

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Mejorar las propiedades mecánicas de un Catamarán de 49 m en construcción para las Islas Galápagos mediante la implementación de material auxético

INGE-2324

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Jurghen Porfirio Ramón Rodríguez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

A mi mamá y mis hermanos que, a pesar de la distancia física, su apoyo y amor incondicional ha sido mi inspiración y motivación a lo largo de esta travesía académica.

A mi abuelita, que me crio con amor y dedicación, y cuyos valores y sabiduría han sido mi brújula en la vida.

A Cinthya, mi confidente, cómplice y mi compañera de vida. Tu presencia ha convertido los desafíos en oportunidades y los éxitos en momentos aún más significativos. Este logro es nuestro, forjado con cada paso que dimos juntos.

A Sky, quien iluminó mi vida con su alegría y compañía. Aunque su presencia física ya no esté, su amor sigue vivo en mi corazón.

A todos quienes forman parte de mi historia, Gracias por ser mi fuente de inspiración, mi red de apoyo y mi razón para seguir adelante. Finalmente, gracias de mi para mí.

Jurghen Ramón Rodríguez

Agradecimientos

Con profundo agradecimiento a Dios por su guía constante, agradezco a mi director de tesis PhD. Patrick Townsend V. por su valiosa orientación. Reconozco al Ing. Rafael Espinosa, y a mi amigo, Alejandro Delgado por compartir sabiduría y conocimiento conmigo. A las empresas FAMORSA S.A. y MORATUR, gracias por hacer posible esta investigación. A mi novia, por su paciencia y colaboración en esta tesis. A todas las personas que contribuyeron a esta etapa académica, su apoyo ha sido fundamental. Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de un equipo extraordinario. ¡Gracias por ser parte de mi trayectoria!

Declaración Expresa

Yo Jurghen Ramón Rodríguez acuerdo reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de la cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficio que corresponda a favor de los autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizara publicaciones o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 31 de enero de 2024

Jurghen Porfirio Ramon Rodríguez

Evaluadores

MsC. María Tadea Quintuña

Profesor de Materia

PhD. Patrick R. Townsend V.

Tutor de proyecto

Resumen

En la industria naval ecuatoriana el principal material de construcción son los materiales compuestos, como es la fibra de vidrio, la cual es empleado en embarcaciones de placer, turístico e industrial. Así mismo, existen materiales como el material auxético, que ha ido ganando terreno en cada uno de las industrias, debido a que muestra una mejora de las propiedades mecánicas dentro de las distintas áreas implementadas. La presente investigación emplea mejora de los Plásticos reforzados de fibra de vidrios GFRP con el uso de láminas auxéticas cuya principal propiedad es devolver la energía de impactos aplicados sobre su superficie. Mediante el desarrollo de impresión 3D del componente auxético de segunda generación para la elaboración de probetas modificadas que fueron ensayadas y comparadas con los resultados de ensayos realizados a probetas extraídas de la construcción del buque seleccionado. Se desarrollan ensayos de flexión y tracción para establecer las mejoras en las propiedades mecánicas. Los resultados experimentales y las comparaciones realizadas permiten evaluar que el comportamiento del material de GFRP modificado con láminas auxéticas tiene una mejor respuesta a las tensiones.

Palabras Clave: Laminado, Auxético, Flexión, Tracción

Abstract

In the Ecuadorian naval industry, the main construction material is composite materials, such as fiberglass, which is used in pleasure, tourist and industrial boats. Likewise, there are materials such as auxetic material, which has been gaining ground in each of the industries, due to the fact that it shows an improvement in mechanical properties within the different areas implemented. The present research uses improvement of GFRP glass fiber reinforced plastics with the use of auxetic sheets whose main property is to return the energy of impacts applied on its surface. Through the development of 3D printing of the second-generation auxetic component for the production of modified specimens that were tested and compared with the results of tests carried out on specimens extracted from the construction of the selected vessel. Bending and tensile tests are carried out to establish improvements in mechanical properties. The experimental results and the comparisons made allow us to evaluate that the behavior of the GFRP material modified with auxetic sheets has a better response to stresses.

Keywords: Laminate, Auxetic, Flex, Tensile

Índice General

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice General.....	III
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas.....	VIII
Capítulo 1 Introducción.....	1
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 Material Auxético.....	5
1.4.2 Los materiales compuestos en la construcción naval.....	6
1.4.3 Laminados.....	7
1.4.4 Ensayos Destructivos.....	8
Capítulo 2.....	11
2. Metodología.....	12
2.1 Ensayo de Tracción.....	13
2.2 Ensayo de Flexión.....	13
2.3 Descripción de Equipos.....	14
2.3.1 CREALITY Ender 5 S1.....	14
2.3.2 Maquina SHIMADZU UH-FX.....	15

2.4	Diseño de Espécimen.....	16
2.4.1	Laminado del espécimen convencional.....	18
2.4.2	Fabricación de Material Auxético	19
2.4.3	Laminado del Espécimen con material auxético.....	21
2.5	Descripción de Ensayos.....	24
2.5.1	Diseño del ensayo de tracción	24
2.5.2	Diseño del ensayo de flexión.....	25
2.6	Resultados Esperados	25
2.6.1	Relación de Esfuerzo.....	26
Capítulo 3.....		28
3.	Resultados y Análisis	29
3.1	Resultados de los ensayos de tracción	29
3.1.1	Distribución de Fuerza vs tiempo.....	29
3.1.2	Distribución de Fuerza vs desplazamiento.....	30
3.2	Resultados de los ensayos de flexión	31
3.2.1	Distribución de Fuerza vs tiempo.....	31
3.2.2	Distribución de Fuerza vs desplazamiento.....	32
3.3	Resultados de Deformaciones Unitarias.....	34
3.3.1	Deformación Unitaria vs tiempo	34
3.4	Análisis de Resultados.....	35
Capítulo 4.....		40
4.	Conclusiones y Recomendaciones	41
4.1	Conclusiones.....	41
4.2	Recomendaciones	42
Bibliografía		44
Apéndices.....		46

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers
ISO	Internacional Organization for Standardization
PRFV	Plástico Reforzado de Fibra de Vidrio
LCD	Liquid Crystal Display
USB	Universal Serial Bus
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
UNESUM	Universidad Estatal del Sur de Manabí

Simbología

m	Metro
mm	Milímetro
s	Segundo
N	Newton
kN	Kilo Newton
J	Joule
σ	Esfuerzo

Índice de Figuras

Figura 1.1. Materiales a) Tela Mat y b) Tela Roving.....	7
Figura 1.2. Tipos de apilamiento de la fibra	8
Figura 2.1. Flujograma de la metodología experimental	12
Figura 2.2. Dimensiones de los Especímenes según ISO 527 – 4 Type II.....	13
Figura 2.3. Dimensiones de los Especímenes según ISO 14125 Type II.....	14
Figura 2.4. CREALITY Ender-5 S1.....	15
Figura 2.5. Maquina SHIMADZU UH-FX.....	16
Figura 2.6. Configuración del laminado convencional	18
Figura 2.7. Proceso de elaboración del laminado convencional	19
Figura 2.8. Fabricación del Material Auxético	20
Figura 2.9. Material Auxético para ensayos de tracción	20
Figura 2.10. Configuración del Material Auxético tipo "M"	21
Figura 2.11. Configuración del laminado con material auxético	22
Figura 2.12. Configuración de laminado con Material Auxético a) Tipo 1 y b) Tipo 2	23
Figura 2.13. Proceso de elaboración del laminado con material auxético	23
Figura 2.14. Ensayo de tracción en la Maquina SHIMADZU UH-FX.....	24
Figura 2.15. Ensayo de flexión en la Maquina SHIMADZU UH-FX	25
Figura 3.1. Curva de Fuerza de ruptura vs tiempo ensayos de tracción.....	30
Figura 3.2. Curva de Fuerza de ruptura vs desplazamiento ensayos de tracción.....	30
Figura 3.3. Curva de Fuerza de ruptura vs tiempo para ensayos de flexión	32
Figura 3.4. Curva de Fuerza de ruptura vs desplazamiento para ensayos de flexión.....	33
Figura 3.5. Curva de Deformación Unitaria vs tiempo para ensayos de tracción.....	34
Figura 3.6. Curva de Deformación Unitaria vs tiempo para ensayos de flexión	35
Figura 3.7. Resultado de los ensayos de flexión a) laminado simple b) material auxético.....	36
Figura 3.8. Resultado de los ensayos de tracción a) laminado simple b) material auxético	37
Figura 3.9. Resultados de la Energía para Ensayos de Tracción.....	38
Figura 3.10. Resultados de la Energía para Ensayos de Flexión.....	38

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Características del espécimen para ensayos de tracción con material auxético.....	17
Tabla 2.2. Características del espécimen para ensayos de flexión con material auxético	17
Tabla 2.3. Configuración del laminado con Material Auxético	22

Capítulo 1

1.1 Introducción

En el contexto de la construcción naval contemporánea, la implementación de tecnologías avanzadas y la búsqueda constante de mejoras en las propiedades mecánicas de las estructuras marinas son aspectos cruciales para garantizar la seguridad, eficiencia y cumplimiento de las normativas marítimas. En el marco de la construcción de embarcaciones de fibra de vidrio en el Ecuador, surge la necesidad de no solo asegurar la calidad del laminado utilizado en su construcción, sino también de explorar innovadoras soluciones que mejoren las propiedades mecánicas del material.

Una nueva clase de materiales que podría proporcionar más ventajas sobre los materiales utilizados actualmente son materiales auxéticos. Estos materiales tienen un coeficiente de Poisson negativo, ν , lo que significa que se expanden en dirección lateral cuando se estira longitudinalmente, es decir, en términos simples, ensanchan cuando se tiran. Los materiales auxéticos siguen siendo una clase de material emergente. Sin embargo, la investigación sobre los auxéticos comenzó y se puso en marcha a finales de los años 1980 con la fabricación de una espuma de poliuretano auxético. Desde entonces, una amplia gama se ha producido en gran cantidad, que cubren las principales clases de materiales (polímeros, compuestos, metales, y cerámica). (Alderson et al., 2007).

El efecto auxético ya ha encontrado varias aplicaciones en industrias muy diversas, como los sectores militar, biomédico, aeroespacial y textil. Esto ha sido posible gracias a la capacidad de sintetizar dichos materiales en casi cualquier tipo de material importante, incluidos polímeros, metales, cerámicas y compuestos. A lo largo de los últimos 30 años se transfirieron y ampliaron efectivamente una gran variedad de métodos desde las universidades y centros técnicos a la industria. Además, la combinación del comportamiento auxético y las técnicas de fabricación con

otros efectos conocidos, como la memoria de forma, el efecto electromagnético, los materiales nanoestructurados y otros, aumentaría en gran medida la gama de aplicaciones existentes e incluso podría mejorar las propiedades mecánicas y los mecanismos de deformación. (Sanami et al., 2014)

El presente trabajo, se analizará las propiedades mecánicas de los especímenes que contienen una capa de material auxético entre su plan de laminado, y compararlo con un plan de laminado simple convencional, utilizado para la construcción de un catamarán para las Islas Galápagos. Para esto se realizará pruebas de tracción y flexión para ambos tipos de laminado y comparar las propiedades resultantes de los resultados obtenidos.

1.2 Descripción del problema

La elaboración de laminados compuestos para la fabricación de embarcaciones enfrenta numerosas técnicas que van desde reglas generales empíricas hasta las reglas de las sociedades clasificadoras y a las técnicas numéricas avanzadas. (Miller, 2001). Así mismo, la selección del método correcto va a depender de gran medida del diseño, complejidad y requisitos del propietario.

La falla en los laminados compuestos se produce debido a una pérdida de rigidez, o fuerza. Esta pérdida se debe generalmente a los fenómenos de microcracking y delaminación. El microcracking genera pequeñas grietas en la matriz, lo que produce la discontinuidad de la carga; así mismo la delaminación es la separación de los elementos o capas del núcleo. Para determinar la pérdida de rigidez se logra únicamente mediante pruebas de prototipos. Y la pérdida de fuerza se produce por los criterios de tensión máxima, deformación máxima, Tsai-Wu o Hashin. (González-Cantero et al, 2018). Es por esto, que surge la necesidad de analizar la optimización del laminado implementando el material auxético para beneficiar no solo a la industria naval, sino a todos los ámbitos que involucran los materiales compuestos.

1.3 Justificación del problema

Los materiales auxéticos tienen la propiedad de expandirse cuando se estiran y contraerse cuando se comprimen, en contraste con la mayoría de los materiales que se comportan de manera opuesta. Estos materiales tienen interesantes propiedades de cortante, comportamientos de indentación, tenacidad a la fractura, curvatura sin clástica, absorción de energía y permeabilidad variable. (Elipe, 2017). Es por esto que los materiales auxéticos generan aplicaciones beneficiosas en la construcción de embarcaciones, lo que permite obtener beneficios y utilidad para sus propietarios.

Al analizar los beneficios de las propiedades del material auxético, se propone implementar dicho material en la construcción de embarcaciones. Este cambio en la laminación convencional podría incrementar la vida útil y propiedades mecánicas de la embarcación. Este trabajo generara beneficios para los propietarios, y personal que desee incrementar la resistencia y calidad de sus productos compuestos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Comparar las propiedades mecánicas del laminado simple usado en los refuerzos secundarios de un Catamarán en construcción de 49 m de eslora con un laminado de capas de material auxético mediante ensayos destructivos para optimizar la resistencia del laminado de fibra de vidrio.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar especímenes de prueba con capas de material auxético escalado mediante la norma ISO 14125 y ISO 527 - 4 para identificar sus beneficios en la industria naval.

2. Realizar pruebas de tracción y flexión de los especímenes de laminado simple y del laminado con capas de material auxético, para obtener las propiedades mecánicas resultantes.
3. Analizar los resultados de los ensayos destructivos contrastando la tendencia de resultados entre los dos tipos de laminados para determinar la eficiencia del uso del material auxético en la construcción naval.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Material Auxético

Los materiales comunes se contraen transversalmente bajo cargas a tracción y se expanden lateralmente cuando se comprimen, es decir, su coeficiente de Poisson es positivo. Cuando el material auxético es sometido a tensión en la dirección axial, este se expande en su sección transversal y de manera inversa, sucede una expansión en la sección transversal del material al ser comprimido, provocando que el coeficiente de Poisson sea negativo (Baron, 2016).

Debido a este coeficiente, este tipo de material presenta características particulares comparado con materiales comunes, por este motivo es utilizado para ajustar las propiedades mecánicas de una estructura con el objetivo de obtener un mayor rendimiento de la misma. Estas características son: mayor módulo de cizallamiento, mayor absorción de energía, mayor tenacidad a la fractura y finalmente mayor resistencia a la indentación (Jiménez, 2017).

1.5.1.1 Propiedades de los materiales auxéticos.

Según Yanping Liu y Hong Hu (2010) los materiales auxéticos presentan las siguientes propiedades:

- Resistencia a la fractura: los materiales auxéticos presentan una elevada resistencia a la fractura. Así como también, alta resistencia a la formación de grietas (Álvarez, 2017)

- Resistencia a la fractura: este tipo de material presenta una mayor resistencia a la penetración superficial por un objeto. Es decir, cuando el material es deformado por la presión de un objeto, este se contrae hacia el objeto, de tal forma que la penetración del material se vuelve más duro (Álvarez, 2017).
- Absorción de energía: los materiales auxéticos tienen mayor absorción de energía, ya sea de amortiguamiento, ultrasónica o acústica. (Álvarez, 2017).
- Cortadura: un material con coeficiente negativo es muy difícil de deformar a cortadura, pero fácil de deformar volumétricamente. (Álvarez, 2017).
- Permeabilidad variable: cuando el material es sometido a tracción se abren los poros, lo cual provoca una gran posibilidad de aplicaciones de filtración (Álvarez, 2017).

1.5.2 Los materiales compuestos en la construcción naval

El material compuesto más usado en la construcción de embarcaciones navales es el constituido por láminas de vidrio tipo E y la matriz de fibras de poliéster, ya que tienen una relación de calidad/precio, beneficiosa para la industria naval. A este material se lo conoce como PRFV (Poliéster reforzado con fibra de vidrio). (Haro Lisón, 2010).

Los plásticos reforzados con fibras cuentan con buenas propiedades mecánicas, facilidad de aplicación del material e innovación del diseño, estas características permiten que sea adecuado para construcción de algunos tipos de embarcaciones como los pesqueros, acuicultura, barco de turismo, recreo, deportivos, auxiliares, entre otros.

1.5.2.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material estructural compuesto, que consiste en la combinación de dos o más componentes, la combinación de estos componentes genera un material superior a cualquiera de los componentes solos. La fibra de vidrio se incorpora como refuerzo de una matriz

polimérica proporcionando una alta resistencia al calor, mecánica, química y una alta resistencia a la tracción; de esta manera este material compuesto presenta grandes ventajas en comparación con los materiales convencionales de construcción como el acero y el aluminio. Existen diferentes tipos de fibra de vidrio: tipo E, R, D, C y AR. Siendo la fibra de vidrio tipo E la más usada en cualquier tipo de industria (González, 2011).

Figura 1.1.

Materiales a) Tela Mat y b) Tela Roving



a)



b)

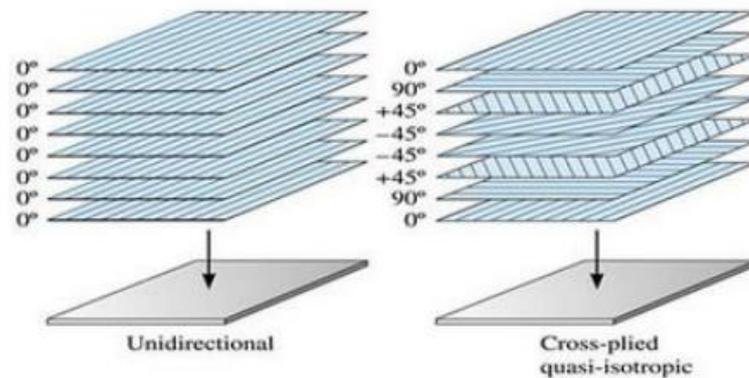
Nota: Figura tomada de Sánchez et al, 2017.

1.5.3 Laminados

Las fibras laminadas son capas orientadas en dirección a que ayuden al refuerzo o fuerza en dirección de la carga primaria, los cuales son muy fuertes unidireccionalmente (0°) y con rigidez en dirección 0° pero en dirección 90° son débiles. (Ortiz et al, 2017)

Figura 1.2.

Tipos de apilamiento de la fibra



Nota: Figura tomada de Ortiz et al, 2017

Existen tres tipos de láminas principalmente:

- Lámina unidireccional: Las láminas se encuentran orientadas en una sola dirección.
- Lámina tipo tejido: Las láminas están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí.
- Lamina tipo Mat: Esta compuesta por fibras cortadas aleatoriamente orientadas. Y tiene las mismas propiedades en todas sus direcciones.

1.5.4 Ensayos Destructivos

En el entorno industrial y técnico se necesita cada vez más determinar los controles de calidad de los materiales. En general los constructores, diseñadores, ingenieros, arquitectos, administrados entre otros están familiarizados con los ensayos destructivos y confían en los resultados de estos para tomar decisiones de importancia dentro de su ámbito de estudio. (Guzmán, 2005)

Los ensayos de materiales son una parte fundamental de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, para comprender el límite de los materiales mediante la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas.

1.5.4.1 Ensayo de Tracción

Los ensayos de materiales son una parte fundamental de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, para comprender el límite de los materiales mediante la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas. Los ensayos de tracción uniaxial son los ensayos más comunes para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Como resultado de estos ensayos se obtiene graficas como esfuerzo- elongación. De esa grafica se pueden calcular parámetros como módulo de corte, módulo de falla del material o modulo secante, entre otros. Para poder realizar los ensayos de tracción se necesita una muestra que se denomina probeta, las cuales están normalizadas bajo la norma ASTM. (Flores, 2014).

Las propiedades que pueden medirse al someter un material a un ensayo de tracción son las siguientes:

- Resistencia a la tensión: Indica la capacidad del material para resistirse al fallo y a la deformación.
- Punto de fluencia: tensión en la que la deformación aumenta sin que aumente la tensión.
- Resistencia a la tracción final: es el máximo estrés al que se expone un espécimen durante las pruebas.
- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.

1.5.4.2 Ensayos de Flexión

El ensayo de flexión de 3 puntos, también conocida como ensayo de flexión o ensayo de viga transversal, es la encargada de medir el comportamiento de los materiales en una geometría de carga de viga simple. Además, este tipo de pruebas proporcionan información sobre como

responden los materiales a diferentes combinaciones de fuerzas de tensión, compresión y corte. (Ahmed et al, 2022). Las propiedades del material que se pueden calcular a partir del ensayo de flexión son:

- ✓ Tensión de flexión
- ✓ Deformación por flexión
- ✓ Modulo elástico
- ✓ Tenacidad a la fractura

Las propiedades obtenidas del material en el ensayo de flexión son distintas a los datos recopilados de otros tipos de pruebas como tracción y compresión, debido a diferentes geometrías de carga. Como el ensayo de flexión de 3 puntos, existe también el ensayo de flexión de 4 puntos y de voladizo, que son otras técnicas que se pueden utilizar para estudiar la tensión de flexión en los materiales. (Mujika, 2006).

Capítulo 2

2. Metodología

Para identificar los beneficios que tienen el material auxético en la construcción de embarcaciones en fibra de vidrio, se realizaron ensayos de tracción y flexión de los especímenes de forma rectangular con laminado simple, adicionando en una de sus capas el material auxético.

Para este trabajo se realizó el método experimental, ya que la manera más óptima de determinar si existe una variación de resultados entre la manera convencional y el laminado con material auxético, es comparar los resultados experimentales obtenidos por ambos laminados.

Los especímenes para los ensayos de tracción fueron realizados bajo la Norma ISO 527 - 4 Type II y para los ensayos de flexión bajo la Norma ISO 14125 Type II. Ambos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción en la FICT utilizando la máquina SHIMADZU UH-FX para ensayos de tracción y flexión.

Además, se obtuvieron los resultados de los ensayos para las probetas realizados en la construcción del catamarán de 48 m de eslora, ya que con los mismos se realizó la comparación. Con los ensayos realizados, se puede analizar las propiedades mecánicas del laminado utilizando el material auxético. Los resultados se analizarán con las ecuaciones generales para las propiedades de los materiales compuestos.

Figura 2.1.

Flujograma de la metodología experimental



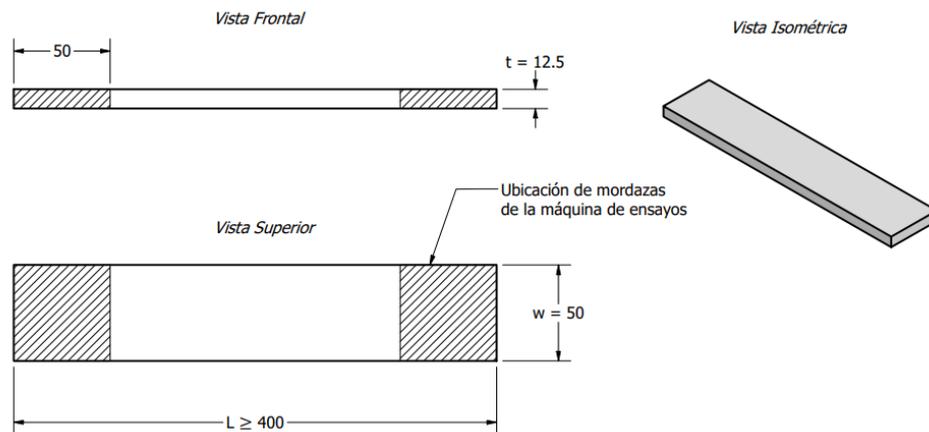
Nota: Elaboración propia

2.1 Ensayo de Tracción

Para los ensayos de tracción se elaboraron los especímenes bajo la Norma ISO 527 – 4 Type II, la misma que especifica las condiciones en la que se debe determinar las propiedades de tracción en materiales compuestos. Según la norma, las dimensiones del espécimen se encuentran en la Figura 2.2:

Figura 2.2.

Dimensiones de los Especímenes según ISO 527 – 4 Type II



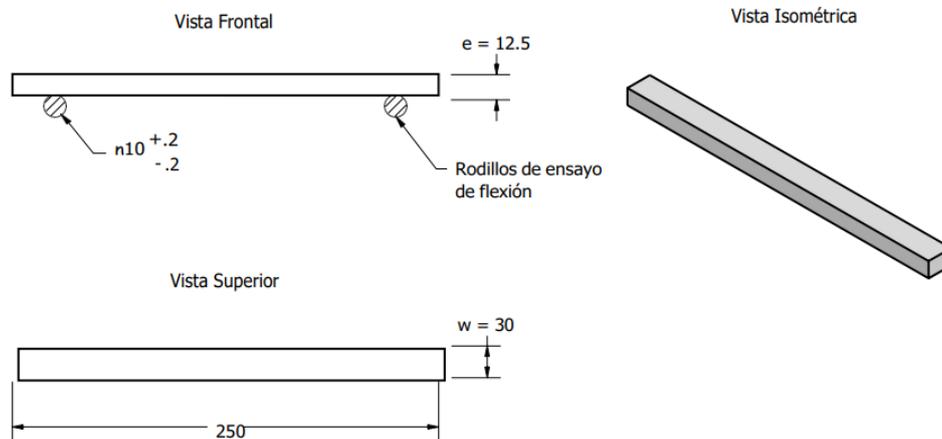
Nota: Obtenido de la Norma ISO 527 – 4 Type II

2.2 Ensayo de Flexión

Para los ensayos de flexión se elaboraron los especímenes bajo la Norma ISO 14125 Type II, la cual especifica un método para determinar las propiedades de flexión de materiales compuestos de plástico reforzado con fibras bajo carga de tres y cuatro puntos. Según la norma, las dimensiones del espécimen se encuentran en la Figura 2.3:

Figura 2.3.

Dimensiones de los Especímenes según ISO 14125 Type II



Nota: Obtenido de la Norma I 14125 Type II

2.3 Descripción de Equipos

Los equipos utilizados en la elaboración de los modelos de material auxético y para los ensayos de tracción y flexión son los siguientes:

2.3.1 CREALITY Ender 5 S1

Las maquinas CREALITY Ender-5 S1 son impresoras 3D de movimiento actualizado, que cuentan con una aceleración de 2000 mm/s², y con velocidad de impresión de hasta 250 m/s. Permite nivelar rápidamente la cama con la nivelación automática y asistida, o compensa la altura en el eje Z con una precisión de 0,01 mm. El diámetro de la boquilla estándar es de 0,4mm y con grosor de corte de 0,1 – 0,35 mm, además cuenta con una precisión de $\pm 0,1$ mm.

Cuenta con un eje óptico de 12 mm de espesor y soporte de perfil doble, además de un soporte con voladizo doble en la parte inferior de la cama. Todas estas características mejoran tanto su estructura como funcionalidad y se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.4.

CREALITY Ender 5 S1



Nota: Obtenido del catálogo de instrumentos presentado por CREALITY. (s. f.). Ender-5-S1

CREALITY

2.3.2 Máquina SHIMADZU UH-FX

La máquina SHIMADZU UH-FX, es un equipo de prueba universal hidráulica, diseñadas para pruebas de alta presión. Estas máquinas, son amigables con el medio ambiente lo que permite reducir de manera significativa los gastos energéticos en los laboratorios de pruebas.

Este modelo viene con rango desde 200kN a 4000kN, en nuestro caso la máquina que utilizamos tiene una capacidad 500kN. Además, posee características como panel táctil LCD, programas de control automático, cuenta con funciones de auto encendido y auto calibración y memoria USB.

El equipo cuenta con accesorios que permiten realizar las pruebas de tracción, como las mordazas móviles; como se muestra en la Figura 2.5.

Figura 2.5.

Maquina SHIMADZU UH-FX



Nota: Obtenido del catálogo de instrumentos presentado por Shimadzu. (s. f.). UH-X/FX Series

2.4 Diseño de Espécimen

Para realizar los ensayos, se elaboraron especímenes de forma rectangular y sección constante, con laminado de fibra de vidrio y resina palatal, el cual es obtenido del plan de laminado de un catamarán en construcción. Para las dimensiones de los especímenes de tracción se basaron en la Norma ISO 527 – 4 Type II, la cual se muestra en el APENDICE A y para los especímenes que fueron sometidos a flexión usamos la Norma ISO 14125 Type II, como se muestra en el APENDICE B. Se realizaron dos tipos de laminados, el laminado convencional y el laminado con material auxético. Para ambos laminados se usaron Fibra de Vidrio, MATT 300, 450 y ROVING 800, con Resina Palatal, la misma que se utilizó en la construcción del catamarán para las Islas Galápagos, y se muestra sus características en el APENDICE C.

Los especímenes que fueron diseñado para los ensayos de tracción tienen las características que se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1.

Características del espécimen para ensayos de tracción con material auxético

Parámetro	Cantidad	Unidades
Longitud total	400	mm
Longitud útil	300	mm
Ancho	50	mm
Espesor	12.5	mm
Material	Fibra de Vidrio con Resina Palatal	-

Por otra parte, los especímenes que fueron sometidos a flexión fueron diseñado con las características que se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2.

Características del espécimen para ensayos de flexión con material auxético

Parámetro	Cantidad	Unidades
Longitud total	250	mm
Ancho	30	mm
Espesor	8.5	mm
Material	Fibra de Vidrio con Resina Palatal	-

El diseño de los especímenes de laminado convencional y laminado con material auxético se muestra en el APÉNDICE D.

2.4.1 Laminado del espécimen convencional

El laminado del espécimen convencional se diseñó basándose en el plan de laminado utilizado para la construcción de un catamarán de 48 m para las Islas Galápagos. Para este tipo laminado se elaboró 10 especímenes, 5 para los ensayos de tracción y 5 para los de flexión. En la Figura 2.6, se muestra la configuración del laminado de una omega de la bulárcama de un refuerzo secundario, comenzando con Fibra MATT 450 en el fondo y terminando con Fibra MATT 300 en la corona de la omega.

Figura 2.6.

Configuración del laminado convencional

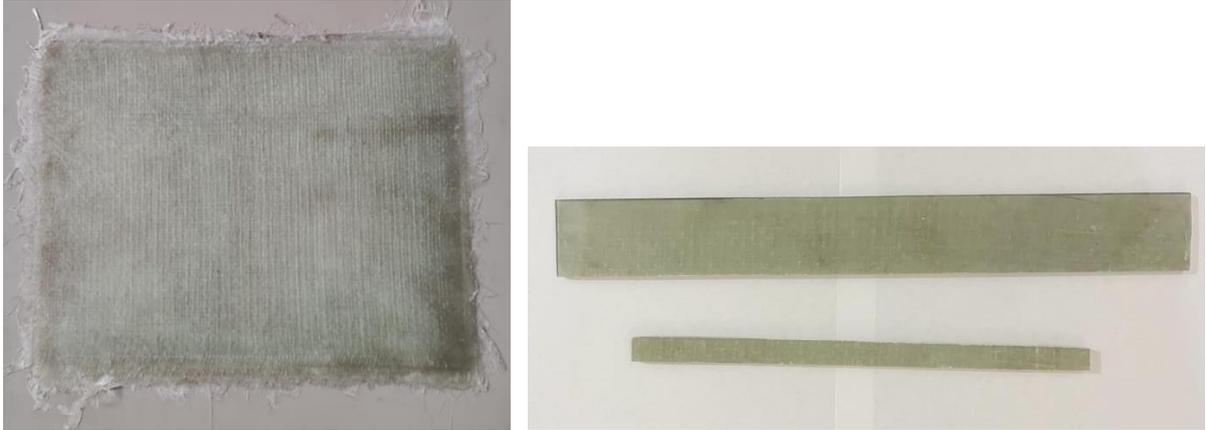


Nota: Elaboración propia

Se elaboraron las probetas con el mismo material y a las mismas condiciones ambientales que el casco del catamarán que se encuentra en construcción, este proceso se muestra en la Figura 2.7.

Figura 2.7.

Proceso de elaboración del laminado convencional



Nota: Elaboración propia

2.4.2 Fabricación de Material Auxético

Para la fabricación del material auxético se utilizó la Máquina CREALITY Ender-5 S1, la misma que se muestra en la Figura 2.3. El material utilizado para la fabricación de los especímenes es TPU y PLA. El TPU, es un poliuretano termoplástico, el cual su dureza puede ser personalizada y la resina PLA, se especializa en moldeo de alta velocidad y estable. La fabricación del material auxético se puede observar en la Figura 2.8.

Figura 2.8.

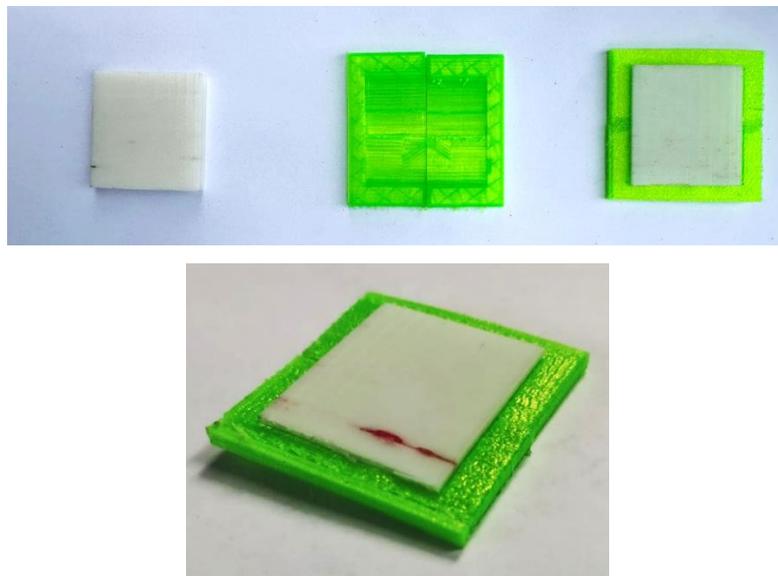
Fabricación del Material Auxético



Nota: Elaboración propia

Figura 2.9.

Material Auxético para ensayos de tracción



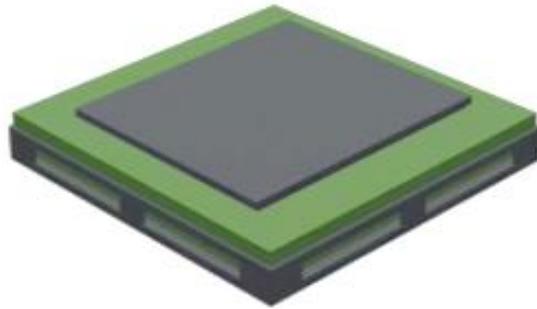
Nota: Elaboración propia

Para la configuración del material auxético se utilizó la geometría recomendada por Frere et al. (2023), los cuales realizaron el estudio de la configuración más resistente del material auxético, siendo este el perfil de geometría “M”, como se muestra en la Figura 2.10. El mismo se escaló para

obtener el espesor deseado y se colocó en pequeños segmentos continuos a lo largo de los especímenes, hasta completar la longitud total.

Figura 2.10.

Configuración del Material Auxético tipo "M"



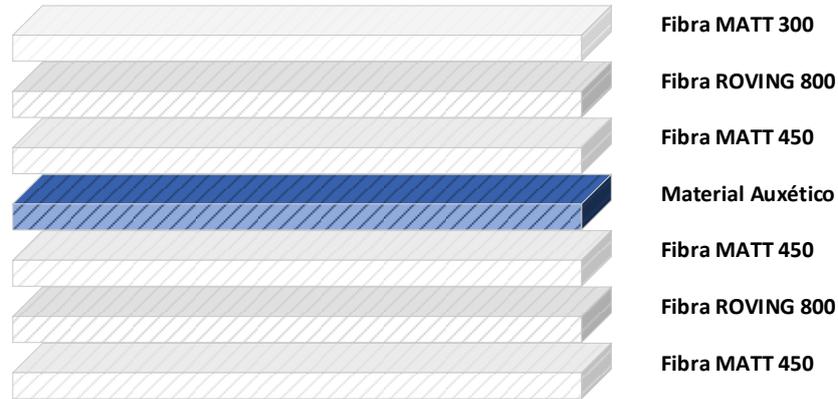
Nota: Elaboración propia

2.4.3 Laminado del Espécimen con material auxético

Para el laminado utilizando material auxético, se utiliza la estructura del laminado convencional y se propone el reemplazo de la lámina intermedia de fibra ROVING 800, con pequeñas secciones de material auxético como se muestra en la Figura 2.11.

Figura 2.11.

Configuración del laminado con material auxético



Nota: Elaboración propia

Para este tipo de laminado se confeccionaron 6 especímenes, 3 para tracción y 3 para flexión. La configuración del material auxético se muestra en la Tabla 2.3 y Figura 2.11.

Tabla 2.3.

Configuración del laminado con Material Auxético

Tipo de espécimen	Número de capas	Dirección del Material Auxético	Orientación del tejido
TP1	7	Observar Figura 2.12	Unidireccional (0°)

Figura 2.12.

Configuración de laminado con Material Auxético de Tipo 1.

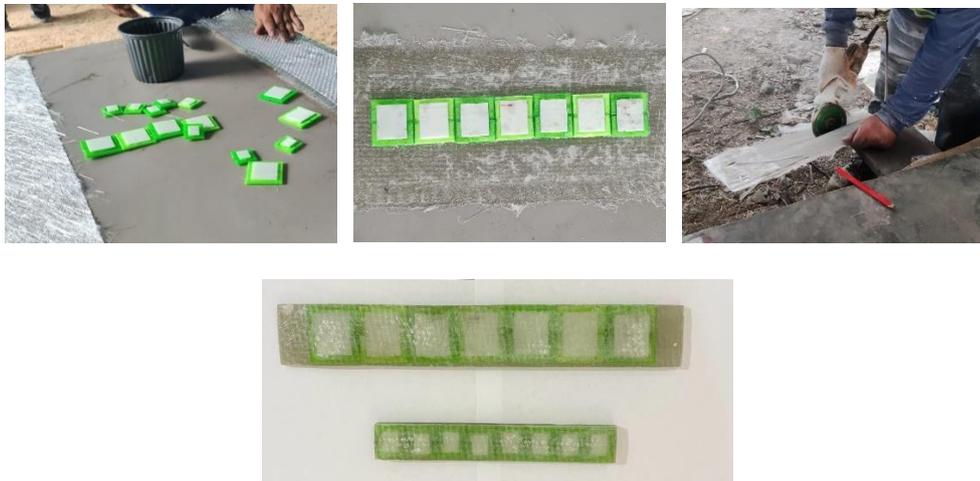


Nota: Elaboración propia

El proceso de elaboración de laminado con el material auxético se muestra en la Figura 2.13, en el cual se muestra el laminado que se realiza colocando de manera continua la capa de material auxético a lo largo del espécimen, además se corta y mecaniza cada una de las probetas para finalmente tener el espécimen muestrán para los respectivos ensayos.

Figura 2.13.

Proceso de elaboración del laminado con material auxético



Nota: Elaboración propia

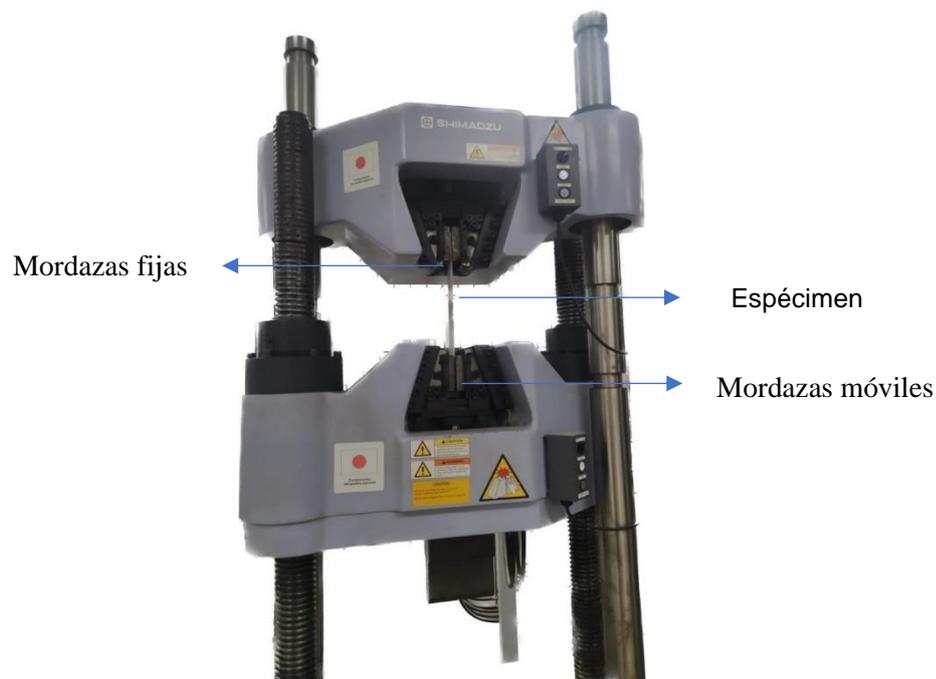
2.5 Descripción de Ensayos

2.5.1 Diseño del ensayo de tracción

Para realizar la parte experimental, se realizaron ensayos de tracción en la máquina SHIMADZU UH-FX, la cual consistió someter los especímenes tanto el de laminado convencional como el de laminado con material auxético a una fuerza uniaxial hasta el punto de quiebre del material. El espécimen analizado fue inmovilizado por dos mordazas a cada extremo de la máquina, esto para evitar el deslizamiento y posibles errores externos en la toma de información; la mordaza móvil sometió a tracción el espécimen hasta que se produce la ruptura o separación del material. Como se muestra en la Figura 2.14.

Figura 2.14.

Ensayo de tracción en la Máquina SHIMADZU UH-FX



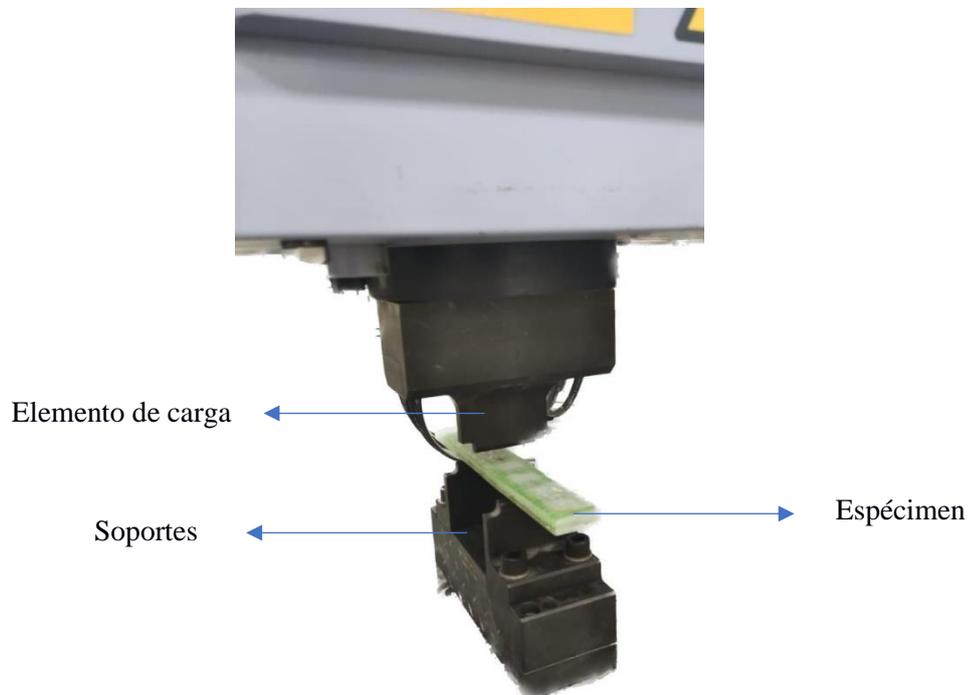
Nota: Elaboración propia

2.5.2 Diseño del ensayo de flexión

Al igual que el ensayo de tracción, se utilizó la maquina SHIMADZU UH-FX, que, a diferencia del ensayo anterior, se adicionaba un accesorio base que permitían colocar la probeta y la mordaza móvil bajaba para ejercer la presión sobre el espécimen hasta la ruptura de este, este ensayo de flexión es considerado de tres puntos. El ensayo de flexión se muestra en la Figura 2.15.

Figura 2.15.

Ensayo de flexión en la Maquina SHIMADZU UH-FX



Nota: Elaboración propia

2.6 Resultados Esperados

Sometiendo el material a ensayos de tracción y flexión es posible determinar la reacción de este ante las fuerzas aplicadas. La forma concreta para obtener la energía de los ensayos es calculando el área bajo la curva carga vs desplazamiento o que es lo mismo la curva de tensión vs

deformación unitaria. De forma general la ecuación de la energía se representa de la siguiente manera:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo y ε es la variación de la deformación unitaria.

En los ensayos destructivos la energía absorbida es la medida de la tenacidad del material. Esta energía es calculada multiplicando la energía efectiva por el área de la fractura. La energía absorbida se relaciona con una fuerza constante, el desplazamiento obtenido durante el ensayo y la deformación límite.

$$E_a = C \int_0^{F_{Límite}} dF \int_0^{\delta_{Límite}} d\delta - \int_0^{\delta_{Límite}} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

Al ser analizada se obtiene la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{1}{2} F_{Límite} \delta_{Límite} - \sum_{i=0}^n F_i(\delta) \Delta\delta + \xi \quad ; \quad n = \text{frecuencia de datos} \quad (3)$$

2.6.1 Relación de Esfuerzo

Para utilizar cualquier criterio de falla de manera más eficiente, se define la relación de resistencia R como la fuerza sobre el esfuerzo aplicado.

$$R = \frac{\sigma_{auxético}}{\sigma_{convencional}} \quad (4)$$

La relación de fuerza es similar a un factor de seguridad. Si $R > 1$ el nivel de esfuerzo está por debajo la resistencia del material. Si $R < 1$, el valor de la tensión es mayor que la resistencia y se predice el fracaso.

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

En el presente capítulo se procede a describir los resultados obtenidos de la experimentación dada. Para los especímenes de laminado simple convencional se realizaron 4 ensayos de tracción y 4 ensayos de flexión, en cuanto a los ensayos con material auxético se realizaron 3 repeticiones con cada configuración, tanto para tracción como para flexión. Se puede observar las gráficas de Fuerza vs tiempo de ruptura para cada uno de los casos. Además, se calculó la energía en cada uno de los casos con laminado convencional y con material auxético. Finalmente se analizó las propiedades en las que el material auxético ayuda a la resistencia del laminado en fibra de vidrio.

3.1 Resultados de los ensayos de tracción

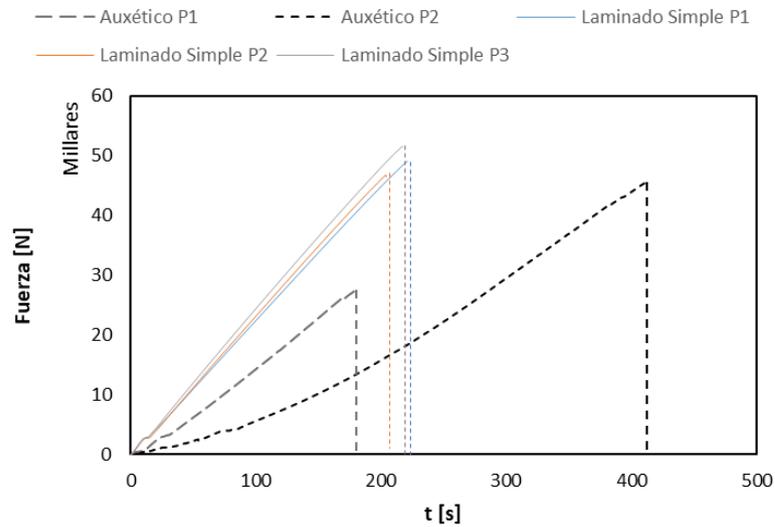
Estos ensayos se realizaron para obtener el comportamiento en tracción bajo fuerza uniaxial, provocando una ruptura del laminado.

3.1.1 Distribución de Fuerza vs tiempo

A continuación, se observa las gráficas de los ensayos resultantes de la fuerza de ruptura de los especímenes en laminado simple convencional y los del material auxético como se muestra en la Figura 3.1, en el APENDICE E, se puede observar los resultados de manera más detallada.

Figura 3.1.

Curva de Fuerza de ruptura vs tiempo para ensayos de tracción



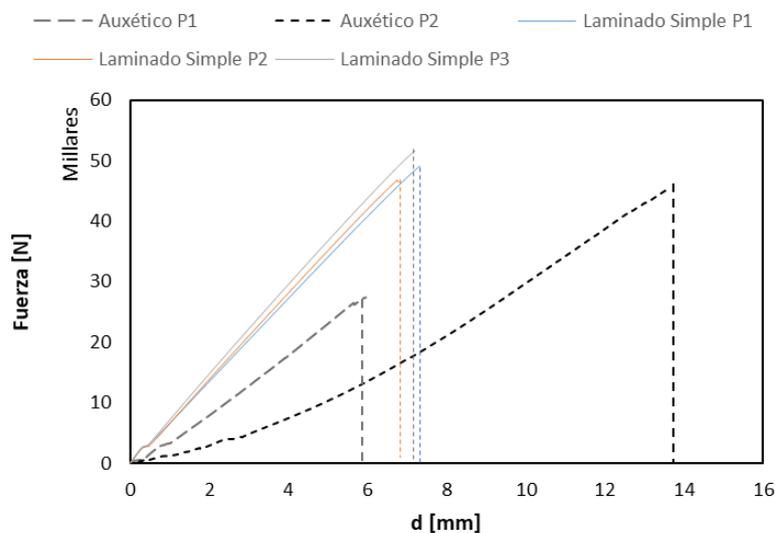
Nota: Elaboración propia

3.1.2 Distribución de Fuerza vs desplazamiento

Al igual que las gráficas de Distribución de Fuerza vs tiempo, la tendencia es la similar que la Distribución de Fuerza vs desplazamiento, en donde se muestra el desplazamiento que tuvo el espécimen hasta llegar a la ruptura del material, como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2.

Curva de Fuerza de ruptura vs desplazamiento para ensayos de tracción



Nota: Elaboración propia

Como en las figuras previas se puede observar, la tendencia entre la Fuerza vs el tiempo es muy similar a la tendencia de las gráficas entre la Fuerza vs desplazamiento, en la cual ambas nos muestran que los especímenes con material auxético soportan menos fuerza de tracción que los del laminado convencional. Además de presentarse fisuras previas a la ruptura del material, lo que puede ser por quiebre interno de las estructura o separación del mismo material auxético previo a llegar a su fuerza máxima de separación del material.

En los valores de la fuerza de tracción máxima en los laminados convencionales oscilan entre 40000 a 50000 N, y en los especímenes con material auxético el valor máximo está en 45000 N, lo que muestra que en ensayos de tracción el material auxético presenta una resistencia insignificante a comparación con el laminado convencional.

3.2 Resultados de los ensayos de flexión

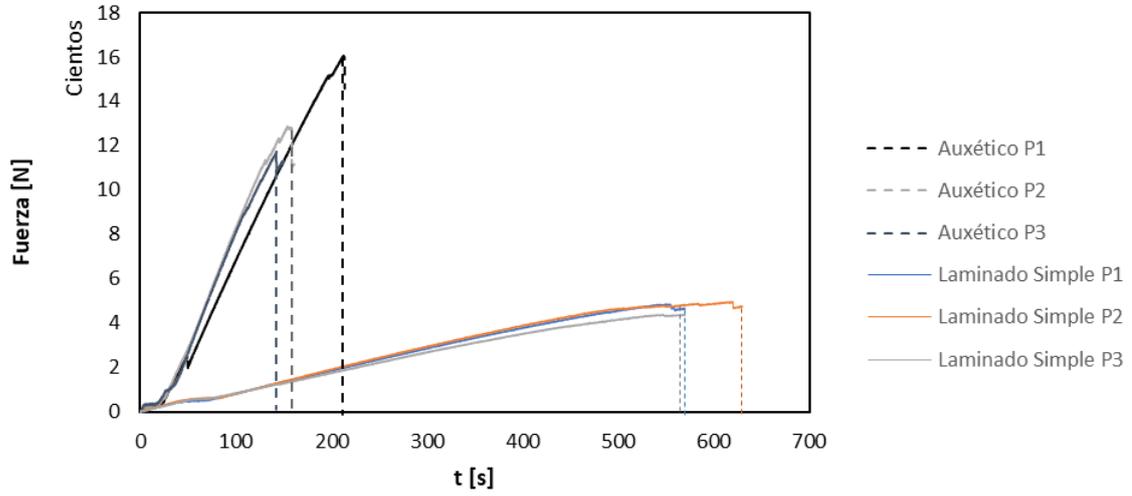
Estos ensayos se realizaron para obtener el comportamiento en flexión en dos puntos de apoyo y aplicando fuerza sobre un punto hasta provocar la ruptura del laminado.

3.2.1 Distribución de Fuerza vs tiempo

En esta sección, se observa las gráficas de los ensayos de flexión obtenidos de la ruptura de los especímenes entre fibra de vidrio y resina palatal, la misma que se observa en mayor detalle en APENDICE D. Dentro de esta sección se observó una mayor resistencia en ensayos de flexión de los especímenes con material auxético como se muestra en la Figura 3.3.

Figura 3.3.

Curva de Fuerza de ruptura vs tiempo para ensayos de flexión



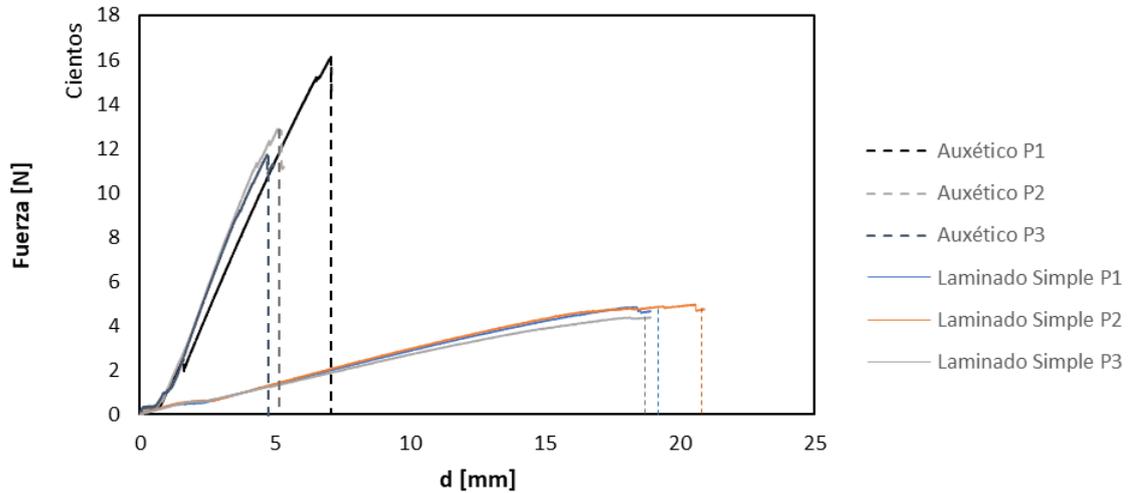
Nota: Elaboración propia

3.2.2 Distribución de Fuerza vs desplazamiento

De la misma manera que la Figura 3.3, se presenta la tendencia de la Distribución de Fuerza vs desplazamiento en la cual existe mayor resistencia, pero menor desplazamiento del material auxético a comparación con el laminado convencional como se muestra en la Figura 3.4.

Figura 3.4.

Curva de Fuerza de ruptura vs desplazamiento para ensayos de flexión



Nota: Elaboración propia

En los ensayos de flexión, se muestra en las Figura 3.3 y 3.4, la tendencia similar en los resultados de Fuerza vs tiempo y desplazamiento respectivamente, en los cuales se muestra la tendencia de los laminados convencionales, inician en 0 y van aumentando hasta llegar a una fuerza casi constante hasta llegar al punto de ruptura, esto se da debido a que el laminado es flexible y al aplicar la fuerza este tiene un comportamiento semi elástico, impidiendo llegar al punto máximo de manera rápida. Por otro lado, el laminado con material auxético es un espécimen más rígido, lo que no permite mayor flexibilidad provocando una ruptura más veloz y con menor desplazamiento, a su vez, el laminado con material auxético presenta mayor resistencia en los ensayos de flexión a comparación con la laminado convencional.

Los valores de fuerza máxima en laminado convencional son de 500N con un desplazamiento de 18 a 22 mm entre 570 a 650 s hasta llegar a su punto máximo y posterior ruptura del material. Por otro lado, en el espécimen con material auxético, la fuerza máxima para la ruptura del material está en 1600 N, pero el desplazamiento máximo estuvo en 7 mm a 200 s

aproximadamente. Esto nos muestra mayor resistencia a la fuerza aplicada, pero al ser este un material más rígido, su tiempo y desplazamiento es menor.

De acuerdo a los ensayos de flexión realizados, podemos observar en la Figura 3.4 existe un comportamiento muy diferente, el material auxético tiene una mayor resistencia a la flexión comparado al espécimen de laminado simple, se observa también que la pendiente de ambas curvas, la cual representa el módulo de elasticidad de cada probeta, se obtiene resultados de cuál es el máximo de deformación que resiste cada una de las probetas y el laminado simple resistió una deformación de 20 mm al presentarse la primera falla, mientras que el material con auxético resistió 7 mm, considerando que en la gráfica se observa una irregularidad lo cual corresponde a una burbuja de aire que fue identificada.

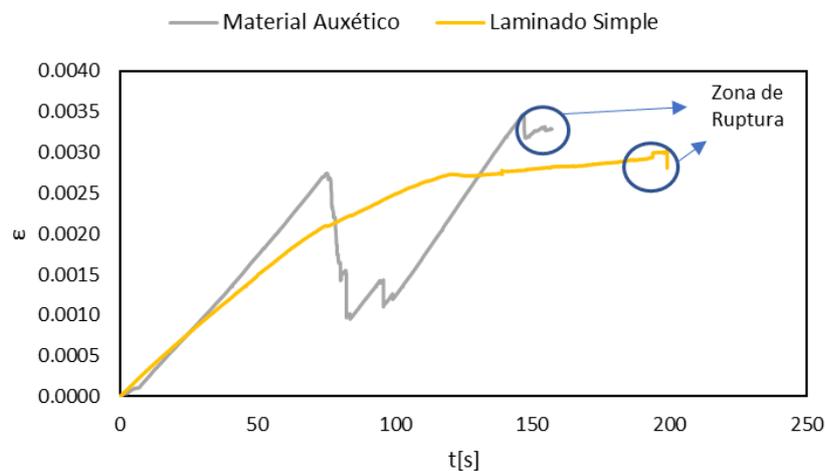
3.3 Resultados de Deformaciones Unitarias

Para los ensayos de tracción y flexión se colocaron medidores de deformaciones unitarias en el centro de cada una de los especímenes y se conectaron al pc, al ir realizando los ensayos, estos registraron cada una de las deformaciones, las cuales se muestran en las Figura 3.5 y 3.6.

3.3.1 Deformación Unitaria vs tiempo

Figura 3.5.

Curva de Deformación Unitaria vs tiempo para ensayos de tracción

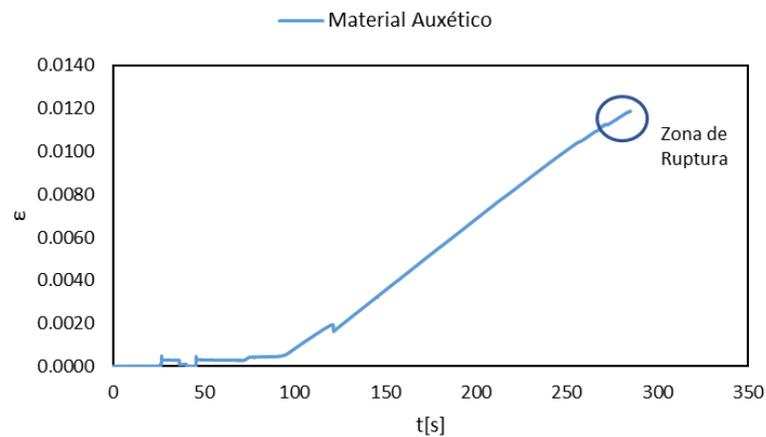


Nota: Elaboración propia

Durante los ensayos de tracción los medidores de deformación marcaron diferencia entre material auxético y simple, esto queda registrado en la Figura 3.5, en la cual se observa que el laminado simple tiene un comportamiento no lineal con discontinuidades por la ruptura de la matriz y la fibra, en cambio se observa que el material auxético tiene un comportamiento irregular por el desprendimiento de las capas del PLA y TPU así como la adherencia de la lámina dentro del material compuesto.

Figura 3.6.

Curva de Deformación Unitaria vs tiempo para ensayos de flexión



Nota: Elaboración propia

3.4 Análisis de Resultados

En el presente subcapítulo, se puede observar los resultados gráficos experimentales obtenidos de las probetas ensayadas, una vez realizada las pruebas de tracción y flexión a los especímenes de laminado convencional y con material auxético, así también la energía que se presenta en cada uno de los resultados de ambos ensayos.

A continuación, se muestra los especímenes resultantes luego de los ensayos de flexión y como se presenta el laminado al llegar a su fuerza máxima, como se observa en la Figura 3.7.

Figura 3.7.

Resultado de los ensayos de flexión a) laminado simple b) material auxético



Nota: Elaboración propia

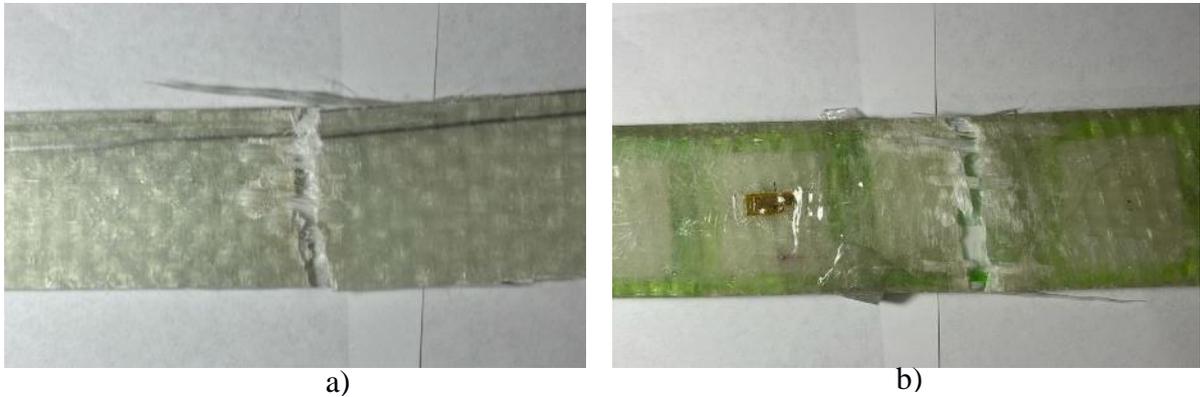
En los especímenes resultantes de los ensayos de flexión de la Figura 3.7 , en el laminado simple se muestra una delaminación y ruptura del material mucho más evidente que la del material auxético, ya que se puede observar separación entre las capas iniciales que estuvieron en contacto con el accesorio de la máquina. Durante la experimentación, se pudo observar mayor flexibilidad del laminado convencional a comparación del laminado utilizando material auxético.

Por otro lado, se pudo observar el laminado con material auxético, que no presenta una delaminación del material, ni una ruptura evidente de las capas de laminado, sino se observa pequeñas grietas en la zona donde se aplicó la fuerza. Además de soportar mayor carga de fuerza, presenta una delaminación menor a comparación con el laminado convencional utilizado en el mercado local.

En cuanto a los ensayos de tracción, se puede observar los resultados de los especímenes en la Figura 3.8, en la cual se muestra el a) laminado simple y b) material auxético posterior a los ensayos destructivos realizados. Todos los especímenes analizados se encuentran en el Apéndice F.

Figura 3.8.

Resultado de los ensayos de tracción a) laminado simple b) material auxético



Nota: Elaboración propia

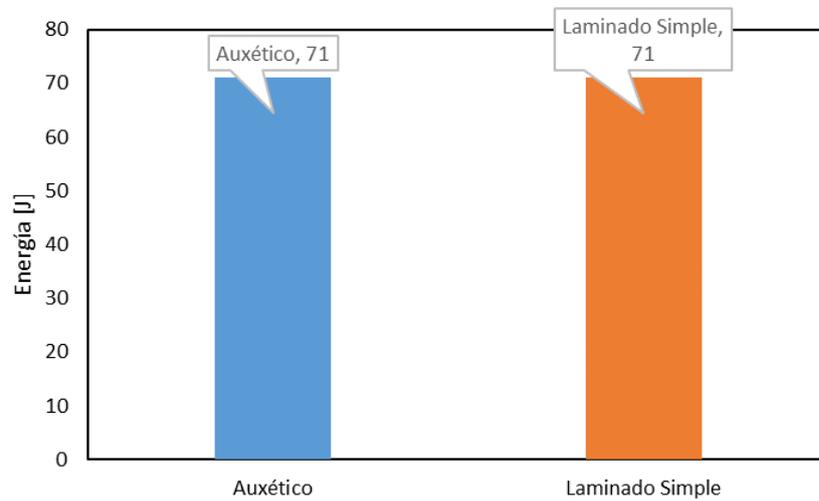
Como se muestra en la Figura 3.8., se observa la ruptura del material tanto para el laminado convencional como para el laminado con material auxético. El laminado convencional presenta una separación del espécimen en 2, además la fuerza de despegue es mayor a comparación del material auxético.

Por otro lado, en el espécimen del material auxético, presenta la delaminación del material, pero únicamente de las capas de resina y fibra, la capa de materia auxético no presenta alteración ni ruptura, debido a esto el espécimen no se separa debido a la ruptura del material auxético sino a la separación de las capas de fibra con el auxético.

Finalmente, se realiza un análisis con a la energía en la zona de interés tanto en los ensayos de flexión y tracción como se muestra en la Figura 3.9.

Figura 3.9.

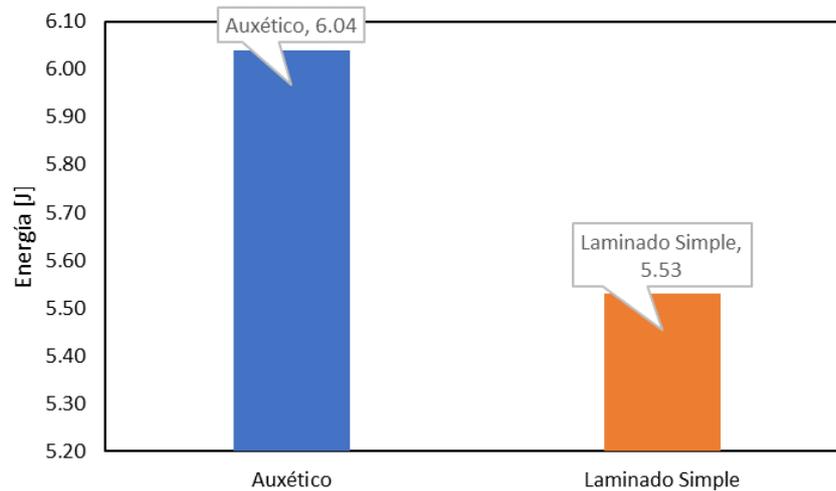
Resultados de la Energía para Ensayos de Tracción



Nota: Elaboración propia

Figura 3.10.

Resultados de la Energía para Ensayos de Flexión



Nota: Elaboración propia

En la Figura 3.9. y Figura 3.10, se puede exponer el diagrama de barras que muestra la energía con respecto al tipo de laminado y ensayo realizados, donde se puede observar la tendencia

de la energía, en el ensayo de tracción donde se presenta similar energía en el laminado con material auxético con respecto al laminado convencional.

En cuando a los resultados de los ensayos de flexión, se analizó la energía total del laminado con auxético debido a su reducida zona de cambio de zonas entre elástica y plástica, pero con el laminado convencional se analizó la zona elástica, como se delimita en la Figura 3.4., ya que la probeta se comienza a deformar y el material se vuelve inutilizable para la aplicación en las embarcaciones.

La diferencia entre la energía del laminado con material auxético con el laminado convencional es mayor, presentando más energía el laminado con auxético, además de mantener la forma inicial y una fuerza de ruptura mucho mayor.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

El avance en el estudio de los materiales compuestos en la construcción naval ha incrementado debido a sus propiedades y métodos de aplicación, ya que este nuevo mecanismo podría mejorar la resistencia y durabilidad de muchas embarcaciones. Además, los refuerzos primarios y secundarios se encuentran sometidos a esfuerzos de tracción y flexión, lo que muchas veces produce la falla de la estructura.

Debido a todos los avances presentados en la industria naval, el presente trabajo propuso el estudio del material auxético en el laminado utilizado en la construcción de un catamarán turístico para las islas Galápagos, para esto se analizaron bajo ensayos de tracción y flexión, los mismos que están sometidos en los refuerzos primarios y secundarios de las embarcaciones. Los resultados obtenidos nos permiten reconocer a que tipos de esfuerzos puede ser sometidos el material auxético y en qué tipo de estructuras presenta la mejora de resistencia estructural.

Además, se analizaron las deformaciones unitarias y energía elástica de cada uno de los ensayos tanto de flexión como de tensión. Con lo mencionado anteriormente, el presente estudio servirá de guía para futuras investigaciones para la implementación de nuevos materiales para la construcción naval.

4.1 Conclusiones

- La Figura 3.5 ilustra la complejidad al intentar establecer una comparación directa entre la deformación unitaria del laminado con material auxético y el laminado simple. Esto se debe a que el laminado con material auxético exhibe diversos niveles de desprendimiento durante la tracción, generando una mayor delaminación tanto interlaminar como intralaminar en la estructura del casco. Este fenómeno introduce un componente adicional a la evaluación de la deformación, requiriendo una consideración detallada de los mecanismos de desprendimiento.

- Se evidencia de manera concluyente que el laminado con material auxético exhibe una mayor resistencia en comparación con el laminado simple. No obstante, es crucial destacar que esta mejora en la resistencia conlleva una disminución en la capacidad de deformación del material. En consecuencia, se recomienda la instalación del material auxético en áreas de la embarcación que demanden una alta resistencia a los esfuerzos, pero que no requieran una extensa capacidad de deformación a la flexión.
- Los resultados de los ensayos indican que el panel modificado con laminado auxético demanda una mayor energía para deformarse en flexión en comparación con el panel de laminado simple, que requiere una menor cantidad de energía. Esta observación implica que la instalación de capas auxéticas en secciones del buque que necesiten mayor flexión resultará en una resistencia superior a la deformación, dado el incremento en la energía necesaria. Importante mencionar que este análisis no incorpora la energía de retorno ni la energía absorbida por el laminado compuesto, factores que podrían influir en la evaluación global de la eficiencia del material auxético en situaciones prácticas.

4.2 Recomendaciones

- Al momento del ensamble de los especímenes del material auxético dentro del laminado, se debe considerar factores que pueden generar variación en los resultados a obtener como son: las condiciones climáticas, en la cual la temperatura de fundición no debe exceder los 32°C y la humedad relativa los 70%, esto según el clasificador Lloyds Register. Otro factor que alteraría los óptimos resultados sería el método de acoplamiento del material auxético dentro del laminado, se debe evitar

la acumulación de burbujas de aire dentro de las capas, ya que eso produciría una rápida delaminación del espécimen.

- Debido a que la probeta de material auxético tiene un espesor de 5 mm, los materiales comerciales de PLA y TPU no permiten obtener una óptima impresión, es por esto que se debe conseguir este tipo de material pero que cumpla con una tolerancia de 0.2 mm para garantizar la calidad del material auxético y evitar pérdidas de material.
- Se recomienda la implementación del laminado con material auxético dentro de la embarcación en zonas que estén sometidas a compresión, impacto y flexión, en donde se necesite una mayor resistencia del material y tenga una mínima deformación. Una zona donde se podría utilizar, sería en las primeras capas del laminado en la proa de la embarcación, donde el casco se encuentra sometido a impacto por las olas y necesita mayor resistencia.

Bibliografía

- Alderson, A., & Alderson, K. L. (2007). Auxetic materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4), 565-575.
- Miller, P. H. (2001). Fatigue prediction verification of fiberglass hulls. *Marine technology and SNAME news*, 38(04), 278-292.
- Elipe, M. D. Á. (2017). *Aplicaciones de las propiedades auxéticas en la arquitectura* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Sanami, M., Ravirala, N., Alderson, K., & Alderson, A. (2014). Auxetic materials for sports applications. *Procedia Engineering*, 72, 453-458.
- González-Cantero, J. M., Graciani, E., López-Romano, B., & París, F. (2018). Competing mechanisms in the unfolding failure in composite laminates. *Composites Science and Technology*, 156, 223-230.
- GUZMAN, J. M. C. (2005). ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS DE PROBETAS DE ACERO SOLDADAS CON ELECTRODOS REVESTIDOS.
- Ahmed, W. F., Sghaier, M. B. H., & Allaoui, S. (2022). Investigation of the effect of three-point bending testing parameters on the behavior of 3D printed sand. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(1-2), 1415-1428.
- Mujika, F. (2006). On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests. *Polymer testing*, 25(2), 214-220.
- Haro Lisón, F. D. (2010). Escantillado y AEF de una embarcación de recreo.
- Ortiz, J. C. A., & Arévalo, O. A. J. (2017). Influencia del proceso de manufactura en las propiedades de un compuesto Polímero termoplástico-fibra de cerámica y su aplicación en soportes para cables de turbinas.
- Baron Cangrejo, D. A. Análisis por elementos finitos de la respuesta de estructuras auxéticas hexaquirales y re-entrantes con coeficiente de Poisson Negativo Bajo Carga Uniaxial en el plano Xy.
- Sánchez Carrión, E. F., & Jiménez Gonzales, J. P. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina de pultrusion y estudio experimental de las variables para la obtención de perfiles "O" de material compuesto con matriz termoestable* (Master's thesis, Quito, 2017.).
- Castro Aguirre, J. C. (2016). *Las fibras de vidrio, acero y polipropileno en forma de hilachas, aplicadas como fibras de refuerzo en la elaboración de morteros de cemento* (Bachelor's

- thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).
- Flores, D. O. V (2014). Probador Mecánico para Ensayos de Tracción Uniaxial en Materiales Suaves y Tejidos Biológicos.
- González Murillo, B. A. (2011). *La fibra de vidrio como agregado en el diseño de hormigones estructurales para aumentar la resistencia a la compresion y su aplicación en edificaciones en la ciudad de JIPIJAPA* (Bachelor's thesis, JIPIJAPA-UNESUM).
- Frere Cárdenas, T. N., Jiménez Calle, G. R., & Townsend, P. (2023). *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* (Doctoral dissertation, ESPOL. FIMCM: Naval).
- Shimadzu. (s. f.). UH-X/FX Series. Shimadzu. <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/uh-xfx-series/index.html>
- CREALITY. (s. f.). Ender-5-S1 CREALITY. <https://www.creality.com/es/products/ender-5-s1>
- Barbero, E. J. (2010). Introduction to composite materials design. CRC press.
- ISO, B. (1997). Plastics—determination of tensile properties. British Standard, Germany.
- Standard, B., & ISO, B. (1998). Fibre-reinforced plastic composites—Determination of flexural properties. BS EN ISO, 14125.

Apéndices

APÉNDICE A

Norma ISO 527 – 4 Type II

ISO 527-4:1997(E)

© ISO

6 Test specimens

6.1 Shape and dimensions

Three types of test specimen are specified for use with this part of ISO 527, as detailed and illustrated in figure 3 (type 1B) and figure 4 (types 2 and 3).

Type 1B is for testing fibre-reinforced thermoplastics. Type 1B specimens may also be used for fibre-reinforced thermosets if they break within the gauge length. Type 1B shall not be used for multidirectional, continuous-fibre-reinforced materials.

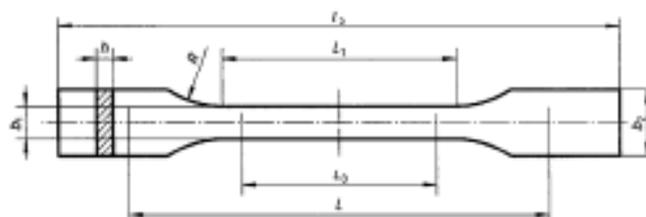
Type 2 (rectangular without end tabs) and type 3 (rectangular with bonded end tabs) are for testing fibre-reinforced thermosets and thermoplastics. Specimens with unbonded end tabs are considered as type 2.

The preferred width of type 2 and type 3 specimens is 25 mm, but widths of 50 mm or greater may be used if the tensile strength is low due to the particular type of reinforcement used.

The thickness of type 2 and type 3 specimens shall be between 2 mm and 10 mm.

To decide whether to use type 2 or type 3 specimens, first carry out tests with type 2 specimens and, if the test is not possible or not satisfactory, i.e. if the specimen slips or breaks in the grips (see ISO 527-1, subclause 5.1), use type 3 specimens.

For compression-moulded materials, the thickness between the end-pieces of any type of specimen shall at no point deviate from the mean by more than 2 %.



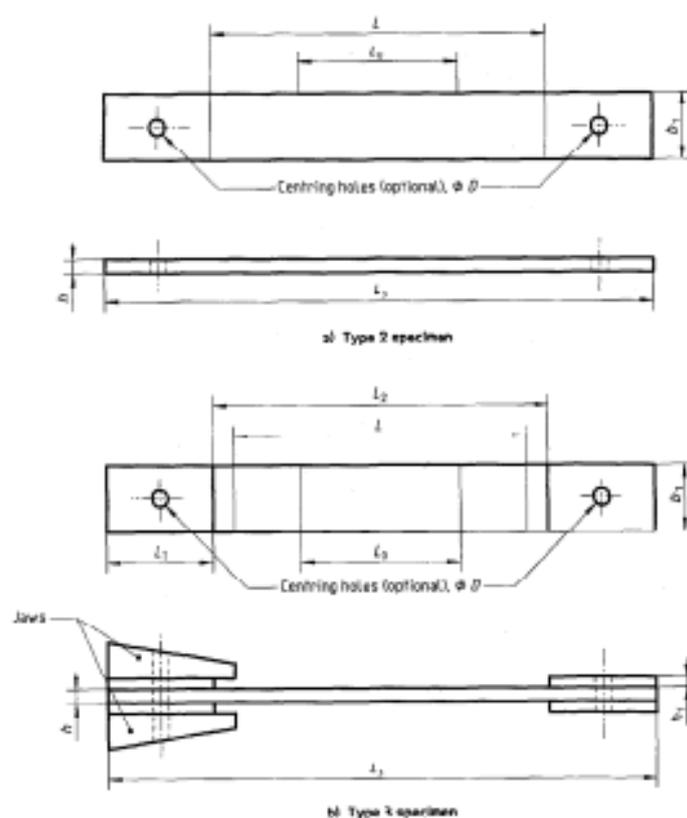
Dimensions in millimetres		
L_0	Overall length	≥ 150 1)
L_1	Length of narrow parallel-sided portion	$60 \pm 0,5$
R	Radius	≥ 60 2)
b_2	Width at ends	$20 \pm 0,2$
b_1	Width of narrow portion	$10 \pm 0,2$
t	Thickness	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	$50 \pm 0,5$
L	Initial distance between grips	115 ± 1

NOTE — Requirements on specimen quality and parallelism are given in clause 6.

1) For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. so that $L_2 = 200$ mm) to prevent breakage or slippage of the specimen in the jaws.

2) It should be noted that a thickness of 4 mm gives a specimen which is identical to the type 1B specimen specified in ISO 527-2 and ISO 3167:1983, *Plastics — Multipurpose test specimens*.

Figure 3 — Type 1B specimen



Dimensions in millimetres			
		Type 2	Type 3
L_0	Overall length	≥ 250	≥ 250
L_g	Distance between end tabs	—	150 ± 1
b_1	Width	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$
b	Thickness	2 to 10	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	50 ± 1	50 ± 1
L	Initial distance between grips	150 ± 1	100 (nominal)
L_T	Length of end tabs	—	≥ 50
b_T	Thickness of end tabs	—	1 to 3
ϕ	Diameter of centring holes	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

NOTE — Requirements on specimen quality and parallelism are given in clause 6.

Figure 4 — Type 2 and type 3 specimens

APÉNDICE B

Norma ISO 14125 Type II

EN ISO 14125:1998

6.1.3 Preferred specimen type

Table 3 — Preferred test specimens for method A (three-point flexure)

Material	Dimensions in millimetres			
	Specimen length (<i>l</i>)	Outer span (<i>L</i>)	Width (<i>b</i>)	Thickness (<i>h</i>)
Class I Discontinuous-fibre-reinforced thermoplastics	80	64	10	4
Class II Plastics reinforced with mats, continuous matting and fabrics, as well as mixed formats (e.g. DMC, BMC, SMC and GMT)	80	64	15	4
Class III Transverse (90°) unidirectional composites; unidirectional (0°) and multidirectional composites with $5 < E_{T1}/G_{12} \leq 15$ (e.g. glass-fibre systems)	60	40	15	2
Class IV Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $15 < E_{T1}/G_{12} \leq 50$ (e.g. carbon-fibre systems)	100	80	15	2
Tolerances	-0 +10	±1	±0,5	±0,2

NOTE To reduce variability in data for specimens using coarse reinforcements, a specimen width of 25 mm may be used.

Table 4 — Preferred test specimens for method B (four-point flexure)

Material	Dimensions in millimetres				
	Specimen length (<i>l</i>)	Outer span (<i>L</i>)	Inner span (<i>L'</i>)	Width (<i>b</i>)	Thickness (<i>h</i>)
Class I Discontinuous-fibre-reinforced thermoplastics	80	66	22	10	4
Class II Plastics reinforced with mats, continuous matting and fabrics, as well as mixed formats (e.g. DMC, BMC, SMC and GMT)	80	66	22	15	4
Class III Transverse (90°) unidirectional composites; unidirectional (0°) and multidirectional composites with $5 < E_{T1}/G_{12} \leq 15$ (e.g. glass-fibre systems)	60	45	15	15	2
Class IV Unidirectional (0°) and multidirectional composites with $15 < E_{T1}/G_{12} \leq 50$ (e.g. carbon-fibre systems)	100	81	27	15	2
Tolerances	+10 -0	±1	±1	±0,5	±0,2

NOTE To reduce variability in the data obtained for specimens using coarse reinforcements, a specimen width of 25 mm may be used.

In any one test, the specimen thickness within the central one-third of the length shall nowhere deviate by more than 2 % from the mean value in the central region. The corresponding maximum deviation for width is 3 %. The cross-section shall be rectangular and without rounded edges.

NOTE The preferred Class I specimen may be machined from the central part of the multipurpose test specimens given in ISO 3167.

In any one test, the specimen thickness over the complete length shall nowhere deviate by more than 2 % from the mean value. The corresponding maximum deviation for width is 3 %. The cross-section shall be rectangular and without rounded edges.

6.1.4 Other test specimens

When it is not possible or desirable to use the preferred test specimen, the dimensions of L , l , h and b in Table A.1 and Table A.2 in Annex A shall apply.

6.2 Specimen preparation

6.2.1 Moulding and extrusion compounds

Specimens shall be prepared in accordance with the relevant material specification. When none exists, or when otherwise specified, specimens shall be either directly compression moulded or directly injection moulded from the material in accordance with ISO 293, ISO 294-1 or ISO 295, as appropriate.

6.2.2 Plates

Specimens shall be machined from plates in accordance with ISO 2818.

6.2.3 Long-fibre-reinforced plastic materials

Specimens shall be machined from a panel prepared in accordance with ISO 1268 or another specified or agreed-upon procedure. Guidance on machining of plastics is given in ISO 2818.

6.3 Checking the test specimens

The specimens shall be free of twist and shall have mutually perpendicular pairs of parallel surfaces. The surfaces and edges shall be free from scratches, pits, sink marks and flashes. The specimens shall be checked for conformity with these requirements by visual observation against straight-edges, squares and flat plates, and by measuring with micrometer callipers. Specimens showing measurable or observable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the required size and shape before testing.

7 Number of test specimens

7.1 At least five test specimens giving valid failures shall be tested. The number of measurements may be more than five if greater precision of the mean value is required.

It is possible to evaluate this by means of the confidence interval (95 % probability, see ISO 2602).

7.2 The results from test specimens that rupture outside the central one-third in three-point tests and outside the central portion in four-point tests shall be discarded and new specimens tested in their place.

8 Conditioning

Where applicable, condition the test specimens as specified in the standard for the material under test. In the absence of this information, select the most appropriate conditions from ISO 291, unless agreed otherwise by the interested parties (e.g. for testing at elevated or low temperatures).

9 Procedure

9.1 Where applicable conduct the test in the atmosphere specified in the standard for the material under test. In the absence of this information, select the most appropriate conditions from ISO 291, unless agreed otherwise by the interested parties (e.g. for testing at elevated or low temperatures).

9.2 Measure the width b and the thickness h to the nearest 1 % in the centre of each test specimen. Discard any specimen with a thickness exceeding the tolerance of ± 2 % of the mean value and replace it by another one, selected at random. Calculate the mean thickness \bar{h} of the set of specimens.

Report if specimens are used that do not meet this thickness tolerance requirement.

Adjust the span L to within 1 % of the calculated value, to comply with the test span/mean specimen thickness ratio L/\bar{h} given in Table 3 and Table 4 for preferred specimen sizes, and measure the resulting span to better than 0,2 % of the calculated value.

APÉNDICE C

Ficha técnica Resina Palatal

Información Técnica

Diciembre de 2000

BASF Chile S.A.

Palatal® CO P 4

Naturaleza

Palatal COP4 es un políester insaturado basado en ácido ftálico y glicoles estándar, disuelto en estireno. Esta resina es de reactividad media y alta viscosidad.

Aplicación

Palatal COP4 es apropiado para un amplio rango de aplicaciones. Está recomendado para la producción de todo tipo de productos reforzados con fibras de vidrio, tales como: perfiles, lanchas, carrocerías, otras piezas de prensado y moldeo, revestimientos y además botadas.

Propiedades en estado de suministro (valores típicos)

(La viscosidad y la reactividad pueden experimentar cambios en caso de almacenamiento prolongado)

Propiedad	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Aspecto	Claro	-	-
Color Pt-Co	5.85	-	DIN ISO 6271
Contenido de sólidos	71	%	DIN 53 216
Viscosidad Brookfield RV7 20 ppm, 25°C	2600	mPa.s	ISO 2885
Reactividad a 25°C ¹ 1.1 ml, MEKP-HA-3 ² 0.6 ml, CoBPA ³ colocados a 150 g de resina			DIN 53 945, 6222
Tiempo de 25°C - T ₅₀	22	min	
Tiempo de 25°C - T ₆₀	40	min	
T ₉₀	100	°C	

1. Valor de ensayo con 30 g de resina de resina y agente de curado.
2. MEKP-HA-3, Producto de Multibonding, Químico Químico.
3. Dato de Control (DQ) de control.

Otras propiedades de la resina líquida (valores típicos)

Propiedad	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Densidad	1.1	g/ml	DIN 53 217
Flash Point	34	°C	DIN 53 213
Estabilidad no precipitada, período de la luz (25°C)	6	mes	

Propiedades de la resina endurecida sin carga (valores típicos)

Propiedad ¹	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Densidad (20°C)	1.21	g/cm ³	DIN 53 479
Resistencia a la tracción	70	MPa	DIN 53 455
Módulo de elasticidad en tracción	4300	MPa	DIN 53 457
Elongación a la ruptura	2	%	DIN 53 455
Resistencia a la flexión	110	MPa	DIN 53 452
Módulo de elasticidad en flexión	4300	MPa	DIN 53 457
Resistencia al impacto	18	KJ/m ²	DIN 53 455
Temperatura de distorsión por calor (HDT)	80 ²	°C	DIN EN ISO 75
Temperatura de distorsión por calor (HDT)	67 ³	°C	ASTM D 648
Coeficiente de expansión térmica (CTE)	-	-	ASTM D 2583

1. Propiedades medidas en especímenes de resina con un contenido de fibra de 30%.
2. Espesores: 1.5 mm x 10 mm x 125 mm.
3. Espesores: 0.7 x 9 x 1.0.

Otras propiedades de la resina endurecida sin carga (valores típicos)

Propiedad ¹	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Índice de refracción (20°C)	1.507	-	DIN 53 461
Conductividad térmica ²	0.19	W/m.K	DIN 52 912
Calor específico ³	1.5	KJ/(kg.K)	DIN VDE 0552
Coefficiente de dilatación térmica lineal ³	1.1.10 ⁻⁴	K ⁻¹	DIN 53 752
Constante dieléctrica a 50 Hz/1 kHz			DIN 53 483
seco	3.33.3	-	VDE 0303/4
húmedo ⁴	3.53.5	-	
Factor de disipación a 50 Hz/1 kHz			DIN 53 483
seco	0.024-0.024	-	VDE 0303/4
húmedo ⁴	0.019-0.019	-	
Resistencia volumétrica seca	10 ⁴	Ω.cm	DIN 53 482
húmedo ⁴	> 10 ⁴	Ω.cm	VDE 0303/3
Resistencia superficial	≥ 10 ⁴	Ω	DIN 53 482
			VDE 0303/3
Rigidez Dieléctrica	50	KV/mm	DIN 53 481
			VDE 0303/2

1. Propiedades medidas en especímenes de resina con un contenido de fibra de 30%.
2. Medida entre 0°C y 80°C.
3. Espesores: 10 mm x 10 mm x 125 mm.
4. Espesores: 10 mm x 10 mm x 125 mm.

QCA Q. QUÍMICA COMERCIAL ANDINA S.A.

DOCUMENTO ORIGINAL

APROBADO POR: Jairo Linares

FECHA: 22-01-01

QCA QUÍMICA COMERCIAL ANDINA S.A.
COPIA CONTROLADA No. _____

BASF Chile S.A.
Departamento Palatal
Carretera 201 - Santiago
Fono: 52 1340344
Fax: 52 1340345
Email: palatal@basf-chile.cl

BASF

Guías de Procesamiento

Palatal CO P4 es miscible con estireno. Sin embargo la adición de estireno superior a 20 % da como resultado un deterioro de las propiedades físicas.

Palatal CO P4 es también miscible con una amplia variedad de otras marcas Palatal que contengan estireno.

En relación a su reactividad y comportamiento de curado, Palatal CO P4 es particularmente apropiado para la producción de laminados prácticamente libres de tensiones internas.

Palatal CO P4 no está preacelerado, por lo que se debe adicionar acelerante de cobalto o amina para el endurecimiento a temperatura ambiente.

Para el curado de Palatal CO P4 se pueden utilizar los peróxidos comúnmente usados para las resinas de poliéster insaturado tales como peróxido de metilacetona (MEKP), ciclohexanona (CHP) y acetilacetona (AAP). Al usar acelerante de cobalto, el tiempo de gel se puede extender adicionando un inhibidor en base a 1-butilcatecol. Para curados a temperaturas inferiores a 18°C, se usa especialmente peróxido de benzoino (BP) en conjunto con acelerantes aminicos como dimetilamina o dietilamina. El estado final del curado puede optimizarse de acuerdo a los requerimientos específicos para ciertas aplicaciones, poscurando a 80°C por algunas horas. El poscurado a temperaturas elevadas es particularmente importante para artículos destinados a estar en contacto con alimentos (ver información "Palatal para el sector de productos alimenticios, bebidas y agua potable") y es muy recomendable para piezas de plástico reforzado expuestas a ambientes corrosivos.

Para asegurar un curado libre de pegajosidad en superficies expuestas al aire y dependiendo de las condiciones específicas del curado (espesor del laminado, acelerantes, peróxidos, temperatura ambiente), se recomienda adicionar un 5% de una solución de parafina (punto de fusión 46 - 48°C) al 5% en estireno, manteniendo la temperatura de la resina entre 18°C y 35°C (ver información "Curado de Palatal libre de pegajosidad en aire").

Almacenamiento

Palatal CO P4 debe almacenarse en recipientes cerrados, en ambientes frescos y protegidos de la luz. Bajo condiciones adecuadas y a temperaturas de hasta 25°C puede conservarse durante 6 meses desde la fecha de elaboración. Temperaturas superiores reducen el tiempo de almacenamiento. Como toda resina de poliéster, Palatal CO P4 se enturbia por acción de la humedad.

Seguridad

Ver hoja de datos de seguridad.

Observaciones

Las indicaciones de esta publicación se basan en nuestros conocimientos y experiencias actuales. No presuponen una garantía jurídica relativa a determinadas propiedades ni a la idoneidad para una aplicación específica. Debido a las numerosas influencias que pueden darse durante la manipulación y empleo de nuestros productos, estos datos no eximen al transformador o manipulador de realizar sus propios controles y ensayos. Todo el que reciba nuestros productos será responsable por sí mismo de la observancia de los derechos de patentes existentes, así como de las leyes y disposiciones locales vigentes. Debe tenerse en cuenta que las marcas de nuestros productos son registradas.

 QCA C.I. QUÍMICA COMERCIAL ANDINA S.A.

DOCUMENTO ORIGINAL

APROBADO POR:

Jairo Cuervo

FECHA:

00-01-01



QUÍMICA COMERCIAL ANDINA S.A.

COPIA CONTROLADA No. _____

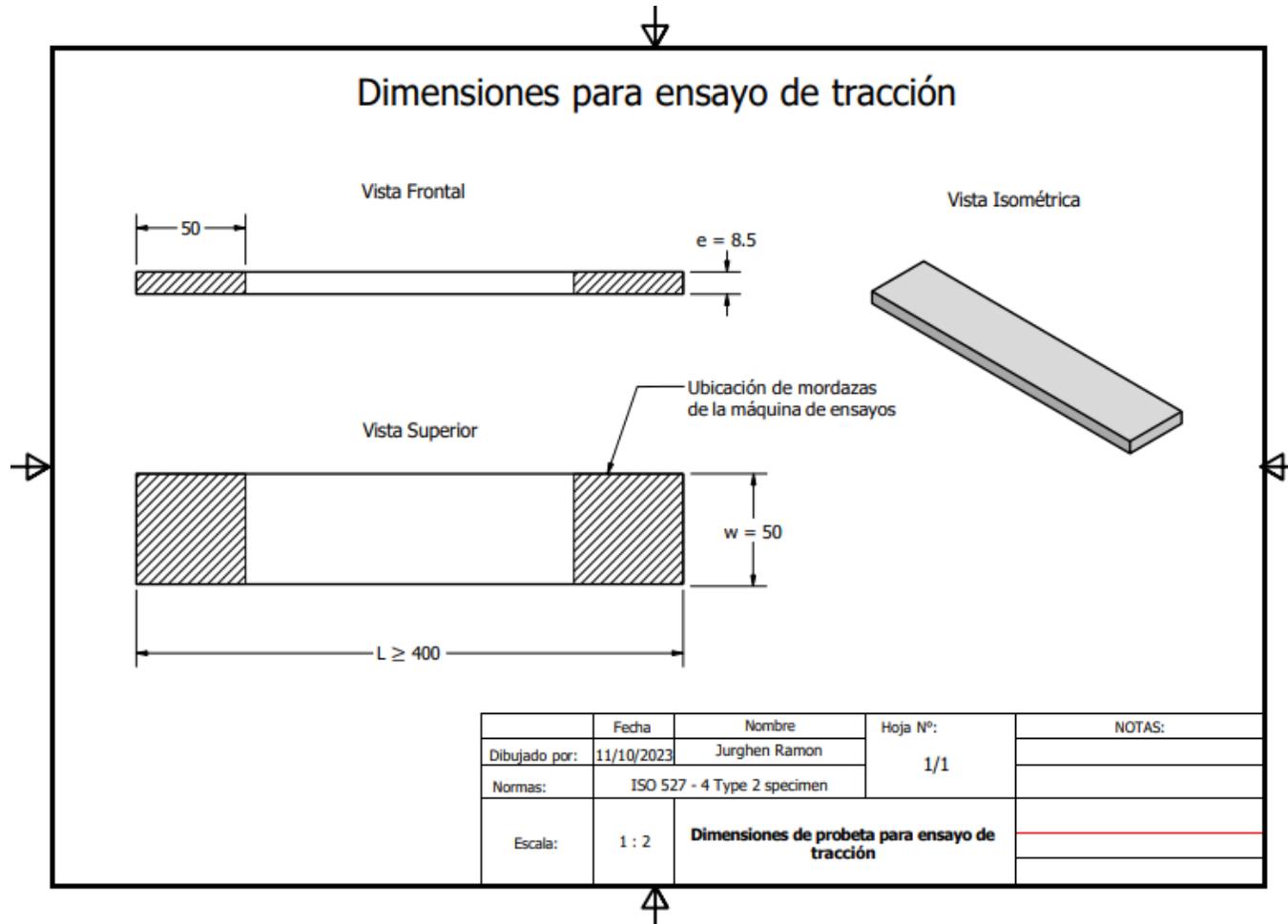
QCA S.A.
Departamento Técnico
Caracas 1051 - Venezuela
Fono: 52 2 60 1171
Fax: 52 2 60 1145
E-mail: qca@qca.com.ve

RASE

APÉNDICE D
Diseño de Especímenes

Figura D.1

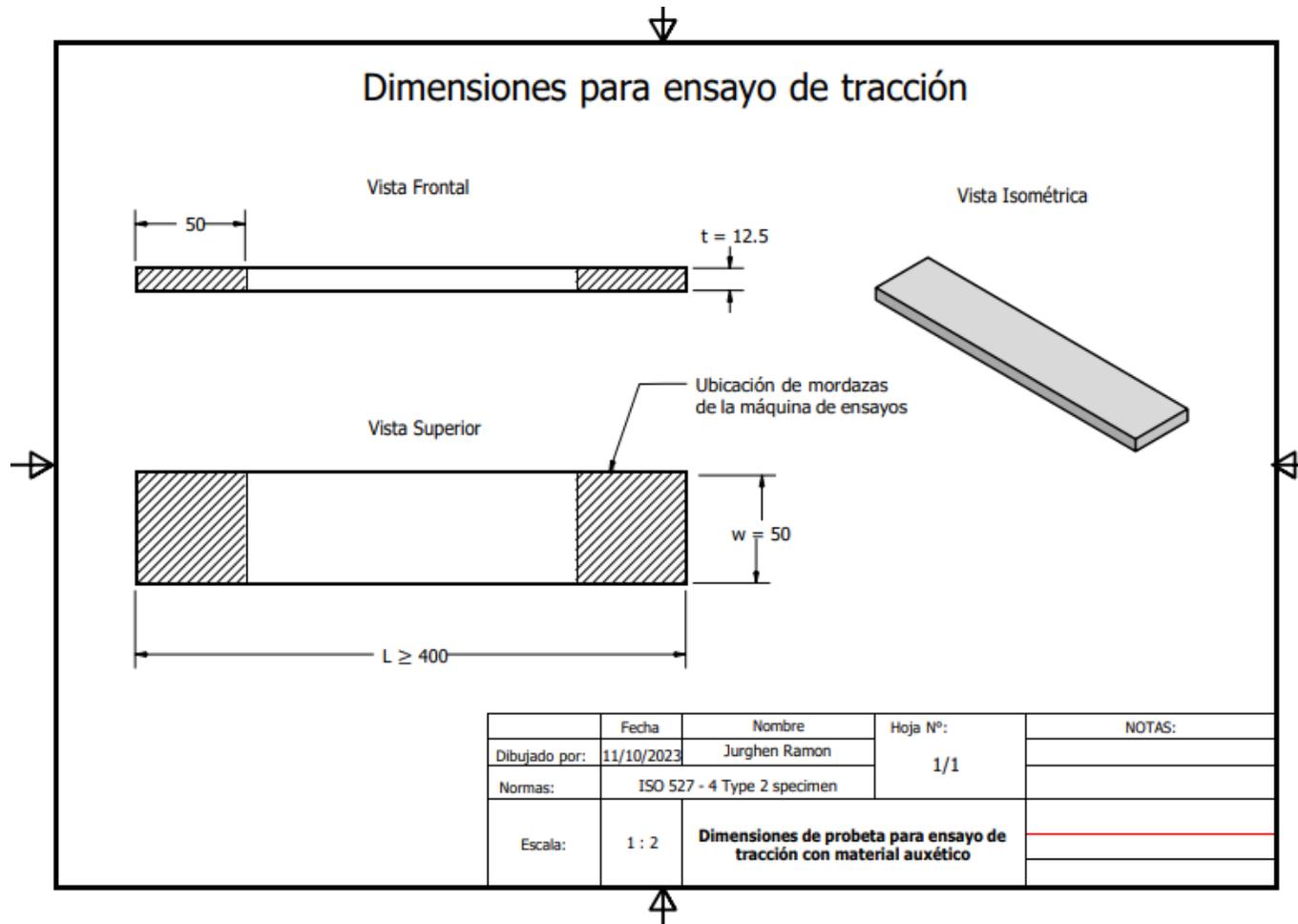
Dimensiones de probetas para ensayos de tracción



Nota: Se observa el diseño de las probetas de tracción bajo la Norma ISO 527-4 Type 2

Figura D.2

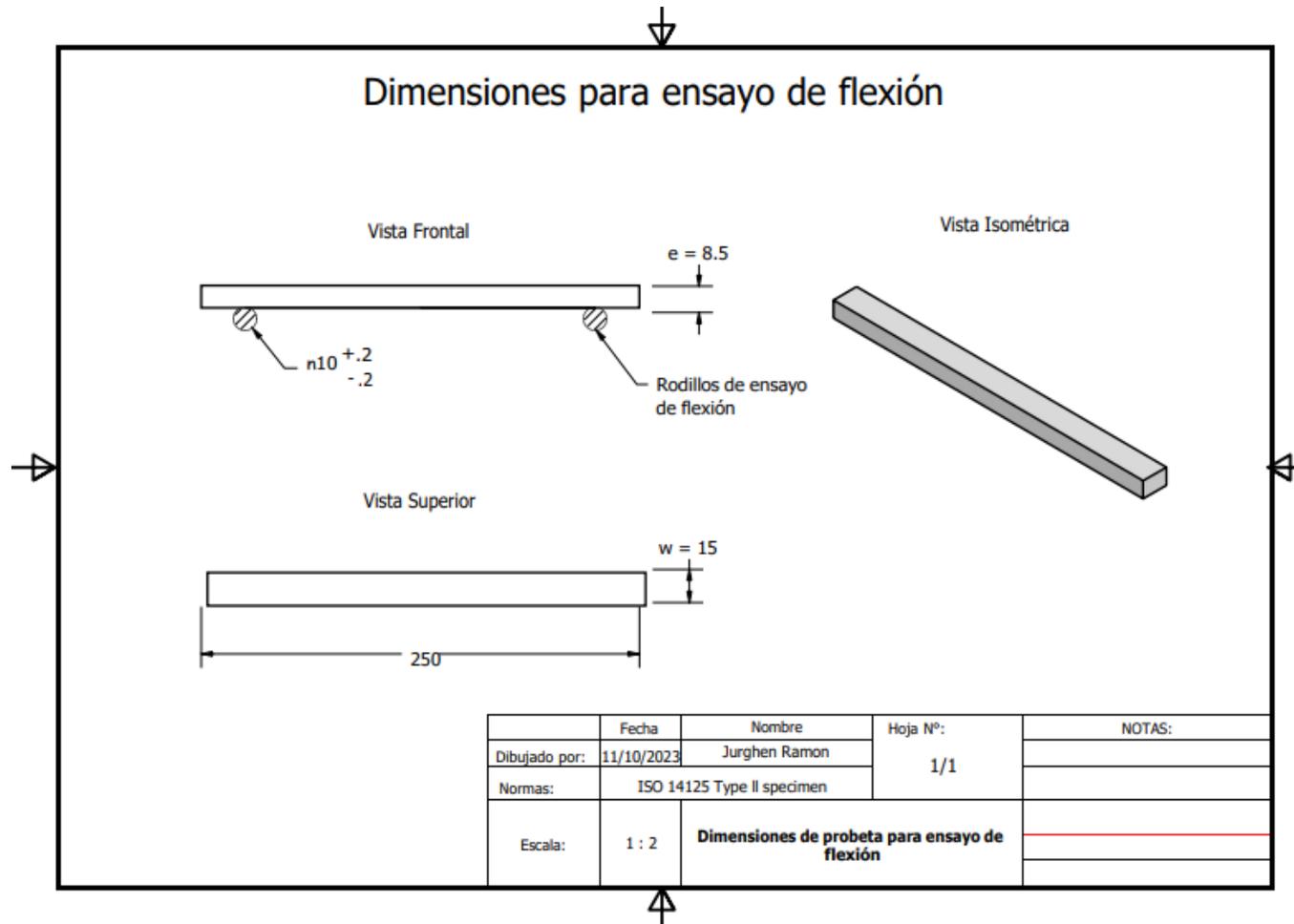
Dimensiones de probetas para ensayos de tracción con material auxético



Nota: Se observa el diseño de las probetas de tracción con material auxético bajo la Norma ISO 527-4 Type 2

Figura D.3

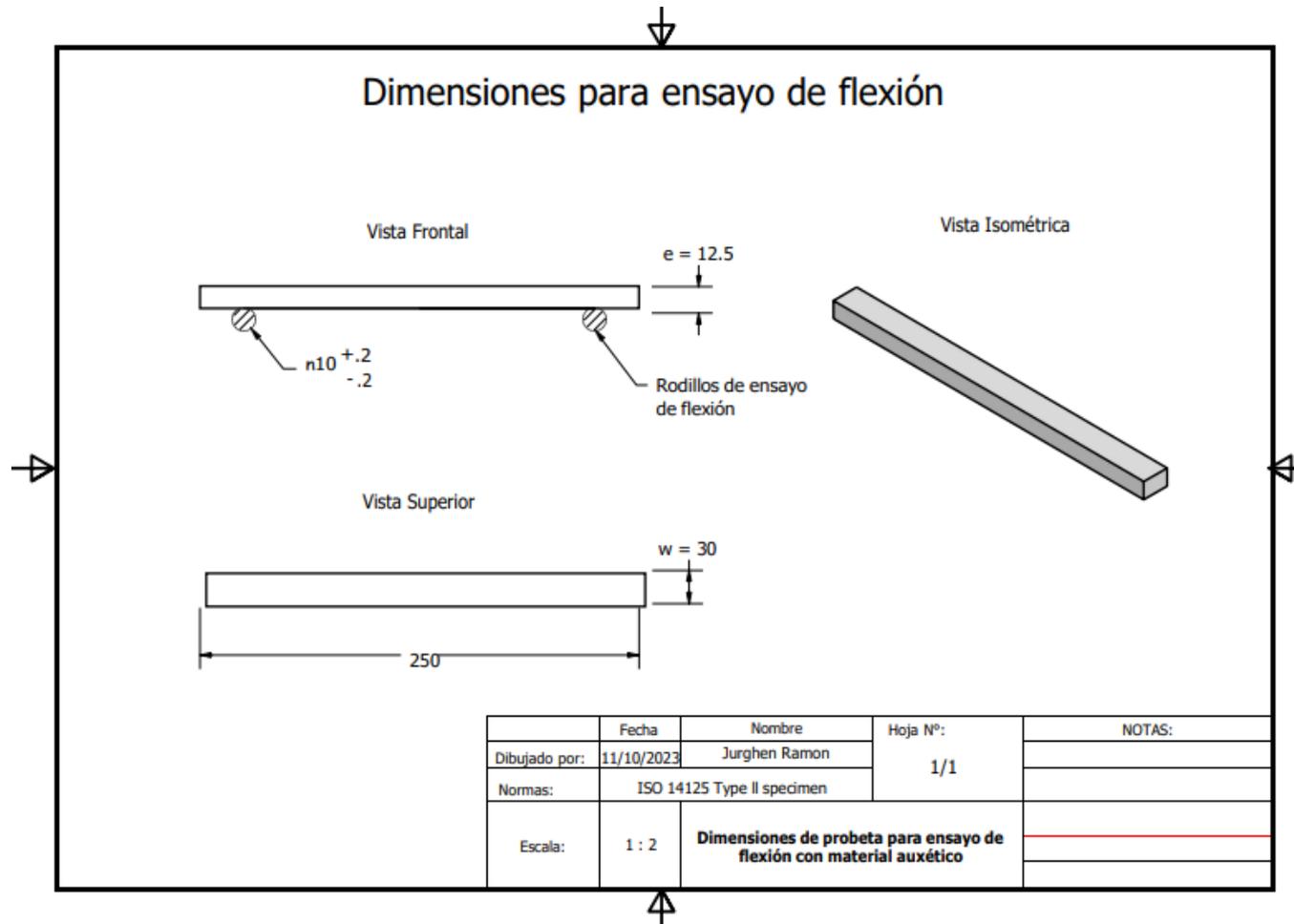
Dimensiones de probetas para ensayos de flexión



Nota: Se observa el diseño de las probetas de flexión bajo la Norma ISO 14125 Type II

Figura D.4

Dimensiones de probetas para ensayos de flexión con material auxético



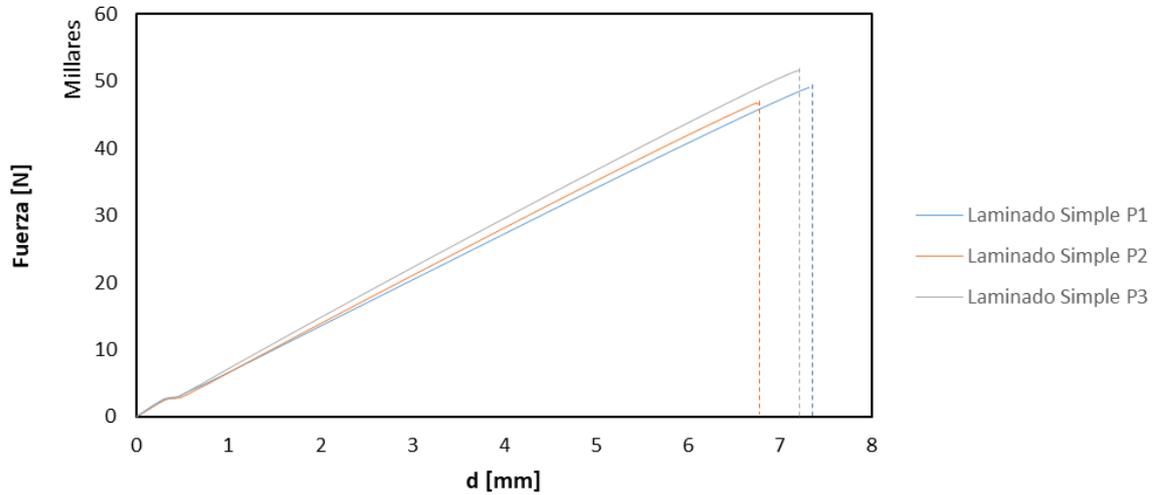
Nota: Se observa el diseño de las probetas de flexión bajo la Norma ISO 14125 Type II

APÉNDICE E

Resultados Experimentales

Figura E.1

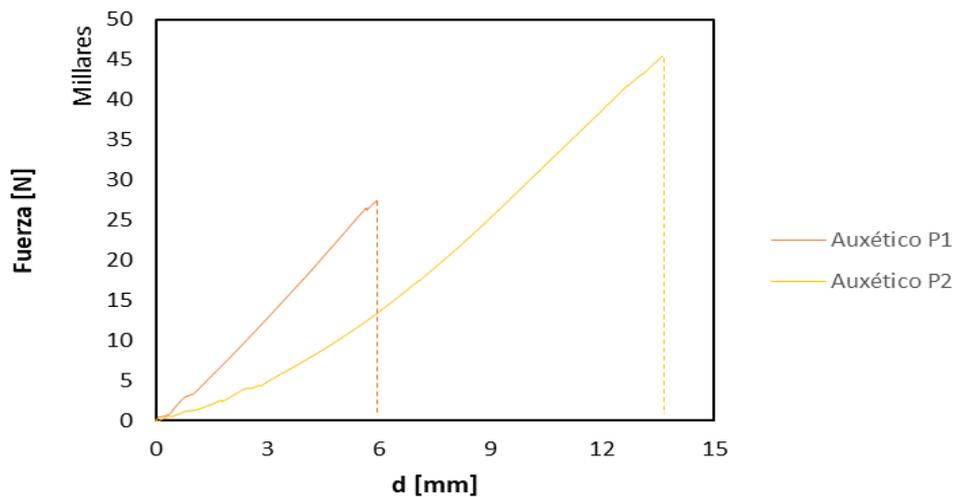
Resultados del ensayo de tracción con laminado simple



Nota: Se observa los resultados experimentales del ensayo de tracción con laminado simple, donde se presenta convergencia en las tres pruebas.

Figura E.2

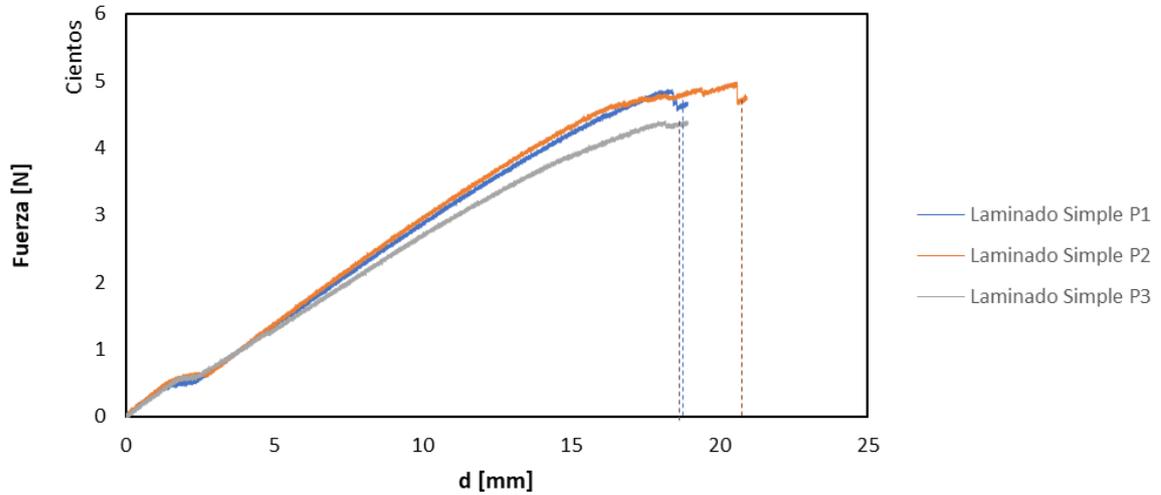
Resultados del ensayo de tracción con material auxético



Nota: Se observa los resultados experimentales del ensayo de tracción con material auxético, donde se presenta una variación de las pruebas.

Figura E.3

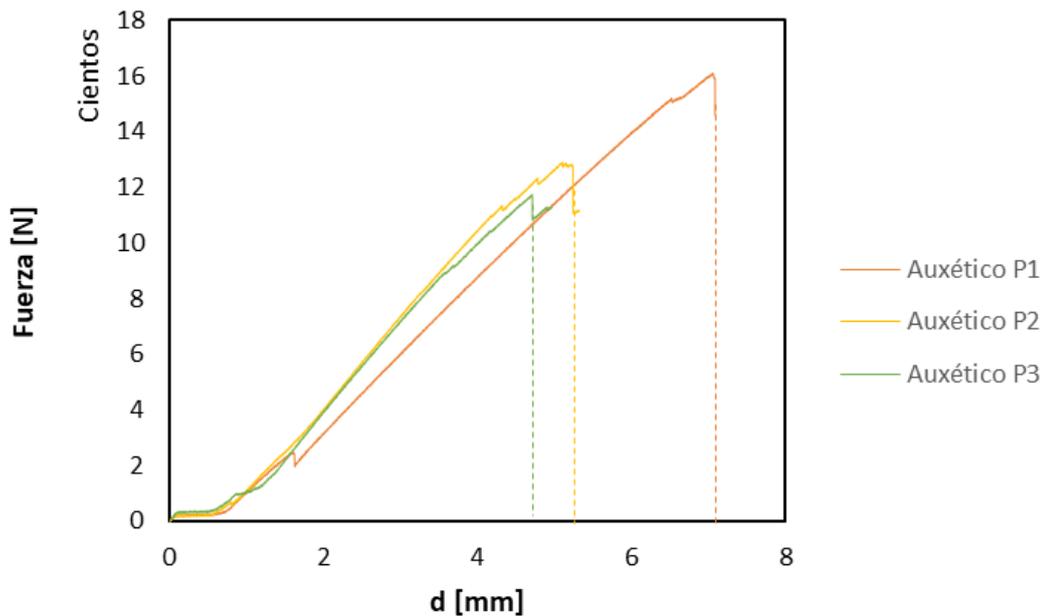
Resultados del ensayo de flexión con laminado simple



Nota: Se observa los resultados experimentales del ensayo de flexión con laminado simple, donde se presenta convergencia en las tres pruebas.

Figura E.4

Resultados del ensayo de flexión con material auxético

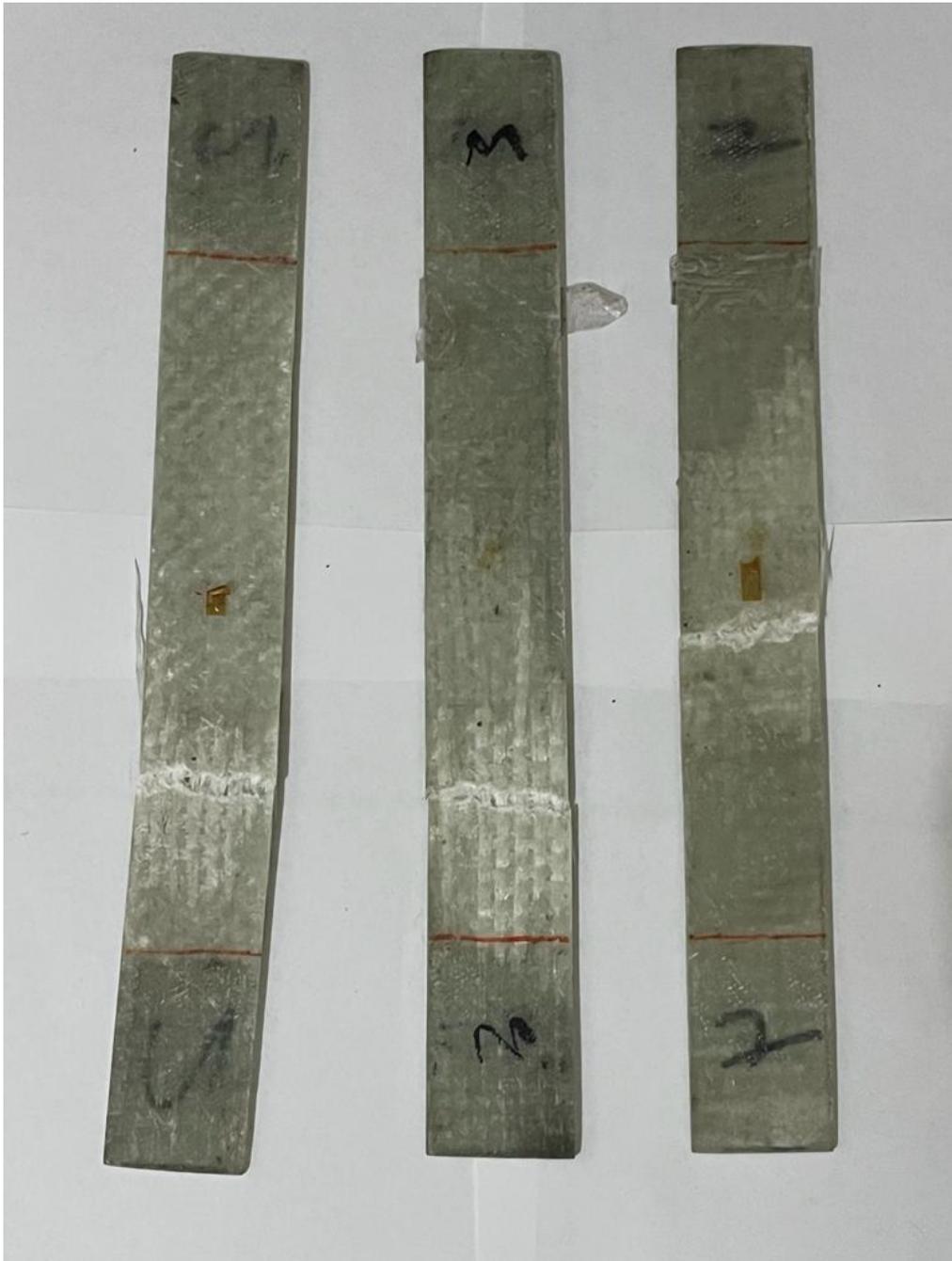


Nota: Se observa los resultados experimentales del ensayo de flexión con material auxético, donde se presenta convergencia en dos pruebas de las tres realizadas.

APÉNDICE F
Resultados Fotográficos

Figura F.1

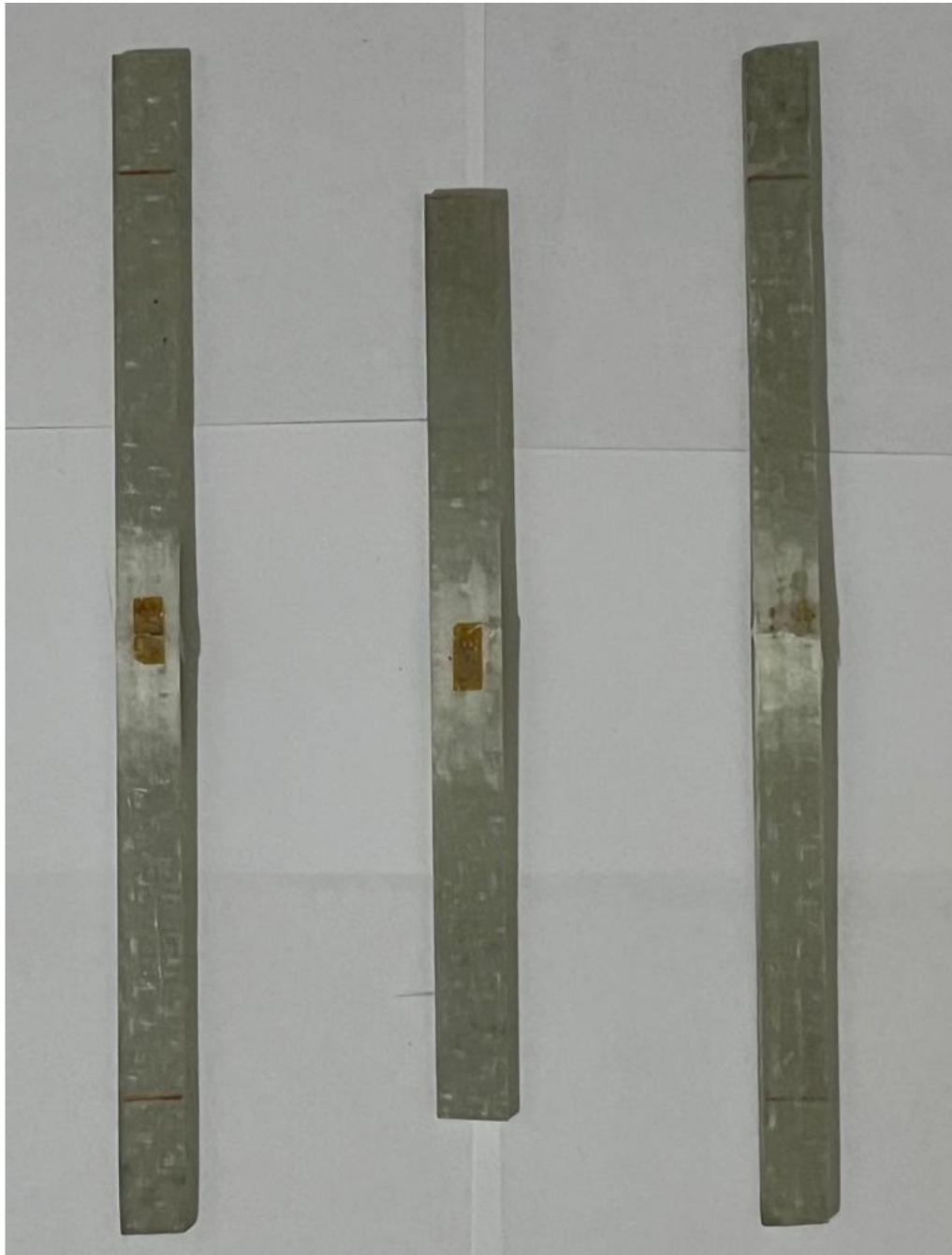
Resultados fotográficos de los especímenes para laminado simple en tracción



Nota: Se observa un desprendimiento del laminado en cada uno de los especímenes, del ensayo de tracción con laminado simple.

Figura F.2

Resultados fotográficos de los especímenes para laminado simple en flexión



Nota: Se observa una ruptura del laminado en cada uno de los especímenes, del ensayo de flexión con laminado simple.

Figura F.3

Resultados fotográficos de los especímenes con material auxético en tracción



Nota: Se observa que existe una ruptura y delaminación debido a los auxéticos colocados en el primer espécimen, pero en el segundo espécimen no se presenta una delaminación tan pronunciada.

Figura F.4

Resultados fotográficos de los especímenes con material auxético en flexión



Nota: Se observa que en los tres especímenes se presenta una pequeña delaminación interna pero no se presenta ruptura de ningún espécimen.