	0,00578	6864,866	0,8605	-8,67E+06	-1,78E-03
5,9178	0,00592	7779,439	0,9748	-9,14E+06	-1,92E-03
6,0510	0,00605	8766,413	1,1024	-9,63E+06	-2,05E-03
6,1841	0,00618	9772,618	1,2340	-1,01E+07	-2,18E-03
6,3175	0,00632	10738,370	1,3678	-1,04E+07	-2,32E-03
6,4508	0,00645	11675,360	1,4933	-1,07E+07	-2,45E-03
6,5839	0,00658	12777,810	1,6277	-1,11E+07	-2,58E-03
6,7171	0,00672	14119,150	1,7920	-1,17E+07	-2,72E-03
6,8501	0,00685	15757,400	1,9868	-1,25E+07	-2,85E-03
6,9833	0,00698	17707,820	2,2275	-1,34E+07	-2,98E-03
7,1164	0,00712	19879,100	2,5019	-1,44E+07	-3,12E-03
7,2495	0,00725	22246,120	2,8040	-1,54E+07	-3,25E-03
7,3825	0,00738	24821,040	3,1300	-1,65E+07	-3,38E-03
7,5158	0,00752	27619,920	3,4939	-1,77E+07	-3,52E-03
7,6488	0,00765	30701,160	3,8784	-1,90E+07	-3,65E-03
7,7818	0,00778	34119,290	4,3106	-2,03E+07	-3,78E-03
7,9146	0,00791	38079,580	4,7967	-2,19E+07	-3,91E-03
8,0474	0,00805	42448,360	5,3451	-2,36E+07	-4,05E-03
8,1803	0,00818	47176,200	5,9544	-2,54E+07	-4,18E-03
8,3128	0,00831	52490,470	6,6030	-2,74E+07	-4,31E-03
8,4454	0,00845	58463,810	7,3576	-2,96E+07	-4,45E-03
8,5779	0,00858	65156,940	8,1899	-3,21E+07	-4,58E-03
8,7104	0,00871	72546,480	9,1229	-3,47E+07	-4,71E-03
8,8430	0,00884	80488,130	10,1480	-3,75E+07	-4,84E-03
8,9755	0,00898	88871,630	11,2201	-4,03E+07	-4,98E-03

**Tabla E.3 Resultado para ensayo de 10 mm**

10 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,053	0,00205	108,083		1,25E+05	1,95E-03
2,186	0,00219	126,759	0,0157	1,57E+05	1,81E-03
2,319	0,00232	145,674	0,0182	1,95E+05	1,68E-03
2,452	0,00245	167,688	0,0209	2,44E+05	1,55E-03
2,586	0,00259	193,596	0,0241	3,08E+05	1,41E-03
2,719	0,00272	218,153	0,0274	3,84E+05	1,28E-03
2,852	0,00285	239,452	0,0305	4,70E+05	1,15E-03
2,986	0,00299	262,102	0,0334	5,82E+05	1,01E-03
3,119	0,00312	293,414	0,0369	7,50E+05	8,82E-04
3,252	0,00325	328,382	0,0415	9,89E+05	7,48E-04
3,385	0,00339	376,622	0,0470	1,38E+06	6,15E-04
3,518	0,00352	431,856	0,0539	2,02E+06	4,82E-04
3,652	0,00365	495,434	0,0618	3,20E+06	3,48E-04
3,785	0,00378	572,046	0,0711	5,99E+06	2,15E-04
3,918	0,00392	660,340	0,0821	1,82E+07	8,19E-05
4,051	0,00405	765,959	0,0950	-3,36E+07	-5,14E-05
4,185	0,00418	886,122	0,1101	-1,08E+07	-1,85E-04
4,318	0,00432	1041,174	0,1284	-7,38E+06	-3,18E-04
4,451	0,00445	1235,088	0,1517	-6,17E+06	-4,51E-04
4,584	0,00458	1462,539	0,1797	-5,64E+06	-5,84E-04
4,718	0,00472	1738,707	0,2131	-5,46E+06	-7,18E-04
4,851	0,00485	2052,228	0,2526	-5,44E+06	-8,51E-04
4,984	0,00498	2419,631	0,2979	-5,54E+06	-9,84E-04
5,117	0,00512	2842,506	0,3503	-5,73E+06	-1,12E-03
5,250	0,00525	3330,708	0,4113	-6,00E+06	-1,25E-03
5,384	0,00538	3850,142	0,4784	-6,27E+06	-1,38E-03
5,517	0,00552	4370,451	0,5472	-6,49E+06	-1,52E-03
5,650	0,00565	4949,729	0,6215	-6,76E+06	-1,65E-03
5,783	0,00578	5623,817	0,7038	-7,11E+06	-1,78E-03
5,916	0,00592	6388,029	0,7995	-7,51E+06	-1,92E-03
6,050	0,00605	7260,402	0,9102	-7,98E+06	-2,05E-03
6,183	0,00618	8184,274	1,0280	-8,45E+06	-2,18E-03
6,316	0,00632	9044,647	1,1468	-8,80E+06	-2,32E-03
6,449	0,00645	10076,920	1,2740	-9,27E+06	-2,45E-03
6,582	0,00658	11287,290	1,4207	-9,85E+06	-2,58E-03
6,715	0,00672	12629,030	1,5919	-1,05E+07	-2,72E-03
6,849	0,00685	14070,510	1,7789	-1,11E+07	-2,85E-03
6,982	0,00698	15826,300	1,9863	-1,20E+07	-2,98E-03
7,115	0,00711	17872,570	2,2431	-1,29E+07	-3,11E-03
7,248	0,00725	20165,680	2,5295	-1,40E+07	-3,25E-03
7,381	0,00738	22844,230	2,8575	-1,52E+07	-3,38E-03
7,513	0,00751	26035,230	3,2474	-1,67E+07	-3,51E-03
7,646	0,00765	29689,390	3,6987	-1,83E+07	-3,65E-03
7,779	0,00778	33876,730	4,2192	-2,02E+07	-3,78E-03
7,912	0,00791	38711,470	4,8135	-2,23E+07	-3,91E-03
8,044	0,00804	44115,540	5,4925	-2,46E+07	-4,04E-03
8,177	0,00818	50153,970	6,2453	-2,71E+07	-4,18E-03
8,309	0,00831	56801,960	7,0791	-2,97E+07	-4,31E-03
8,442	0,00844	63919,630	7,9979	-3,24E+07	-4,44E-03
8,574	0,00857	71220,080	8,9698	-3,51E+07	-4,57E-03
8,707	0,00871	78626,470	9,9555	-3,76E+07	-4,71E-03
8,840	0,00884	85978,990	10,9462	-4,00E+07	-4,84E-03
8,973	0,00897	93040,230	11,9048	-4,22E+07	-4,97E-03

**Tabla E.4 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

10.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,0531	0,00205	133,514		1,55E+05	1,95E-03
2,1865	0,00219	157,356	0,01940	1,96E+05	1,81E-03
2,3196	0,00232	181,357	0,02255	2,43E+05	1,68E-03
2,4529	0,00245	211,795	0,02619	3,08E+05	1,55E-03
2,5861	0,00259	249,068	0,03071	3,97E+05	1,41E-03
2,7193	0,00272	290,553	0,03592	5,11E+05	1,28E-03
2,8526	0,00285	335,773	0,04177	6,59E+05	1,15E-03
2,9860	0,00299	394,265	0,04868	8,76E+05	1,01E-03
3,1191	0,00312	454,903	0,05652	1,16E+06	8,81E-04
3,2524	0,00325	529,607	0,06559	1,60E+06	7,48E-04
3,3858	0,00339	613,451	0,07623	2,25E+06	6,14E-04
3,5189	0,00352	715,812	0,08848	3,35E+06	4,81E-04
3,6523	0,00365	828,584	0,10299	5,37E+06	3,48E-04
3,7855	0,00379	974,735	0,12015	1,02E+07	2,15E-04
3,9186	0,00392	1163,244	0,14231	3,22E+07	8,14E-05
4,0519	0,00405	1391,570	0,17021	-6,05E+07	-5,19E-05
4,1851	0,00419	1669,645	0,20395	-2,03E+07	-1,85E-04
4,3183	0,00432	2001,286	0,24435	-1,42E+07	-3,18E-04
4,4516	0,00445	2390,862	0,29290	-1,19E+07	-4,52E-04
4,5848	0,00458	2842,982	0,34838	-1,10E+07	-5,85E-04
4,7179	0,00472	3341,436	0,41165	-1,05E+07	-7,18E-04
4,8513	0,00485	3868,898	0,48084	-1,02E+07	-8,51E-04
4,9844	0,00498	4397,710	0,55025	-1,01E+07	-9,84E-04
5,1175	0,00512	4952,351	0,62236	-9,99E+06	-1,12E-03
5,2508	0,00525	5553,722	0,69997	-1,00E+07	-1,25E-03
5,3840	0,00538	6191,730	0,78254	-1,01E+07	-1,38E-03
5,5173	0,00552	6899,595	0,87221	-1,02E+07	-1,52E-03
5,6504	0,00565	7732,153	0,97393	-1,06E+07	-1,65E-03
5,7836	0,00578	8537,610	1,08397	-1,08E+07	-1,78E-03
5,9170	0,00592	9264,946	1,18721	-1,09E+07	-1,92E-03
6,0501	0,00605	10138,830	1,29156	-1,11E+07	-2,05E-03
6,1833	0,00618	11167,050	1,41817	-1,15E+07	-2,18E-03
6,3165	0,00632	12317,900	1,56468	-1,20E+07	-2,32E-03
6,4495	0,00645	13683,960	1,72912	-1,26E+07	-2,45E-03
6,5825	0,00658	15291,050	1,92684	-1,33E+07	-2,58E-03
6,7156	0,00672	17196,970	2,16248	-1,43E+07	-2,72E-03
6,8485	0,00685	19437,390	2,43390	-1,54E+07	-2,85E-03
6,9814	0,00698	22068,020	2,75752	-1,67E+07	-2,98E-03
7,1144	0,00711	25011,940	3,13082	-1,81E+07	-3,11E-03
7,2473	0,00725	28202,380	3,53545	-1,96E+07	-3,25E-03
7,3801	0,00738	32027,400	4,00152	-2,14E+07	-3,38E-03
7,5126	0,00751	36541,300	4,54264	-2,34E+07	-3,51E-03
7,6453	0,00765	41560,960	5,17916	-2,57E+07	-3,65E-03
7,7779	0,00778	47065,730	5,87706	-2,81E+07	-3,78E-03
7,9104	0,00791	53191,110	6,64207	-3,07E+07	-3,91E-03
8,0430	0,00804	59893,370	7,49886	-3,34E+07	-4,04E-03
8,1754	0,00818	66960,410	8,39613	-3,61E+07	-4,18E-03
8,3083	0,00831	74212,230	9,37916	-3,88E+07	-4,31E-03
8,4414	0,00844	81425,340	10,35970	-4,13E+07	-4,44E-03
8,5744	0,00857	88526,960	11,30174	-4,36E+07	-4,57E-03
8,7076	0,00871	95395,020	12,25380	-4,57E+07	-4,71E-03
8,8409	0,00884	101984,200	13,15049	-4,75E+07	-4,84E-03
8,9741	0,00897	108458,800	14,02076	-4,91E+07	-4,97E-03

**Tabla E.5 Resultado para ensayo de 11 mm**

11 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Area	K [Pa]	V [m/s]
2,052	0,00205	181,198		2,10E+05	1,95E-03
2,185	0,00219	205,676	0,02578	2,55E+05	1,82E-03
2,318	0,00232	230,710	0,02905	3,09E+05	1,68E-03
2,452	0,00245	257,572	0,03259	3,75E+05	1,55E-03
2,585	0,00258	283,162	0,03596	4,51E+05	1,42E-03
2,718	0,00272	308,991	0,03949	5,43E+05	1,28E-03
2,851	0,00285	331,561	0,04272	6,50E+05	1,15E-03
2,984	0,00298	359,615	0,04596	7,98E+05	1,02E-03
3,118	0,00312	386,715	0,04977	9,88E+05	8,82E-04
3,251	0,00325	411,749	0,05320	1,24E+06	7,49E-04
3,384	0,00338	451,406	0,05745	1,65E+06	6,16E-04
3,518	0,00352	485,261	0,06246	2,27E+06	4,83E-04
3,651	0,00365	533,342	0,06786	3,44E+06	3,49E-04
3,784	0,00378	577,847	0,07396	6,03E+06	2,16E-04
3,917	0,00392	629,981	0,08055	1,72E+07	8,27E-05
4,051	0,00405	684,579	0,08758	-3,05E+07	-5,05E-05
4,184	0,00418	746,012	0,09531	-9,15E+06	-1,84E-04
4,317	0,00432	819,286	0,10429	-5,82E+06	-3,17E-04
4,450	0,00445	904,083	0,11482	-4,52E+06	-4,50E-04
4,584	0,00458	999,610	0,12683	-3,86E+06	-5,84E-04
4,717	0,00472	1107,693	0,14040	-3,48E+06	-7,17E-04
4,850	0,00485	1233,180	0,15596	-3,27E+06	-8,50E-04
4,983	0,00498	1369,874	0,17343	-3,14E+06	-9,83E-04
5,117	0,00512	1523,972	0,19280	-3,08E+06	-1,12E-03
5,250	0,00525	1704,375	0,21489	-3,07E+06	-1,25E-03
5,383	0,00538	1908,938	0,24096	-3,11E+06	-1,38E-03
5,516	0,00552	2138,774	0,26968	-3,18E+06	-1,52E-03
5,649	0,00565	2394,994	0,30178	-3,27E+06	-1,65E-03
5,783	0,00578	2678,712	0,33804	-3,39E+06	-1,78E-03
5,916	0,00592	3006,538	0,37878	-3,54E+06	-1,92E-03
6,049	0,00605	3362,973	0,42397	-3,70E+06	-2,05E-03
6,182	0,00618	3790,458	0,47660	-3,91E+06	-2,18E-03
6,316	0,00632	4294,634	0,53867	-4,18E+06	-2,32E-03
6,449	0,00645	4874,388	0,61031	-4,49E+06	-2,45E-03
6,582	0,00658	5522,171	0,69267	-4,82E+06	-2,58E-03
6,715	0,00672	6170,829	0,77905	-5,12E+06	-2,72E-03
6,849	0,00685	6594,737	0,85130	-5,22E+06	-2,85E-03
6,982	0,00698	6905,556	0,90030	-5,22E+06	-2,98E-03
7,116	0,00712	6676,912	0,90918	-4,83E+06	-3,12E-03
7,249	0,00725	6884,098	0,90096	-4,78E+06	-3,25E-03
7,382	0,00738	6939,968	0,92017	-4,62E+06	-3,38E-03
7,515	0,00751	7175,604	0,93956	-4,60E+06	-3,51E-03
7,648	0,00765	7609,526	0,98321	-4,70E+06	-3,65E-03
7,781	0,00778	8108,377	1,04819	-4,83E+06	-3,78E-03
7,914	0,00791	8695,762	1,11853	-5,01E+06	-3,91E-03
8,048	0,00805	9330,193	1,19986	-5,19E+06	-4,05E-03
8,181	0,00818	10086,460	1,29485	-5,44E+06	-4,18E-03
8,314	0,00831	10952,470	1,39908	-5,72E+06	-4,31E-03
8,447	0,00845	11930,150	1,52171	-6,05E+06	-4,45E-03
8,580	0,00858	13009,550	1,66161	-6,40E+06	-4,58E-03
8,713	0,00871	14216,980	1,81225	-6,80E+06	-4,71E-03
8,847	0,00885	15520,490	1,98126	-7,22E+06	-4,85E-03
8,980	0,00898	17010,290	2,16535	-7,70E+06	-4,98E-03

**APÉNDICE F**  
**PROBETA DE FIBRA DE VIDRIO PURA**

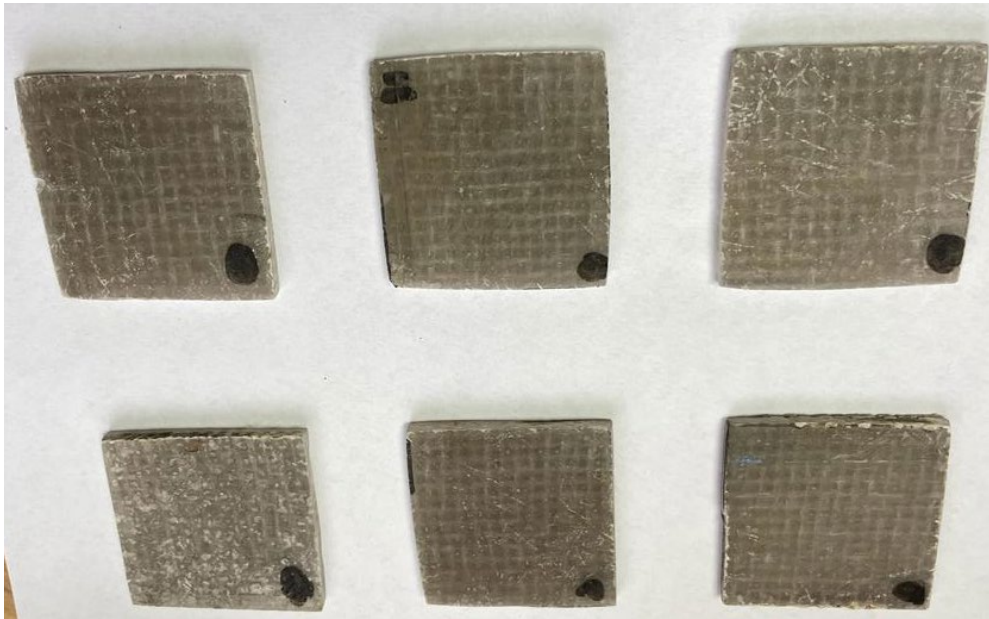


Figura F.1 Probetas de fibra de vidrio

## RESULTADOS NUMÉRICOS DURANTE ENSAYOS FIBRA DE VIDRIO PURA

### Tabla F.1 Resultado para ensayo de 9 mm

9 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,0000	0,000000				
0,0090	0,000009	3,50	0,000016	1,40E+03	4,99E-03
0,0323	0,000032	11,44	0,000174	4,61E+03	4,97E-03
0,0603	0,000060	16,85	0,000396	6,82E+03	4,94E-03
0,0909	0,000091	13,91	0,000471	5,67E+03	4,91E-03
0,1891	0,000189	17,96	0,000549	7,47E+03	4,81E-03
0,2225	0,000223	16,69	0,000578	6,99E+03	4,78E-03
0,2559	0,000256	17,25	0,000566	7,27E+03	4,74E-03
0,9888	0,000989	48,40	0,001449	2,41E+04	4,01E-03
1,0221	0,001022	62,70	0,001854	3,15E+04	3,98E-03
1,0888	0,001089	96,72	0,002879	4,95E+04	3,91E-03
1,1220	0,001122	125,25	0,003690	6,46E+04	3,88E-03
1,1553	0,001155	158,15	0,004712	8,23E+04	3,84E-03
1,1886	0,001189	203,61	0,006037	1,07E+05	3,81E-03
1,2219	0,001222	263,45	0,007765	1,39E+05	3,78E-03
1,2553	0,001255	340,30	0,010075	1,82E+05	3,74E-03
1,2885	0,001289	442,58	0,013015	2,38E+05	3,71E-03
1,3219	0,001322	574,75	0,016977	3,13E+05	3,68E-03
1,3550	0,001355	741,24	0,021796	4,07E+05	3,65E-03
1,3884	0,001388	957,33	0,028345	5,30E+05	3,61E-03
1,4216	0,001422	1215,54	0,036124	6,79E+05	3,58E-03
1,4549	0,001455	1516,10	0,045414	8,55E+05	3,55E-03
1,5549	0,001555	2651,93	0,081212	1,54E+06	3,45E-03
1,6213	0,001621	3603,38	0,111031	2,13E+06	3,38E-03
1,7544	0,001754	6189,35	0,192833	3,81E+06	3,25E-03
1,7876	0,001788	6985,90	0,219039	4,35E+06	3,21E-03
2,0204	0,002020	15036,50	0,473309	1,01E+07	2,98E-03
2,0536	0,002054	16627,79	0,526419	1,13E+07	2,95E-03
2,3191	0,002319	34931,66	1,102399	2,61E+07	2,68E-03
2,3523	0,002352	38676,18	1,219130	2,92E+07	2,65E-03
2,3853	0,002385	42880,85	1,345691	3,28E+07	2,61E-03
2,4183	0,002418	47585,65	1,492697	3,69E+07	2,58E-03
2,4511	0,002451	52872,66	1,651283	4,15E+07	2,55E-03
2,4840	0,002484	58877,31	1,836890	4,68E+07	2,52E-03
2,5169	0,002517	65579,34	2,045756	5,28E+07	2,48E-03
2,5829	0,002583	80814,76	2,536239	6,69E+07	2,42E-03
2,6160	0,002616	89199,63	2,815863	7,48E+07	2,38E-03
2,6490	0,002649	98055,68	3,089713	8,34E+07	2,35E-03
2,6823	0,002682	107304,20	3,414108	9,26E+07	2,32E-03
2,8478	0,002848	157516,80	5,063448	1,46E+08	2,15E-03
2,8809	0,002881	168122,90	5,393408	1,59E+08	2,12E-03
2,9141	0,002914	178834,40	5,768165	1,71E+08	2,09E-03
2,9471	0,002947	189647,40	6,079950	1,85E+08	2,05E-03
2,9801	0,002980	200529,70	6,437922	1,99E+08	2,02E-03
3,0133	0,003013	211463,10	6,823631	2,13E+08	1,99E-03
3,0798	0,003080	233604,30	7,582847	2,43E+08	1,92E-03
3,2793	0,003279	300842,00	9,852692	3,50E+08	1,72E-03
3,4123	0,003412	345903,70	11,314224	4,36E+08	1,59E-03
3,5454	0,003545	390585,80	12,850014	5,37E+08	1,45E-03
3,5788	0,003579	401618,20	13,219904	5,65E+08	1,42E-03

**Tabla F.2 Resultado para ensayo de 9.5 mm**

9.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,0000	0,00000	1,35			
0,0091	0,00001	2,78	0,0000	1,11E+03	4,99E-03
0,0323	0,00003	2,94	0,0001	1,18E+03	4,97E-03
0,0606	0,00006	8,74	0,0002	3,54E+03	4,94E-03
0,0910	0,00009	7,39	0,0002	3,01E+03	4,91E-03
0,1895	0,00019	12,87	0,0004	5,35E+03	4,81E-03
0,2228	0,00022	14,07	0,0004	5,89E+03	4,78E-03
0,2560	0,00026	13,11	0,0005	5,53E+03	4,74E-03
0,9889	0,00099	31,63	0,0011	1,58E+04	4,01E-03
1,0224	0,00102	31,31	0,0011	1,57E+04	3,98E-03
1,0889	0,00109	29,25	0,0010	1,50E+04	3,91E-03
1,1221	0,00112	30,84	0,0010	1,59E+04	3,88E-03
1,1555	0,00116	33,86	0,0011	1,76E+04	3,84E-03
1,1889	0,00119	33,78	0,0011	1,77E+04	3,81E-03
1,2223	0,00122	32,19	0,0011	1,70E+04	3,78E-03
1,2554	0,00126	30,76	0,0010	1,64E+04	3,74E-03
1,2888	0,00129	33,62	0,0011	1,81E+04	3,71E-03
1,3220	0,00132	33,78	0,0011	1,84E+04	3,68E-03
1,3554	0,00136	36,24	0,0012	1,99E+04	3,64E-03
1,3888	0,00139	43,39	0,0013	2,40E+04	3,61E-03
1,4220	0,00142	55,63	0,0016	3,11E+04	3,58E-03
1,4553	0,00146	68,74	0,0021	3,88E+04	3,54E-03
1,5553	0,00156	139,00	0,0041	8,07E+04	3,44E-03
1,6219	0,00162	218,31	0,0065	1,29E+05	3,38E-03
1,7550	0,00176	450,61	0,0139	2,78E+05	3,25E-03
1,7884	0,00179	540,42	0,0165	3,37E+05	3,21E-03
2,0214	0,00202	2432,35	0,0739	1,63E+06	2,98E-03
2,0548	0,00205	2882,08	0,0887	1,96E+06	2,95E-03
2,3210	0,00232	7323,82	0,2327	5,47E+06	2,68E-03
2,3543	0,00235	8035,10	0,2553	6,07E+06	2,65E-03
2,3876	0,00239	8791,29	0,2808	6,73E+06	2,61E-03
2,4210	0,00242	9600,88	0,3069	7,45E+06	2,58E-03
2,4543	0,00245	10531,98	0,3347	8,27E+06	2,55E-03
2,4874	0,00249	11621,87	0,3669	9,25E+06	2,51E-03
2,5205	0,00252	12802,92	0,4045	1,03E+07	2,48E-03
2,5870	0,00259	15411,30	0,4900	1,28E+07	2,41E-03
2,6204	0,00262	16892,59	0,5391	1,42E+07	2,38E-03
2,6536	0,00265	18481,73	0,5881	1,58E+07	2,35E-03
2,6869	0,00269	20114,42	0,6417	1,74E+07	2,31E-03
2,8524	0,00285	31970,66	1,0008	2,98E+07	2,15E-03
2,8854	0,00289	35907,11	1,1200	3,40E+07	2,11E-03
2,9183	0,00292	40570,57	1,2571	3,90E+07	2,08E-03
2,9511	0,00295	46020,75	1,4233	4,49E+07	2,05E-03
2,9839	0,00298	52280,35	1,6097	5,19E+07	2,02E-03
3,0168	0,00302	59282,70	1,8338	5,98E+07	1,98E-03
3,0828	0,00308	75211,45	2,3550	7,85E+07	1,92E-03
3,2813	0,00328	132499,00	4,2191	1,54E+08	1,72E-03
3,4139	0,00341	175413,50	5,6285	2,21E+08	1,59E-03
3,5461	0,00355	220435,20	7,1126	3,03E+08	1,45E-03
3,5795	0,00358	231950,80	7,5492	3,27E+08	1,4E-03

**Tabla F.3 Resultado para ensayo de 10 mm**

10 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,000	0,00000				
0,009	0,00001				
0,033	0,00003	0,64	0,0000	2,56E+02	4,97E-03
0,061	0,00006	5,40	0,0001	2,19E+03	4,94E-03
0,091	0,00009	9,30	0,0002	3,79E+03	4,91E-03
0,190	0,00019	12,48	0,0004	5,19E+03	4,81E-03
0,223	0,00022	18,76	0,0005	7,85E+03	4,78E-03
0,256	0,00026	17,48	0,0006	7,37E+03	4,74E-03
0,989	0,00099	35,29	0,0011	1,76E+04	4,01E-03
1,022	0,00102	44,35	0,0013	2,23E+04	3,98E-03
1,089	0,00109	46,09	0,0015	2,36E+04	3,91E-03
1,122	0,00112	48,32	0,0016	2,49E+04	3,88E-03
1,156	0,00116	49,51	0,0016	2,58E+04	3,84E-03
1,189	0,00119	51,26	0,0017	2,69E+04	3,81E-03
1,222	0,00122	59,13	0,0018	3,13E+04	3,78E-03
1,256	0,00126	67,95	0,0021	3,63E+04	3,74E-03
1,289	0,00129	71,84	0,0023	3,87E+04	3,71E-03
1,322	0,00132	74,39	0,0024	4,05E+04	3,68E-03
1,356	0,00136	82,41	0,0026	4,52E+04	3,64E-03
1,389	0,00139	87,74	0,0028	4,86E+04	3,61E-03
1,422	0,00142	92,98	0,0030	5,20E+04	3,58E-03
1,456	0,00146	107,53	0,0033	6,07E+04	3,54E-03
1,555	0,00156	165,07	0,0051	9,58E+04	3,44E-03
1,622	0,00162	220,06	0,0069	1,30E+05	3,38E-03
1,755	0,00176	411,43	0,0127	2,54E+05	3,24E-03
1,789	0,00179	481,61	0,0148	3,00E+05	3,21E-03
2,022	0,00202	1275,54	0,0397	8,57E+05	2,98E-03
2,055	0,00206	1446,49	0,0458	9,82E+05	2,94E-03
2,322	0,00232	3588,28	0,1126	2,68E+06	2,68E-03
2,355	0,00235	3996,61	0,1261	3,02E+06	2,65E-03
2,388	0,00239	4427,67	0,1406	3,39E+06	2,61E-03
2,421	0,00242	4889,49	0,1549	3,79E+06	2,58E-03
2,455	0,00245	5394,70	0,1710	4,24E+06	2,55E-03
2,488	0,00249	6025,31	0,1906	4,80E+06	2,51E-03
2,521	0,00252	6781,26	0,2129	5,47E+06	2,48E-03
2,588	0,00259	8563,28	0,2681	7,10E+06	2,41E-03
2,621	0,00262	9593,17	0,3030	8,06E+06	2,38E-03
2,654	0,00265	10849,32	0,3386	9,25E+06	2,35E-03
2,687	0,00269	12391,57	0,3864	1,07E+07	2,31E-03
2,852	0,00285	27217,55	0,8234	2,53E+07	2,15E-03
2,885	0,00288	32433,19	0,9768	3,07E+07	2,12E-03
2,918	0,00292	38511,59	1,1662	3,70E+07	2,08E-03
2,951	0,00295	45417,23	1,3796	4,43E+07	2,05E-03
2,984	0,00298	53028,19	1,6243	5,26E+07	2,02E-03
3,017	0,00302	61237,57	1,8854	6,17E+07	1,98E-03
3,082	0,00308	79067,70	2,4586	8,25E+07	1,92E-03
3,281	0,00328	139673,50	4,4338	1,63E+08	1,72E-03
3,414	0,00341	183455,20	5,9151	2,31E+08	1,59E-03
3,547	0,00355	228673,20	7,3582	3,15E+08	1,45E-03
3,580	0,00358	240141,70	7,7647	3,38E+08	1,42E-03



**Tabla F.4 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

10.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,0000	0,00000				
0,0093	0,00001	2,78	0,0000	1,11E+03	4,99E-03
0,0323	0,00003	7,55	0,0001	3,04E+03	4,97E-03
0,0604	0,00006	8,90	0,0002	3,60E+03	4,94E-03
0,0909	0,00009	8,58	0,0003	3,50E+03	4,91E-03
0,1894	0,00019	10,81	0,0003	4,49E+03	4,81E-03
0,2226	0,00022	12,40	0,0004	5,19E+03	4,78E-03
0,2559	0,00026	11,60	0,0004	4,89E+03	4,74E-03
0,9889	0,00099	60,64	0,0019	3,02E+04	4,01E-03
1,0221	0,00102	74,23	0,0022	3,73E+04	3,98E-03
1,0888	0,00109	93,78	0,0029	4,80E+04	3,91E-03
1,1220	0,00112	107,13	0,0033	5,52E+04	3,88E-03
1,1554	0,00116	119,61	0,0038	6,22E+04	3,84E-03
1,1886	0,00119	137,65	0,0043	7,22E+04	3,81E-03
1,2220	0,00122	149,81	0,0048	7,93E+04	3,78E-03
1,2553	0,00126	170,23	0,0053	9,09E+04	3,74E-03
1,2885	0,00129	191,13	0,0060	1,03E+05	3,71E-03
1,3219	0,00132	213,46	0,0068	1,16E+05	3,68E-03
1,3553	0,00136	237,31	0,0075	1,30E+05	3,64E-03
1,3886	0,00139	255,82	0,0082	1,42E+05	3,61E-03
1,4220	0,00142	274,82	0,0089	1,54E+05	3,58E-03
1,4553	0,00146	300,96	0,0096	1,70E+05	3,54E-03
1,5551	0,00156	377,73	0,0121	2,19E+05	3,44E-03
1,6218	0,00162	463,88	0,0148	2,75E+05	3,38E-03
1,7550	0,00176	710,65	0,0224	4,38E+05	3,25E-03
1,7884	0,00179	804,27	0,0253	5,01E+05	3,21E-03
2,0213	0,00202	2407,79	0,0738	1,62E+06	2,98E-03
2,0545	0,00205	2863,96	0,0876	1,94E+06	2,95E-03
2,3206	0,00232	8948,80	0,2805	6,68E+06	2,68E-03
2,3538	0,00235	10153,13	0,3164	7,67E+06	2,65E-03
2,3871	0,00239	11600,65	0,3630	8,88E+06	2,61E-03
2,4203	0,00242	13175,73	0,4104	1,02E+07	2,58E-03
2,4536	0,00245	14882,09	0,4682	1,17E+07	2,55E-03
2,4868	0,00249	16693,04	0,5230	1,33E+07	2,51E-03
2,5199	0,00252	18623,35	0,5849	1,50E+07	2,48E-03
2,5864	0,00259	22863,15	0,7233	1,89E+07	2,41E-03
2,6196	0,00262	25371,07	0,8019	2,13E+07	2,38E-03
2,6528	0,00265	28252,13	0,8881	2,41E+07	2,35E-03
2,6858	0,00269	31651,26	0,9884	2,74E+07	2,31E-03
2,8500	0,00285	59796,57	1,8468	5,56E+07	2,15E-03
2,8830	0,00288	67684,89	2,1034	6,39E+07	2,12E-03
2,9161	0,00292	76085,41	2,3812	7,30E+07	2,08E-03
2,9493	0,00295	84945,76	2,6671	8,28E+07	2,05E-03
2,9823	0,00298	94192,66	2,9558	9,34E+07	2,02E-03
3,0153	0,00302	103753,30	3,2661	1,05E+08	1,98E-03
3,0815	0,00308	123747,00	3,9314	1,29E+08	1,92E-03
3,2801	0,00328	188503,20	6,0358	2,19E+08	1,72E-03
3,4133	0,00341	234566,90	7,6334	2,96E+08	1,59E-03
3,5459	0,00355	281742,40	9,1704	3,88E+08	1,45E-03
3,5791	0,00358	293683,40	9,5665	4,13E+08	1,42E-03

**Tabla F.5 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

11 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,0000	0,00000	0,87			
0,0093	0,00001	3,81	0,0000	1,53E+03	4,99E-03
0,0325	0,00003	9,93	0,0002	4,00E+03	4,97E-03
0,0605	0,00006	9,38	0,0003	3,80E+03	4,94E-03
0,0910	0,00009	11,92	0,0003	4,86E+03	4,91E-03
0,1895	0,00019	12,40	0,0004	5,15E+03	4,81E-03
0,2228	0,00022	11,60	0,0004	4,86E+03	4,78E-03
0,2560	0,00026	13,83	0,0004	5,83E+03	4,74E-03
0,9890	0,00099	39,97	0,0013	1,99E+04	4,01E-03
1,0224	0,00102	48,88	0,0015	2,46E+04	3,98E-03
1,0889	0,00109	76,29	0,0023	3,90E+04	3,91E-03
1,1221	0,00112	92,67	0,0028	4,78E+04	3,88E-03
1,1555	0,00116	106,02	0,0033	5,52E+04	3,84E-03
1,1888	0,00119	126,76	0,0039	6,65E+04	3,81E-03
1,2223	0,00122	142,73	0,0045	7,56E+04	3,78E-03
1,2555	0,00126	164,11	0,0051	8,77E+04	3,74E-03
1,2888	0,00129	189,38	0,0059	1,02E+05	3,71E-03
1,3221	0,00132	212,35	0,0067	1,15E+05	3,68E-03
1,3554	0,00136	243,43	0,0076	1,34E+05	3,64E-03
1,3888	0,00139	274,26	0,0086	1,52E+05	3,61E-03
1,4220	0,00142	309,79	0,0097	1,73E+05	3,58E-03
1,4554	0,00146	353,34	0,0111	1,99E+05	3,54E-03
1,5551	0,00156	540,65	0,0166	3,14E+05	3,44E-03
1,6220	0,00162	732,42	0,0229	4,34E+05	3,38E-03
1,7550	0,00176	1466,43	0,0449	9,04E+05	3,25E-03
1,7883	0,00179	1750,87	0,0535	1,09E+06	3,21E-03
2,0214	0,00202	4841,41	0,1513	3,25E+06	2,98E-03
2,0546	0,00205	5537,03	0,1725	3,76E+06	2,95E-03
2,3206	0,00232	13325,29	0,4200	9,95E+06	2,68E-03
2,3539	0,00235	14678,96	0,4656	1,11E+07	2,65E-03
2,3873	0,00239	16080,30	0,5133	1,23E+07	2,61E-03
2,4204	0,00242	17525,67	0,5566	1,36E+07	2,58E-03
2,4538	0,00245	19012,77	0,6097	1,49E+07	2,55E-03
2,4871	0,00249	20469,59	0,6589	1,63E+07	2,51E-03
2,5205	0,00252	21765,15	0,7048	1,76E+07	2,48E-03
2,5870	0,00259	24443,15	0,7899	2,03E+07	2,41E-03
2,6201	0,00262	26270,39	0,8399	2,21E+07	2,38E-03
2,6533	0,00265	28668,88	0,9099	2,44E+07	2,35E-03
2,6863	0,00269	31662,62	0,9955	2,74E+07	2,31E-03
2,8504	0,00285	58029,57	1,7954	5,40E+07	2,15E-03
2,8834	0,00288	65493,90	2,0381	6,19E+07	2,12E-03
2,9164	0,00292	73501,27	2,2934	7,06E+07	2,08E-03
2,9495	0,00295	81967,12	2,5749	7,99E+07	2,05E-03
2,9826	0,00298	90816,66	2,8617	9,00E+07	2,02E-03
3,0158	0,00302	100023,80	3,1608	1,01E+08	1,98E-03
3,0819	0,00308	119316,70	3,7906	1,24E+08	1,92E-03
3,2808	0,00328	182077,10	5,8512	2,12E+08	1,72E-03
3,4133	0,00341	226534,00	7,3448	2,86E+08	1,59E-03
3,5461	0,00355	272423,40	8,8656	3,75E+08	1,45E-03
3,5793	0,00358	284025,20	9,2162	4,00E+08	1,42E-03

**APÉNDICE G**

## PROBETA DE MATERIAL AUXÉTICO LAMINADA EN FIBRA DE VIDRIO

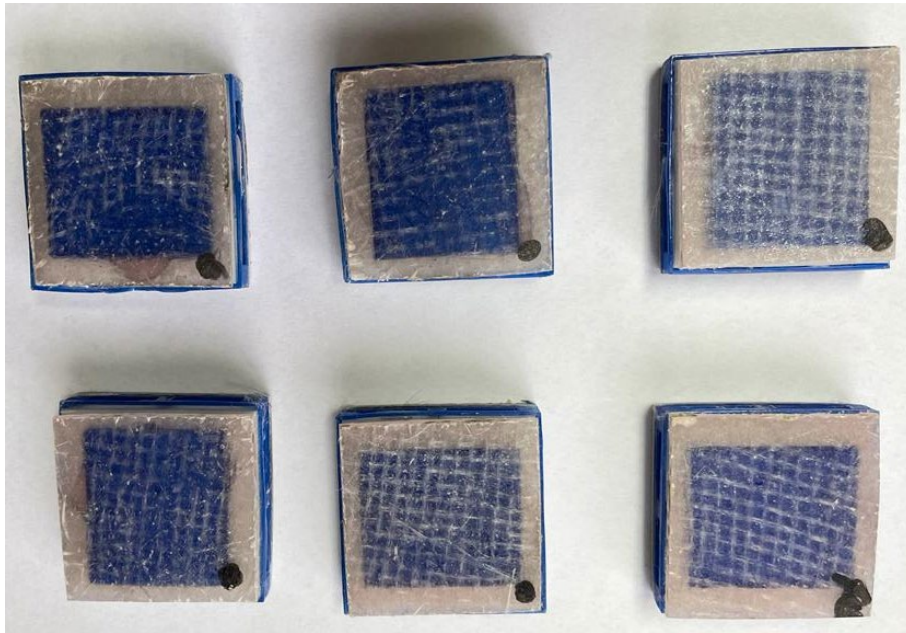


Figura G.1 Vista frontal de las probetas laminadas

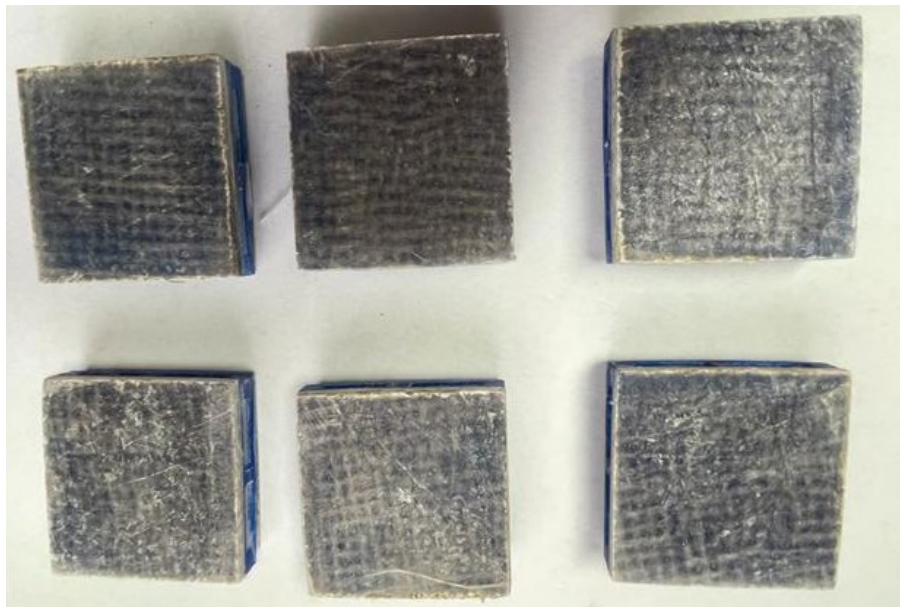


Figura G.2 Vista posterior de las probetas laminadas

## PROBETA DE MATERIAL AUXÉTICO LAMINADA EN FIBRA DE VIDRIO – RESULTADOS NUMERICOS

**Tabla G.1 Resultado para ensayo de 9 mm**

9 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,000	0,0000	-3,50			
0,590	0,0006	44,27	0,006	2,01E+04	4,41E-03
0,720	0,0007	56,11	0,007	2,62E+04	4,28E-03
0,850	0,0009	61,51	0,008	2,96E+04	4,15E-03
0,980	0,0010	69,70	0,009	3,47E+04	4,02E-03
1,780	0,0018	210,76	0,024	1,31E+05	3,22E-03
2,850	0,0029	933,17	0,112	8,68E+05	2,15E-03
2,980	0,0030	1084,49	0,131	1,07E+06	2,02E-03
3,780	0,0038	2530,50	0,307	4,15E+06	1,22E-03
3,920	0,0039	2998,91	0,387	5,55E+06	1,08E-03
4,050	0,0041	3541,07	0,425	7,45E+06	9,50E-04
4,180	0,0042	4159,53	0,501	1,01E+07	8,20E-04
4,720	0,0047	7570,11	0,991	5,41E+07	2,80E-04
4,850	0,0049	8605,80	1,051	1,15E+08	1,50E-04
4,980	0,0050	9709,84	1,191	9,71E+08	2,00E-05
5,110	0,0051	10861,79	1,337	-1,97E+08	-1,10E-04
5,250	0,0053	12031,95	1,603	-9,63E+07	-2,50E-04
5,380	0,0054	13211,97	1,641	-6,95E+07	-3,80E-04
5,510	0,0055	14416,46	1,796	-5,65E+07	-5,10E-04
5,650	0,0057	15767,81	2,113	-4,85E+07	-6,50E-04
5,910	0,0059	19048,37	2,362	-4,19E+07	-9,10E-04
6,050	0,0061	20931,80	2,799	-3,99E+07	-1,05E-03
6,180	0,0062	22970,52	2,854	-3,89E+07	-1,18E-03
6,310	0,0063	25276,50	3,136	-3,86E+07	-1,31E-03
6,580	0,0066	30885,30	3,822	-3,91E+07	-1,58E-03
6,710	0,0067	34294,45	4,237	-4,01E+07	-1,71E-03
6,840	0,0068	38012,66	4,700	-4,13E+07	-1,84E-03
7,510	0,0075	62974,93	8,405	-5,02E+07	-2,51E-03
7,640	0,0076	69284,91	8,597	-5,25E+07	-2,64E-03
7,770	0,0078	76052,83	9,447	-5,49E+07	-2,77E-03
7,900	0,0079	83239,32	10,354	-5,74E+07	-2,90E-03
8,030	0,0080	90739,88	11,309	-5,99E+07	-3,03E-03
8,550	0,0086	123691,80	15,502	-6,97E+07	-3,55E-03
9,030	0,0090	146267,60	11,884	-7,26E+07	-4,03E-03
9,000	0,0090	130885,70	-4,157	-6,54E+07	-4,00E-03

**Tabla G.2 Resultado para ensayo de 9.5 mm**

9.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,000	0,0000	-2,07			
0,586	0,0006	19,07	0,003	8,64E+03	4,41E-03
0,719	0,0007	17,64	0,002	8,24E+03	4,28E-03
0,852	0,0009	23,44	0,003	1,13E+04	4,15E-03
0,985	0,0010	33,86	0,004	1,69E+04	4,01E-03
1,785	0,0018	231,58	0,027	1,44E+05	3,22E-03
2,851	0,0029	938,89	0,117	8,74E+05	2,15E-03
2,984	0,0030	1063,82	0,133	1,06E+06	2,02E-03
3,784	0,0038	2419,31	0,297	3,98E+06	1,22E-03
3,917	0,0039	2881,13	0,353	5,32E+06	1,08E-03
4,050	0,0041	3422,74	0,420	7,21E+06	9,50E-04
4,183	0,0042	4060,11	0,498	9,94E+06	8,17E-04
4,716	0,0047	7744,63	0,961	5,45E+07	2,84E-04
4,849	0,0048	8836,27	1,104	1,17E+08	1,51E-04
4,982	0,0050	9883,24	1,248	1,12E+09	1,76E-05
5,116	0,0051	10907,65	1,386	-1,88E+08	-1,16E-04
5,249	0,0052	11930,39	1,520	-9,59E+07	-2,49E-04
5,382	0,0054	12885,01	1,655	-6,74E+07	-3,82E-04
5,516	0,0055	13913,55	1,785	-5,40E+07	-5,16E-04
5,649	0,0056	14998,67	1,924	-4,62E+07	-6,49E-04
5,915	0,0059	17554,76	2,253	-3,84E+07	-9,15E-04
6,048	0,0060	19169,89	2,440	-3,66E+07	-1,05E-03
6,181	0,0062	21016,99	2,672	-3,56E+07	-1,18E-03
6,314	0,0063	23317,10	2,945	-3,55E+07	-1,31E-03
6,580	0,0066	28760,35	3,632	-3,64E+07	-1,58E-03
6,712	0,0067	31958,18	4,026	-3,73E+07	-1,71E-03
6,845	0,0068	35634,60	4,486	-3,86E+07	-1,84E-03
7,508	0,0075	60113,99	7,582	-4,79E+07	-2,51E-03
7,640	0,0076	66372,23	8,372	-5,03E+07	-2,64E-03
7,773	0,0078	73134,42	9,234	-5,28E+07	-2,77E-03
7,905	0,0079	80352,63	10,130	-5,53E+07	-2,90E-03
8,036	0,0080	88035,98	11,103	-5,80E+07	-3,04E-03
8,551	0,0086	122034,70	14,945	-6,87E+07	-3,55E-03
9,214	0,0092	175009,90	43,486	-8,31E+07	-4,21E-03
9,347	0,0093	185467,40	24,017	-8,53E+07	-4,35E-03

**Tabla G.3 Resultado para ensayo de 10 mm**

10 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,00	0,0000	2,86			
0,59	0,0006	23,44	0,003	1,06E+04	4,41E-03
0,72	0,0007	28,05	0,003	1,31E+04	4,28E-03
0,99	0,0010	39,50	0,009	1,97E+04	4,01E-03
1,12	0,0011	43,23	0,006	2,23E+04	3,88E-03
1,92	0,0019	110,79	0,013	7,19E+04	3,08E-03
2,98	0,0030	582,06	0,072	5,78E+05	2,02E-03
3,12	0,0031	681,08	0,084	7,24E+05	1,88E-03
3,92	0,0039	1527,95	0,191	2,82E+06	1,08E-03
4,05	0,0041	1729,73	0,217	3,64E+06	9,49E-04
4,18	0,0042	1959,32	0,246	4,80E+06	8,16E-04
4,32	0,0043	2211,09	0,278	6,48E+06	6,83E-04
4,85	0,0049	3476,46	0,438	4,64E+07	1,50E-04
4,98	0,0050	3889,32	0,491	4,68E+08	1,66E-05
5,12	0,0051	4324,75	0,547	-7,42E+07	-1,17E-04
5,25	0,0052	4812,32	0,609	-3,85E+07	-2,50E-04
5,38	0,0054	5313,08	0,674	-2,78E+07	-3,83E-04
5,52	0,0055	5857,63	0,744	-2,27E+07	-5,16E-04
5,65	0,0056	6475,05	0,822	-1,99E+07	-6,49E-04
5,78	0,0058	7119,18	0,905	-1,82E+07	-7,83E-04
6,05	0,0060	8782,70	1,110	-1,67E+07	-1,05E-03
6,18	0,0062	9769,44	1,236	-1,65E+07	-1,18E-03
6,32	0,0063	10894,85	1,375	-1,66E+07	-1,32E-03
6,45	0,0064	12215,93	1,538	-1,69E+07	-1,45E-03
6,71	0,0067	15488,94	1,945	-1,81E+07	-1,71E-03
6,85	0,0068	17589,25	2,200	-1,90E+07	-1,85E-03
6,98	0,0070	20159,72	2,506	-2,04E+07	-1,98E-03
7,64	0,0076	41297,91	5,138	-3,12E+07	-2,64E-03
7,78	0,0078	47003,59	5,850	-3,39E+07	-2,78E-03
7,91	0,0079	53569,79	6,638	-3,68E+07	-2,91E-03
8,04	0,0080	61213,26	7,554	-4,03E+07	-3,04E-03
8,17	0,0082	69841,15	8,601	-4,41E+07	-3,17E-03
8,69	0,0087	107856,50	12,934	-5,85E+07	-3,69E-03
9,35	0,0093	163376,70	40,332	-7,51E+07	-4,35E-03
9,48	0,0095	175048,20	22,505	-7,81E+07	-4,48E-03
9,61	0,0096	187207,10	24,022	-8,12E+07	-4,61E-03
10,00	0,0100	211042,30	77,161	-8,44E+07	-5,00E-03

**Tabla G.4 Resultado para ensayo de 10.5 mm**

10.5 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,000	0,0000	0,32			
0,587	0,0006	26,54	0,003	1,20E+04	4,41E-03
0,720	0,0007	30,04	0,004	1,40E+04	4,28E-03
0,854	0,0009	31,07	0,004	1,50E+04	4,15E-03
0,987	0,0010	31,87	0,004	1,59E+04	4,01E-03
1,787	0,0018	102,76	0,011	6,40E+04	3,21E-03
2,853	0,0029	821,35	0,101	7,65E+05	2,15E-03
2,986	0,0030	956,93	0,118	9,50E+05	2,01E-03
3,785	0,0038	2154,27	0,270	3,55E+06	1,21E-03
3,918	0,0039	2437,83	0,306	4,51E+06	1,08E-03
4,052	0,0041	2764,62	0,347	5,83E+06	9,48E-04
4,185	0,0042	3098,73	0,391	7,60E+06	8,15E-04
4,718	0,0047	4356,94	0,560	3,09E+07	2,82E-04
4,851	0,0049	4648,05	0,600	6,25E+07	1,49E-04
4,984	0,0050	4947,50	0,638	6,28E+08	1,57E-05
5,118	0,0051	5341,45	0,686	-9,08E+07	-1,18E-04
5,251	0,0053	5807,24	0,742	-4,63E+07	-2,51E-04
5,384	0,0054	6390,49	0,813	-3,33E+07	-3,84E-04
5,517	0,0055	7166,78	0,902	-2,77E+07	-5,17E-04
5,650	0,0057	8083,98	1,015	-2,49E+07	-6,50E-04
5,917	0,0059	10352,53	1,296	-2,26E+07	-9,17E-04
6,049	0,0060	11850,12	1,475	-2,26E+07	-1,05E-03
6,182	0,0062	13659,95	1,695	-2,31E+07	-1,18E-03
6,315	0,0063	15861,67	1,963	-2,41E+07	-1,32E-03
6,581	0,0066	21700,22	2,666	-2,75E+07	-1,58E-03
6,713	0,0067	25653,84	3,137	-2,99E+07	-1,71E-03
6,846	0,0068	30232,11	3,709	-3,28E+07	-1,85E-03
7,509	0,0075	59566,89	7,466	-4,75E+07	-2,51E-03
7,642	0,0076	66551,45	8,363	-5,04E+07	-2,64E-03
7,775	0,0078	73886,48	9,322	-5,33E+07	-2,77E-03
7,908	0,0079	81498,70	10,323	-5,61E+07	-2,91E-03
8,040	0,0080	89413,80	11,323	-5,88E+07	-3,04E-03
8,567	0,0086	126829,30	15,862	-7,11E+07	-3,57E-03
9,215	0,0092	186197,30	45,956	-8,84E+07	-4,21E-03
9,347	0,0093	199522,70	25,602	-9,18E+07	-4,35E-03
10,282	0,0103	273101,10	220,893	-1,03E+08	-5,28E-03
10,415	0,0104	281536,80	36,883	-1,04E+08	-5,42E-03



**Tabla G.5 Resultado para ensayo de 11 mm**

11 mm					
y [mm]	y [m]	F [N]	Ei [J]	K [Pa]	V [m/s]
0,00	0,00000	-1,83			
0,59	0,0006	29,25	0,004	1,33E+04	4,41E-03
0,72	0,0007	28,93	0,004	1,35E+04	4,28E-03
0,85	0,0009	32,66	0,004	1,58E+04	4,15E-03
0,99	0,0010	31,55	0,004	1,57E+04	4,01E-03
1,79	0,0018	178,02	0,021	1,11E+05	3,21E-03
2,85	0,0029	1077,18	0,129	1,00E+06	2,15E-03
2,99	0,0030	1274,90	0,165	1,27E+06	2,01E-03
3,79	0,0038	3586,69	0,457	5,91E+06	1,21E-03
3,92	0,0039	4347,32	0,516	8,04E+06	1,08E-03
4,05	0,0041	5236,07	0,623	1,10E+07	9,48E-04
4,19	0,0042	6263,81	0,805	1,54E+07	8,15E-04
4,72	0,0047	11086,07	1,467	7,86E+07	2,82E-04
4,85	0,0049	12219,83	1,515	1,64E+08	1,49E-04
4,98	0,0050	13332,84	1,661	1,69E+09	1,57E-05
5,12	0,0051	14419,48	1,943	-2,45E+08	-1,18E-04
5,25	0,0053	15454,37	1,942	-1,23E+08	-2,51E-04
5,38	0,0054	16674,76	2,088	-8,69E+07	-3,84E-04
5,52	0,0055	17954,27	2,424	-6,94E+07	-5,17E-04
5,65	0,0057	19339,48	2,424	-5,95E+07	-6,50E-04
5,92	0,0059	23144,80	3,097	-5,05E+07	-9,16E-04
6,05	0,0061	25382,04	3,154	-4,84E+07	-1,05E-03
6,18	0,0062	27959,90	3,467	-4,73E+07	-1,18E-03
6,32	0,0063	30906,44	4,121	-4,70E+07	-1,32E-03
6,58	0,0066	38257,68	4,721	-4,84E+07	-1,58E-03
6,71	0,0067	42543,25	5,252	-4,96E+07	-1,71E-03
6,85	0,0069	47282,78	6,288	-5,12E+07	-1,85E-03
7,51	0,0075	76919,63	9,568	-6,13E+07	-2,51E-03
7,64	0,0076	84045,25	10,463	-6,36E+07	-2,64E-03
7,78	0,0078	91533,98	12,291	-6,59E+07	-2,78E-03
7,91	0,0079	99263,35	12,402	-6,82E+07	-2,91E-03
8,04	0,0080	107191,20	13,420	-7,05E+07	-3,04E-03
8,57	0,0086	141668,50	17,833	-7,93E+07	-3,57E-03
9,10	0,0091	178609,50	22,624	-8,72E+07	-4,10E-03
9,22	0,0092	187388,30	21,960	-8,88E+07	-4,22E-03
9,35	0,0094	197740,40	25,033	-9,09E+07	-4,35E-03
9,48	0,0095	208355,20	26,396	-9,30E+07	-4,48E-03
9,62	0,0096	218698,90	29,894	-9,48E+07	-4,62E-03
9,75	0,0098	228459,30	29,065	-9,62E+07	-4,75E-03
9,88	0,0099	238339,50	30,342	-9,76E+07	-4,88E-03
10,02	0,0100	248232,10	34,060	-9,90E+07	-5,02E-03
10,15	0,0102	259370,90	32,994	-1,01E+08	-5,15E-03
10,68	0,0107	302377,00	38,670	-1,06E+08	-5,68E-03
10,82	0,0108	311294,00	42,957	-1,07E+08	-5,82E-03
10,95	0,0110	319090,50	40,975	-1,07E+08	-5,95E-03
10,93	0,0109	28086,00	-3,472	-9,47E+06	-5,93E-03
11,05	0,0111	300011,10	19,686	-9,92E+07	-6,05E-03
10,99	0,0110	257857,60	-5,216	-8,60E+07	-5,99E-03
11,05	0,0111	269019,40	15,806	-8,90E+07	-6,05E-03



**APÉNDICE H**  
**PROBETA DE MATERIAL AUXÉTICO LAMINADA EN FIBRA DE VIDRIO**

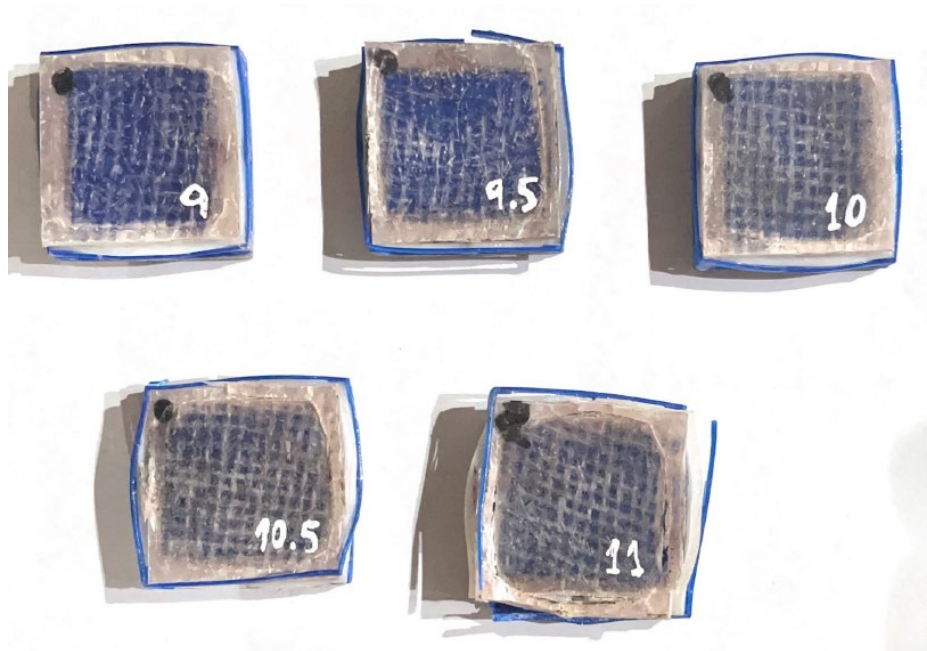


Figura H.1 Vista frontal de las probetas laminadas

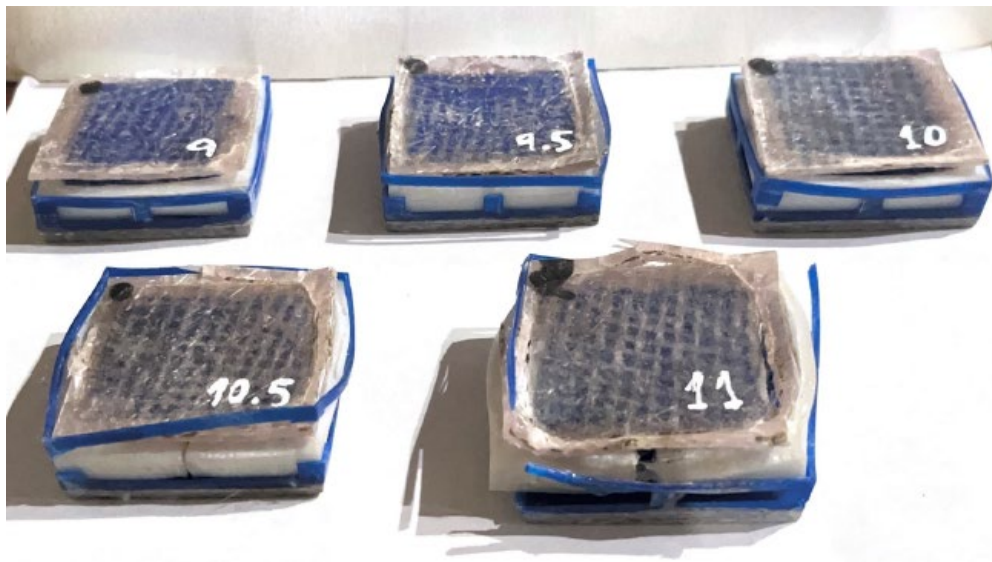


Figura H.2 Vista frontal de las probetas laminadas

## DIFERENCIA DE DAÑO ENTRE CAPAS DE FIBRA DE VIDRIO

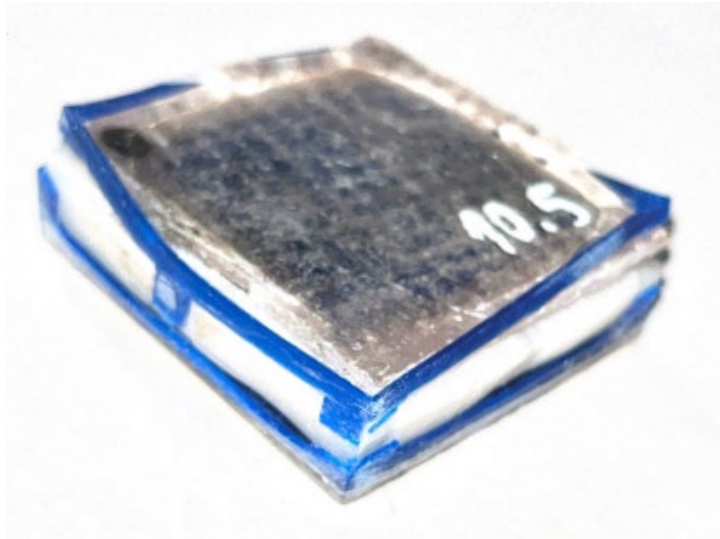


Figura H.3 Vista Isométrica anterior de las probetas laminadas, alto porcentaje de daño

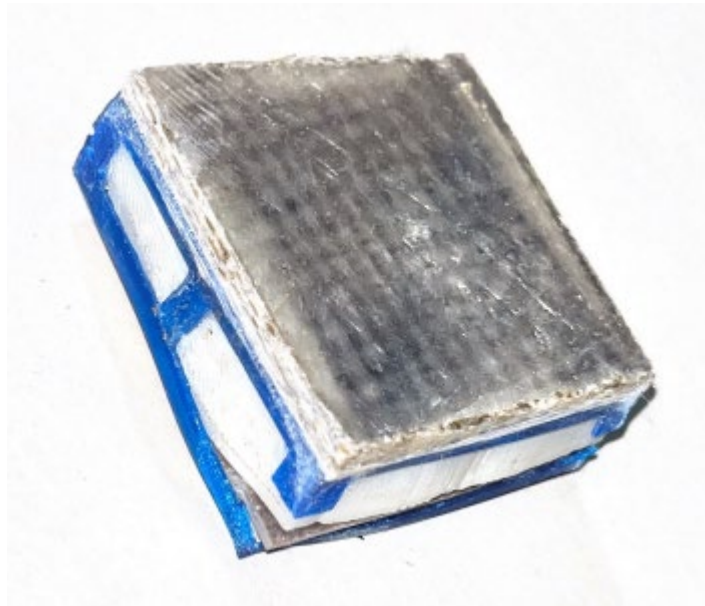


Figura H.4 Vista isométrica Posterior de las probetas laminadas, poco porcentaje de daño