

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Estudio Experimental de la Influencia de Burbujas en las Propiedades

Mecánicas de Laminados en Casco en Yate

Código de proyecto integrador:

INGE-2971

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Jean Carlos Guerrero Amendaño

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo y mi carrera, ante todo, a mis padres, Silvia y Carlos, por impulsarme siempre en el estudio y creer sin reservas en mis capacidades. A mis hermanas, Michelle y Angélica, por su compañía constante, su apoyo en todo y su cariño. A toda mi familia, que ha celebrado cada uno de mis logros. A mi pareja y a mis amigos, que me han acompañado en las últimas etapas y se han alegrado conmigo por lo conseguido. Y, finalmente, me lo dedico a mí por la constancia y el enorme esfuerzo que ha significado esta etapa; que sea la primera de muchas.

Agradecimientos

Expreso mi profunda gratitud a Dios por la salud y la guía en este camino. Agradezco sinceramente al PhD. Patrick Townsend, cuya experiencia, generosidad intelectual y paciencia fueron fundamentales en el desarrollo de este proyecto. Gracias también a los profesores de la Facultad de Ciencias Marítimas por compartir sus conocimientos y motivarnos siempre a mejorar. A mis padres y hermanas, mi reconocimiento por ser los pilares de mi vida; y a mis amigos de la facultad, por convertir esta experiencia universitaria en un hogar. Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todos los que, de alguna manera, han formado parte de este recorrido: su apoyo, presente o pasado, hace posible este logro.

Declaración expresa

Yo Jean Carlos Guerrero Amendaño acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo 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 beneficios que corresponda a favor del autor o 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 mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/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 realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de agosto del 2025.

Jean Carlos Guerrero Amendano

Evaluadores

Mgtr. José María Rodríguez Lamchang

Profesor de la Materia

PhD. Patrick Roger Townsed Valencia

Tutor del proyecto

Resumen

Este estudio analiza cómo las burbujas de gas afectan las reparaciones de laminados GFRP en el yate El Mangle, ubicado en las Islas Galápagos. Se crearon y construyeron muestras representativas, tanto con y sin defectos, y se realizaron pruebas de tracción según el estándar ISO 527-4. A partir de las curvas de fuerza frente a desplazamiento, se obtuvieron curvas de esfuerzo frente a deformación, y se calcularon parámetros mecánicos como la tensión máxima ($\sigma_{\max}$), módulo elástico (E), deformación al rotura (ϵ_{rot}) y parámetros energéticos, incluyendo la tenacidad total, la energía de fractura antes del pico y la energía residual después del pico. Los resultados muestran que la presencia de burbujas reduce la resistencia final, el módulo elástico y la deformación a la rotura, además de disminuir considerablemente la energía absorbida, lo que indica una menor resistencia al daño y una pérdida de capacidad de soporte. El análisis estadístico confirma la magnitud y relevancia de estos cambios, apoyando la propuesta de criterios de evaluación basados en las pérdidas permitidas de propiedades y en la forma del defecto. Se presentan recomendaciones de procesos, como impregnación, desairado, compactación y curado, así como técnicas de inspección como el ensayo por partículas magnéticas (END), que podrían mejorar la fiabilidad de los arreglos en materiales GFRP durante su uso.

Palabras clave: GFRP, burbujas, propiedades, influencia.

Abstract

This study analyzes how entrapped gas bubbles affect GFRP laminate repairs on the yacht El Mangle, located in the Galápagos Islands. Representative specimens—both with and without defects—were designed and fabricated, and tensile tests were performed according to ISO 527-4. Force–displacement curves were converted into stress–strain curves, from which mechanical parameters were calculated: maximum stress (σ_{max}), Young’s modulus (E), and strain at break (ϵ_{break}), along with energy-based metrics, including total toughness, pre-peak fracture energy, and post-peak residual energy. The results show that the presence of bubbles reduces ultimate strength, elastic modulus, and strain at break, and markedly decreases absorbed energy, indicating lower damage tolerance and a loss of load-carrying capacity. Statistical analysis confirms the magnitude and significance of these changes, supporting proposed evaluation criteria based on allowable property losses and defect morphology. Process recommendations are presented—such as improved impregnation, deaeration, compaction, and curing—together with inspection techniques like magnetic particle testing (NDT), to enhance the reliability of GFRP repairs in service.

Keywords: GFRP, bubbles, properties, influence.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Descripción del Problema.....	13
1.2. Justificación del Problema.....	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. <i>Objetivo General.....</i>	<i>15</i>
1.3.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
1.4. Marco teórico.....	15
1.4.1. <i>Construcción naval con fibra de vidrio</i>	<i>17</i>
1.4.2. <i>Proceso de Moldeo Manual de Fibra de Vidrio</i>	<i>17</i>
1.4.3. <i>Teoría de la fractura.....</i>	<i>18</i>
1.4.4. <i>Propiedades mecánicas laminados de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP).....</i>	<i>19</i>
1.4.5. <i>Ensayo de tracción en laminados y parámetros obtenidos</i>	<i>20</i>
1.4.6. <i>Diferencial de fuerza de tensión y energía residual.</i>	<i>20</i>
1.4.7. <i>Teoría de la viga-casco (resistencia longitudinal del buque)</i>	<i>21</i>
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1. Descripción de Equipos.....	25
2.2. Diseño de las probetas.....	25
2.3. Laminado de las probetas.....	27
2.3.1. <i>Construcción del laminado convencional.....</i>	<i>28</i>
2.3.2. <i>Reparación de laminado convencional.....</i>	<i>30</i>
2.3.3. <i>Reparación de laminado convencional con burbuja de aire.</i>	<i>31</i>
2.4. Descripción del ensayo de tracción	34
2.4.1. <i>Diseño del ensayo</i>	<i>34</i>
2.5. Resultados Esperados	36

3. RESULTADOS Y ANALISIS.....	38
3.1. Resultados ensayo de Tracción	39
3.2. Resultados de propiedades mecánicas calculadas	40
3.3. Análisis de Resultados.....	52
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
4.1. Conclusiones	56
4.2. Recomendaciones	57
4.3. Alcance, limitaciones y líneas futuras.....	58
5. REFERENCIAS.....	59
6. APÉNDICE.....	63

Abreviatura

GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio)
END	Ensayos No Destructivos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
SD	<i>Standard Deviation</i> (Desviación estándar)
CV	<i>Coefficient of Variation</i> (Coeficiente de variación)
IC95	Intervalo de confianza al 95 %
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i> (Ensayos No Destructivos)

Simbología

Símbolo	Descripción	Unidad
σ	Esfuerzo normal	MPa
$\sigma_{\max}$	Esfuerzo máximo alcanzado antes de la fractura	MPa
E	Módulo de elasticidad (módulo de Young)	MPa o GPa
ε	Deformación unitaria (elongación relativa)	
ε_{rot}	Deformación a la rotura	
F	Fuerza aplicada	N
A	Área transversal efectiva de la probeta	mm ²
U_t	Tenacidad total (energía absorbida hasta la fractura)	N·mm o J
U_f	Energía de fractura (hasta el esfuerzo máximo)	N·mm o J
U_R	Energía residual (posterior al esfuerzo máximo)	N·mm o J
L_0	Longitud calibrada inicial de la probeta	mm
ΔL_{rot}	Elongación absoluta a la rotura	mm

Índice de Figuras

Figura 1.1. Condiciones de la embarcación	22
Figura 1.2 <i>Detalles estructurales del fondo del yate y zona a emular con las probetas</i>	23
Figura 2.1 <i>Flujograma del estudio de las probetas.</i>	28
Figura 2.2 <i>Diseño de plancha y probetas</i>	29
Figura 2.3 <i>Configuración de plancha</i>	30
Figura 2.4 <i>Dimensiones de probetas para ensayo de tracción</i>	30
Figura 2.5 <i>Configuración de las probetas con reparación convencional.</i>	31
Figura 2.6 <i>Configuración de las probetas con reparación y el defecto.</i>	31
Figura 2.7 <i>Resultado de las probetas fabricadas sin defecto (UM) y con defecto (M)</i>	32
Figura 2.8 <i>Parámetros del defecto</i>	32
Figura 2.9 <i>Máquina de ensayo de tracción SHIMADZU.</i>	34
Figura 3.1 <i>Fuerza de tensión aplicada vs la deformación de las probetas sin defecto (UM).</i> ..	39
Figura 3.2 <i>Fuerza de tensión aplicada vs la deformación de las probetas con defecto (M).</i> ..	40
Figura 3.3 <i>Esfuerzo vs la deformación de las probetas sin defecto (UM).</i>	42
Figura 3.4 <i>Esfuerzo vs la deformación de las probetas con defecto (M).</i>	42
Figura 3.5 <i>Zona inicial elástica de probetas sin defecto.</i>	44
Figura 3.6 <i>Zona inicial elástica de probetas con defecto.</i>	45
Figura 3.7 <i>Fuerza última de tensión en función del área promedio del defecto.</i>	46
Figura 3.8 <i>Módulo de elasticidad en función del área promedio del defecto.</i>	47
Figura 3.9 <i>Esfuerzo último en función del área promedio del defecto.</i>	47
Figura 3.10 <i>Tabla de resultados de propiedades mecánicas en función del área promedio del defecto.</i>	48
Figura 3.11 <i>Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM1 y M1.</i>	49

Figura 3.12 <i>Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM2 y M2.</i>	50
Figura 3.13 <i>Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM3 y M3.</i>	50
Figura 3.14 <i>Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM4 y M4.</i>	51
Figura 3.15 <i>Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM5 y M5.</i>	51

Índice de Tablas

Tabla 2.1. <i>Características principales de las probetas</i>	26
Tabla 2.2 <i>Configuración de probetas a ensayar</i>	27
Tabla 2.3 <i>Materiales para la fabricación de las probetas</i>	29
Tabla 2.4 <i>Dimensiones del defecto inducido</i>	33
Tabla 3.1 <i>Fuerza de Tensión Máxima de probetas</i>	40
Tabla 3.2 <i>Esfuerzos últimos de las probetas ensayadas.</i>	43
Tabla 3.3 <i>Parámetros estadísticos del esfuerzo último.</i>	43
Tabla 3.4 <i>Módulo de elasticidad probetas con y sin la burbuja de aire.</i>	45
Tabla 3.5 <i>Parámetros estadísticos del módulo de elasticidad.</i>	45
Tabla 3.6 <i>Tenacidad en probetas sin el defecto.</i>	48
Tabla 3.7 <i>Tenacidad en probetas con el defecto de la burbuja de aire.</i>	48

Capítulo 1

1. Introducción

Los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio (GFRP por sus siglas en inglés) han adquirido una presencia significativa en la industria naval, tanto en la construcción primaria de embarcaciones, tales como yates de turismo construidos en el Ecuador, como en procesos de mantenimiento y reparación. La aplicación de este material en embarcaciones se debe a sus propiedades mecánicas favorables en comparación con otros materiales como el acero, como alta rigidez específica, sobresaliente resistencia a la corrosión provocada por el mar y la sencillez en su manipulación y procesamiento (Santulli, 2007), que han sido determinantes al escoger el material de construcción, dependiendo del tipo de barco.

No obstante, una limitación recurrente en su aplicación práctica es la presencia de defectos inherentes al proceso de fabricación o reparación, como las inclusiones gaseosas o burbujas. Estos defectos pueden actuar como focos de daño e impactar críticamente el desempeño estructural del laminado (Gaffney & Botsis, 1999). Esto es especialmente cierto cuando se emplean técnicas manuales sin control estricto de variables humanas, entorno y herramientas. Por ejemplo, al aplicar la resina con brochas o rodillos en el laminado manual, se puede quedar aire entre las capas, lo que provoca porosidad interna o burbujas. De igual forma, si el curado se realiza en ambientes con alta humedad relativa, condición que es recurrente en algunas zonas costeras de Ecuador y también según la temporada del año, el vapor de agua puede reaccionar con la resina. Esto produce micro explosiones que dejan cavidades internas o vacíos (Atodaria et al., 1997).

El estudio de cómo se rompen los materiales compuestos ha mostrado que el comportamiento frente a la propagación de grietas, especialmente bajo cargas cíclicas o golpes, es muy sensible a la microestructura del material y a la presencia de discontinuidades internas, (Baley, 2002), (Kirugulige & Tippur, 2009). Por ejemplo, Atodaria et al. (1997). propusieron un modelo para el crecimiento de grietas por fatiga que considera la propagación

a lo largo de todo el ciclo de carga. Ellos observaron que los defectos internos, como las inclusiones de gas, disminuyen el límite de propagación y cambian la forma en que crecen las grietas. Silva et al. (2006) encontraron que la resistencia a fracturas de los compuestos reforzados con fibras naturales disminuye mucho cuando hay varios defectos distribuidos, debido a la concentración de tensiones locales.

El impacto de las burbujas de gas en la estructura de un laminado de fibra de vidrio puede llevar a una disminución de la resistencia máxima y también a cambios en los modos de fractura. Los defectos como vacíos que dejan las burbujas pueden alterar los modos de fractura, influyendo en cómo las grietas se desarrollan y propagan, lo que tendría consecuencias en la resistencia del material. Los estudios experimentales sobre materiales compuestos utilizaron la técnica de Correlación Digital de Imágenes y fotografía de alta velocidad para mapear de manera interactiva los campos de deformación mientras las grietas se forman en el material (Baley, 2002), (Liu & Hughes, 2008). Lee et al. (2009) mostraron que la orientación de las fibras, combinada con defectos internos, modifica la velocidad de propagación de grietas y las trayectorias de fractura. Esto muestra un comportamiento anisotrópico, es decir, el material se comporta de manera diferente en distintas direcciones, lo cual se ve más afectado por la presencia de vacíos.

Desde una perspectiva estructural, la presencia de imperfecciones, como burbujas en secciones reparadas del casco, puede influir de manera adversa en el rendimiento frente a la fatiga, la resistencia a impactos y la durabilidad general del material compuesto, especialmente en áreas expuestas a flexión o a cargas dinámicas. La evaluación de la resistencia residual en reparaciones defectuosas se vuelve crítica en el caso general de las embarcaciones sometidas a efectos de las olas, el viento y condiciones de navegación como aquellas que operan en el archipiélago, donde las exigencias operativas incluyen ciclos de

carga variables, vibraciones y exposición a ambientes agresivos (Tippur et al., 1991), (Tugrul Seyhan et al., 2008).

Por ende, el presente estudio se enfoca en analizar de forma experimental, a través de probetas, el efecto de burbujas de gas en reparaciones realizadas con GFRP en estructuras navales de una embarcación de 13.5m de eslora que opera en las Islas Galápagos. Se elaborarán probetas siguiendo las normas ISO 527-4: 2022, las cuales presentarán tanto defectos inducidos como ausencia de defectos, a través de la utilización de técnicas de fabricación mediante laminado manual sobre moldes planos, y se someterán a pruebas de tracción con el propósito de analizar la variación en sus propiedades debido a la presencia de burbujas a lo largo de la reparación.

1.1. Descripción del Problema

En el campo de la industria naval, para las embarcaciones constituidas de plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) se detectan fracturas periódicamente por las áreas reparadas, como fisuras, ampollas o filtraciones, lo que también informan tras las reparaciones que deberían lograr restaurar la integridad estructural del laminado. Evidentemente, las técnicas que se utilizan no siempre restauran las propiedades mecánicas del material al original.

La obra de Pascoe (2023) es un buen ejemplo en la que la embarcación de 35 pies, con ampollas "pimple rash", fue sometida a una reparación completa mediante aplicación de un sistema epóxico luego de eliminación del casco y aplicación de una capa antifouling sobre recubrimiento húmedo. Se garantizaba la reparación por cinco años, pero a los pocos meses el 50 % de las ampollas volvieron a aparecer. La investigación posterior mostró que no se habían eliminado los huecos de las ampollas originales, existirían zonas del "skin-out mat" con fibras no completamente impregnadas y huecos, y se utilizaron materiales de enrasado blandos y aplicados sin el tratamiento adecuado.

Este caso muestra que las fallas en las reparaciones pueden deberse a distintas causas: discontinuidades en la adherencia interlaminar, insuficiente saturación, uso de materiales inadecuados y fallos en la preparación del soporte. Todo ello favorece la concentración de esfuerzos, la reducción de la resistencia mecánica (tracción y flexión) y la iniciación y el crecimiento de la grieta bajo carga.

Así, la repetición de fallos tras la aplicación de un procedimiento correctivo pone de manifiesto una gran vulnerabilidad estructural, no sólo de embarcaciones individuales, sino de todo el sector naval que emplea GFRP —una limitante técnica cuya resolución es necesaria para que se garantice la fiabilidad y durabilidad de la reparación.

1.2. Justificación del Problema

La relevancia de este problema es considerable para el sector de la construcción naval, dado que se refleja en la seguridad de sus componentes estructurales, el comportamiento y la vida útil de las embarcaciones construidas o reparadas con fibra de vidrio. La reiteración de los defectos en la zona de reparaciones -por ejemplo, las fisuras, las ampollas o la filtración- no solo implica un incremento del costo operacional por tener que realizar reparaciones nuevas, sino, que también están relacionados con los períodos de no disponibilidad que implica en los niveles de disponibilidad de las unidades y la fiabilidad de los propios procedimientos de mantenimiento (Pascoe, 2023).

Las burbujas de aire en la interfase de reparación, ciertamente uno de los factores técnicos más relevantes, operan como un concentrador de esfuerzos, reducen la adhesión interlaminar, reducen la resistencia mecánica, y favorecen la iniciación y evolución de las grietas bajo condiciones de carga de servicio (Mehdikhani et al., 2019; Jordan et al., 2022) y, si no son detectados y gestionados durante el proceso de reparación, los defectos limitan la eficacia de las técnicas convencionales de reparación y, sobre todo, la dadas por las nuevas que generan la reaparición de los daños.

La investigación y la resolución de esta problemática conllevan mejorar los métodos de reparación, estandarizar los procedimientos de control de calidad y extender la duración de las embarcaciones, lo que se traduce en la reducción de costos, la mejora de la seguridad y el aumento de la competitividad en el sector naval.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Estudiar el efecto de las burbujas de gas dentro del laminado del yate “El Mangle”, ubicado en las Islas Galápagos, mediante la fabricación y ensayo de probetas con base en la teoría de la mecánica de fracturas.

1.3.2. *Objetivos específicos*

1. Diseñar y fabricar probetas representativas de una reparación en laminados GFRP —con y sin defectos (burbujas)— fundamentadas en el estado del arte y en las técnicas habituales de reparación, y someterlas a ensayos de tracción en máquina universal para obtener y comparar sus propiedades mecánicas, interpretando los resultados bajo la teoría de la fractura.
2. Cuantificar la influencia de burbujas de aire inducidas sobre $\sigma_{\text{máx}}$, E , ϵ_{rot} , tenacidad, energía de fractura y energía residual, para determinar la severidad del defecto en el laminado reparado, mediante ensayos de tracción conforme a ISO 527-4 y conversión $F-\Delta \rightarrow \sigma-\epsilon$ con cálculo energético.
3. Comparar las propiedades mecánicas y energéticas entre probetas con y sin defecto, para evaluar el impacto en la integridad estructural, mediante análisis estadístico (media, SD, CV, IC95, y pruebas t-Welch/Mann–Whitney según supuestos).

1.4. Marco teórico

De acuerdo con Chawla (2012) y Mallick (2007), los materiales compuestos consisten en una mezcla o combinación a escala micro o macro de dos o más fases que forman una

matriz, las cuales difieren en composición química, forma y que combinan las propiedades de los materiales constituyentes logrando una alta resistencia, rigidez y ligereza en comparación con los barcos construidos con metal.

La matriz determina su clasificación según la configuración del laminado y los materiales utilizados. Generalmente se identifican tres grupos principales:

- Materiales compuestos de matriz metálica
- Materiales compuestos de matriz cerámica
- Materiales compuestos de matriz polimérica

Dentro de la industria naval el material compuesto que más se utiliza es con matriz polimérica reforzados con fibra de carbono, fibra de vidrio y fibras de aramida (Besednjak, 2009).

El Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio o GRFP (por sus siglas en inglés), usado ampliamente en construcciones y reparaciones de embarcaciones recreacionales, es un material compuesto donde la fibra de vidrio se utiliza como refuerzo de una matriz polimérica que actúa como aglomerante. La fibra proporciona resistencia mecánica, resistencia al calor y estabilidad dimensional al material. Además, la matriz proporciona resistencia dieléctrica, química y a las condiciones atmosféricas (Diniță et al., 2023).

Las características del PRFV poseen una ventaja significativa en comparación con los materiales de construcción tradicionales, específicamente el acero y el aluminio. Las cuales se detallarán a continuación:

- Peso reducido debido a su baja densidad.
- Posee un alto grado de aislamiento eléctrico, sin conducir electricidad.
- Resistencia química.
- Incombustible.
- Estabilidad dimensional, escasamente susceptible a las fluctuaciones térmicas.

- Posee un coeficiente de dilatación reducido.
- Posee una elevada resistencia mecánica, con una tracción que supera la del acero.
- Elevada adaptabilidad.
- Costos reducidos de producción y mantenimiento.

Es importante recalcar que estas propiedades fluctúan en función de varias variables como el tipo de fibra, su orientación y la resina empleada.

1.4.1. Construcción naval con fibra de vidrio

La fibra de vidrio se utiliza de forma extensiva en la industria de la construcción de embarcaciones; de hecho, ayuda también a una menor reducción en la cantidad de combustible que se necesita. Por estas razones, este material se emplea en la construcción de cascos, superestructuras, cubiertas, mástiles, hélices y otros componentes navales (Pérez & Martínez, 2016).

El proceso de fabricación de embarcaciones con fibra de vidrio implica la elaboración de moldes según las especificaciones del diseño. Estos moldes pueden fabricarse mediante diferentes métodos, como madera, yeso, arcilla, masilla epoxi, espuma de poliuretano, cera o combinaciones de estos materiales (Wales, 2016). Entre las técnicas de moldeo disponibles (aspersión, prensado en frío, transferencia, vacío, centrifugación, etc.), el moldeo manual es el más común en el sector naval ecuatoriano y será el método aplicado en este proyecto (Wales, 2016). Sin embargo, este método es susceptible a errores humanos y condiciones ambientales desfavorables, lo que con frecuencia conduce a la formación de defectos internos como burbujas de aire, porosidad o vacíos. Estos defectos pueden originarse por una impregnación deficiente de la fibra, el uso inadecuado del rodillo de laminado o por reacciones de humedad con la resina durante el curado (Wales, 2016).

1.4.2. Proceso de Moldeo Manual de Fibra de Vidrio

El proceso de moldeo manual de fibra de vidrio consta de las siguientes fases:

1. Preparación del molde: Es necesario tratar la superficie del molde aplicando productos desmoldantes que favorecen el desmoldeo de la pieza acabado.
2. Aplicación del gel-coat: El gel-coat conforma esa primera capa que define la terminación estética como funcional por lo que ha de prestársele atención.
3. Posicionamiento de la fibra de vidrio: Se propone iniciar y concluir el moldeado con una capa de manta de vidrio (MAT), que permita alcanzar mejor resistencia.
4. Impregnar con resina poliéster: La fibra ha de saturarse de resina ya acelerada y catalizada que garantice la polimerización de la misma (Wales, 2016).

1.4.3. Teoría de la fractura

Para los materiales compuestos, el comportamiento de los mismos respecto a las grietas no es homogéneo ni predecible, lo que contrasta con los materiales homogéneos, como puede verse en laminados de fibra de vidrio, donde el comportamiento de los laminados respecto a la existencia de fibras, interfaces y defectos también regula la existencia de estos modos de fallo.

Dvorak (2000) muestra cómo tal comportamiento inelástico depende de la cantidad y tipo de daño acumulado, incluyendo mecanismos como los de la delaminación, la microfisuración de la matriz o el delaminado de la matriz respecto a su refuerzo. Por su parte, Calin-Dumitru (2018) indica que las tenacidades a la fractura disminuyen considerablemente cuando aparecen vacíos distribuidos en la red del laminado, ya que estos últimos acaban favoreciendo el inicio del daño de la matriz o de la interfaz entre la fibra y la resina. En este sentido, se puede considerar la burbuja de aire como una cavidad deficiente que puede alterar los parámetros de fractura del laminado o la red que lo compone (Suhot & A. R., 2014).

1.4.3.1. Análisis del laminado

Cada capa tiene un espesor, las propiedades de cada capa, así como su ángulo de orientación, y las propiedades globales del laminado obtenidas mediante matrices de rigidez.

La matriz constitutiva de una lámina ortotrópica en su sistema local:

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

En el caso de MAT, se simplifica como un material isotrópico:

$$E_1 = E_2, \quad G_{12} = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \nu_{12} = \nu_{21} \quad (1.2)$$

Para unificar y formar la matriz global se usa la transformación de tensiones:

$$[Q'] = T^{-1}[Q]T^{-T} \quad (1.3)$$

Donde T es la matriz de transformación de ángulos.

1.4.4. *Propiedades mecánicas laminados de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP)*

Un laminado GFRP es una combinación de una matriz polimérica (p. ej., poliéster o epoxi) y un refuerzo formado por fibras de vidrio con formas tipo roving y mat, cuya acción sinérgica determina su comportamiento: las fibras determinan la resistencia y rigidez, mientras que la matriz asegura la transferencia de esfuerzos, la unión interfacial y la protección de agentes medioambientales (Chawla, 2012; Mallick, 2007). El comportamiento mecánico depende de la fracción volumétrica de fibra, la orientación y la calidad de la impregnación/compactación.

1.4.5. Ensayo de tracción en laminados y parámetros obtenidos

El comportamiento a tracción se caracteriza mediante la conversión de la curva fuerza–desplazamiento a esfuerzo–deformación, siguiendo las condiciones de ensayo establecidas para plásticos reforzados con fibras (British Standards Institution, 2023). A partir de esa curva se determinan: esfuerzo máximo (resistencia última), módulo de elasticidad (pendiente en la zona elástica) y deformación a rotura. La adquisición y el tratamiento de datos de los marcos universales de ensayo pueden gestionarse con software dedicado que facilita la obtención de parámetros y reportes (Shimadzu Scientific Instruments, n.d.).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.5)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (1.6)$$

Además de las magnitudes “clásicas”, es fundamental evaluar indicadores energéticos que cuantifican la capacidad de absorber y disipar energía: tenacidad total (área bajo la curva), energía de fractura pre-pico y energía residual post-pico. Estos parámetros son especialmente sensibles a la delaminación y al estado de la interfaz fibra–matriz.

1.4.6. Diferencial de fuerza de tensión y energía residual.

Con los resultados del ensayo, se puede establecer la razón de pérdida de energía de deformación del laminado en función del área siendo:

F_{UM} : Unmodified force

F_M : Modified force

$$\Delta F = |F_{UM} - F_M| \quad (1.7)$$

En cuanto a la Residual Energy Difference, su valor es el siguiente por unidad de área.

A_B : Área de la burbuja en la superficie de la probeta

$$\Delta E_R = \Delta F * \frac{\delta}{A_B} \quad (1.8)$$

Para el caso de los planing hull vessel, este valor de energía residual total ΔE_{RT} por las burbujas corresponde a la sumatoria de todos los defectos para las direcciones ortotrópicas $\vec{h}, \vec{k}$ que definen la matriz rigidez del laminado.

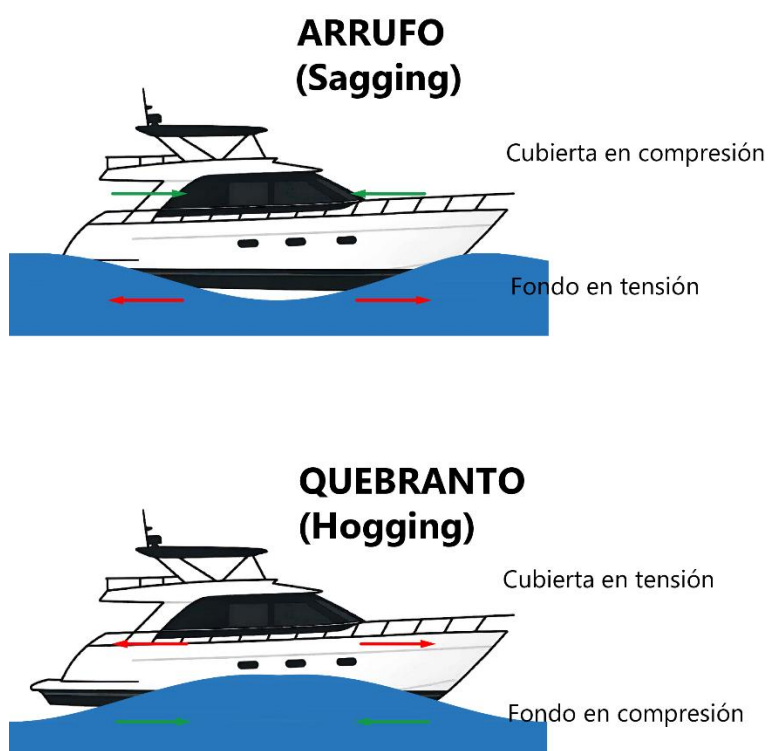
$$\Delta E_{RT} = \sum_{i=1}^n \Delta_i F_{hk} * \frac{\delta}{A_{B_i}} \quad (1.9)$$

1.4.7. Teoría de la viga-casco (resistencia longitudinal del buque)

El casco de una embarcación se encuentra sometido continuamente a esfuerzos globales en la navegación como resultado de la interacción de una serie de factores importantísimos como el peso propio, la distribución de cargas y la acción de las olas. Tales esfuerzos globales aplicados longitudinalmente son manifestados principalmente en dos condiciones: quebranto (hogging) y arrufo (sagging) ilustradas en la Figura 1.1. En la condición de quebranto, la embarcación está en reposo sobre la cresta de una ola en la sección media de la embarcación por ende la cubierta trabaja en tracción y el fondo en compresión. Por el contrario, en la condición arrufo la sección media queda ajustada al valle de la ola lo cual causa que el fondo del esté sometido a condiciones de tracción y, por consiguiente, la cubierta, en compresión (U.S. Naval Academy ,2020;Hughes et al., 2010).

Figura 1.1.

Condiciones de la embarcación

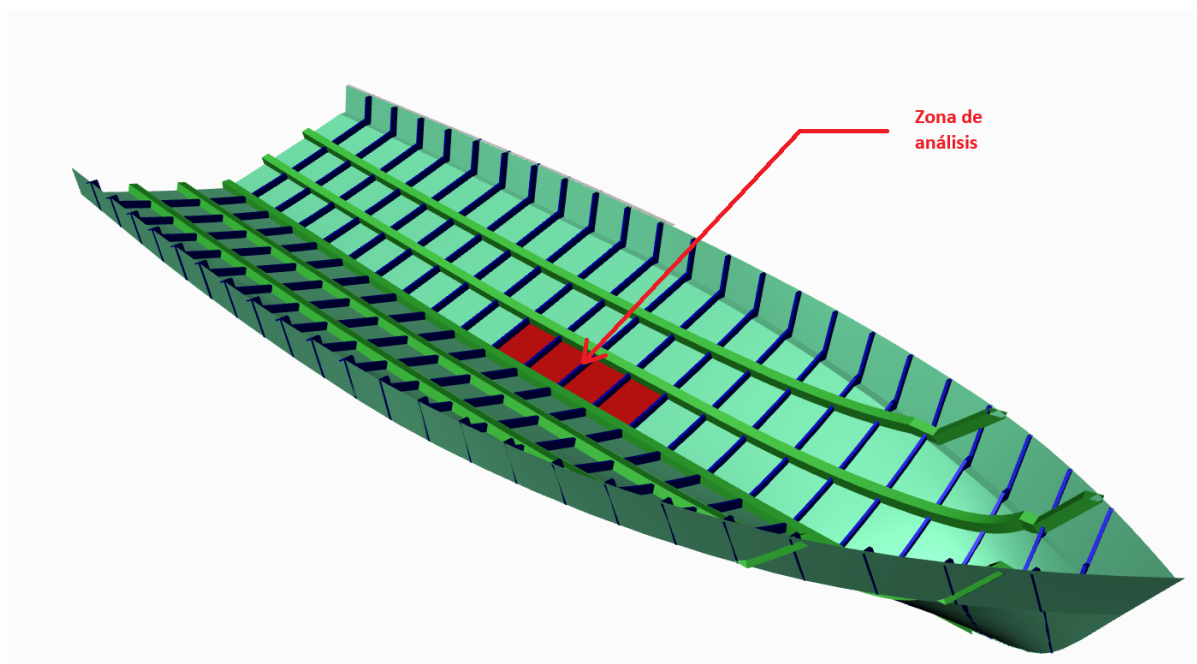


Nota. Elaboración propia

En yates fabricados en plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) es particularmente relevante por la anisotropía de este material, del que dependen la resistencia y rigidez del casco en función de la orientación de las fibras, calidad del laminado y salud de la matriz polimérica. El fondo del casco en sección media es la zona analizada en este proyecto tal como se muestra en la donde, en la condición de arrufo, trabaja principalmente tracción, principalmente en las capas con las fibras orientadas longitudinalmente. Es una condición muy crítica, ya que la falla por rotura de la fibra es, generalmente, súbita y no se está en condiciones de recuperar la capacidad estructural.

Figura 1.2

Detalles estructurales del fondo del yate y zona a emular con las probetas



Nota. Elaboración propia

Sin embargo, la integridad del casco puede verse comprometida por fallos, ya sean de fabricación o reparación, producto de burbujas de aire, porosidad y/o delaminaciones. Estos fallos son concentradores de tensiones y permiten el material soportar cargas menores, así como también contribuye a perder rigidez y energía absorbida hasta la fractura del material (Chen & Guedes Soares, 2007; Silva et al., 2006). En el escenario de arrufo, la presencia de defectos en el fondo del casco puede resultar en una fractura prematura, incluso si las demandas sean inferiores a las de diseño.

Por ello, el ensayo destructivo con probetas intactas y dañadas replica, en condiciones controladas, el comportamiento del laminado GFRP en la zona más vulnerable del casco bajo arrufo. El desarrollo de este análisis experimental no solo permite llevar a cabo la evaluación comparativa de las propiedades mecánicas del GFRP en la zona interna del casco, sino que, además, proporciona criterios para la evaluación de la calidad de reparaciones y, por ende, la evaluación de la fiabilidad estructural de embarcaciones en fibra de vidrio.

Capítulo 2

2. Metodología

Este estudio de la afectación de las burbujas de aire en la reparación de laminados de fibra de vidrio se realizó desde un enfoque experimental, ya que la inhomogeneidad de las burbujas dificulta el análisis a través de métodos simplemente analíticos. Se construyeron probetas rectangulares de acuerdo con la norma ISO 527-4 compuestas por siete capas de fibra de vidrio a las que se les aplica una reparación en la zona media de la probeta, coincidiendo, por lo tanto, con la zona de análisis fijada por la norma a la que se le otorga un espesor aproximado con la mitad de dicho espesor de la probeta. La llegada de burbujas de aire se simuló con la inclusión de una varilla de 1mm de diámetro en la zona reparada y que fue retirada después del curado. Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal SHIMADZU AGS-X en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, los cuales permiten la comparación del comportamiento mecánico de las probetas reparadas con y sin burbujas. La metodología pretende emular condiciones reales en las reparaciones de los cascos de la fibra de vidrio para determinar cómo los defectos de aire afectan la resistencia estructural la misma.

2.1. Descripción de Equipos

El equipo para utilizar en el ensayo de tensión fue el SHIMADZU AGS-X ubicado en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica en el campus de ESPOL.

2.2. Diseño de las probetas.

El área elegida para realizar el ensayo de tracción concuerda con la sección media del fondo de una embarcación, un área que es crucial desde el punto de vista de su configuración, ya que se le aplican cargas compuestas de tensión y compresión cuando está navegando tal y como se ha indicado en la subsección 1.4.4 del marco teórico. Con este tipo de elección se

consigue que la información obtenida en el estudio experimental sea representativa del comportamiento de un casco de fibra de vidrio en servicio.

Las dimensiones de las probetas se establecieron de acuerdo con la norma ISO 527-4 (Tipo II) (British Standards Institution, 2023), cuyas variables se detallan en el apéndice. El diseño se hizo utilizando el software Rhino 3D cumpliendo con la geometría de la probeta. Aunque la norma recomienda un ancho mínimo de 25 mm, se incrementó este valor en 5 mm adicionales (total: 30 mm) para asegurar un agarre óptimo en las mordazas de la máquina de ensayos y evitar deslizamientos o concentraciones de esfuerzo en los extremos.

En la Tabla 2.1 se resumen las características geométricas y materiales de las probetas, las cuales se dividen en dos grupos:

Tabla 2.1.

Características principales de las probetas

Test de tracción de las probetas			
Parámetro	Probeta 1	Probeta 2	Unit
Longitud Total	250	250	mm
Longitud Útil	150	150	mm
Anchura	30	30	mm
Espesor	4.1	4.1	mm
Material	Fibra de vidrio con resina 33000	Fibra de vidrio con resina 33000	-
Reparación	Convencional	Convencional con burbuja de aire	-

Nota. Elaboración propia

La reparación se llevó a cabo usando el mismo tipo de tela de fibra de vidrio, el mismo número de capas a extraer y la misma resina correspondiente al laminado original, de manera que las propiedades del material base se mantuvieron constantes y de esta manera se podía aislar solamente la variable objeto de estudio: la presencia de burbujas.

2.3. Laminado de las probetas

Cuando se construyen estructuras de fibra de vidrio, la utilización de varias capas de distintos tipos de refuerzos y apilamiento de las mismas en ángulos determinados permite alcanzar el espesor y las propiedades mecánicas que permitan resistir los esfuerzos de servicio. Para este trabajo se han fabricado probetas mediante un laminado de 7 capas, que consta de 4 capas de MAT – tejido de fibras que no están alineadas, ofrecen resistencia en distintas direcciones – y 3 capas de WOVEN ROVING, un tipo de laminado con fibras entrecruzadas que proporcionan mayor resistencia en una determinada dirección (Gao & Li, 2016). La disposición de las capas del laminado pretende, de esta manera, reproducir las propiedades mecánicas de los cascos de los barcos.

Se elaboraron un total de 10 especímenes para el estudio experimental. Cinco de estas probetas fueron preparadas siguiendo el procedimiento convencional de reparación utilizado en talleres navales: se pulió su zona central y se reparó aplicando resina y nuevas capas de fibra. Los otros cinco especímenes restantes fueron alterados artificialmente para imitar defectos de fábrica: se introdujo transversalmente una varilla de 1 mm de diámetro en el proceso de laminación, la cual fue retirada después del curado que simula una burbuja de aire atrapada entre las fibras y la resina.

La Tabla 2.2 del estudio detalla la configuración exacta del laminado, incluyendo el número de capas, su disposición y los materiales empleados. La comparación entre ambos conjuntos de probetas permitirá conocer el efecto que ocasionan las burbujas de aire en la resistencia mecánica de las reparaciones, así como datos útiles para poder mejorar los procesos de mantenimiento de las embarcaciones de fibra de vidrio.

Tabla 2.2

Configuración de probetas a ensayar

Tipo de espécimen	Numero de capas	Configuración	Orientación de tejido
P1	7	MAT 450	Unidireccional – 0°

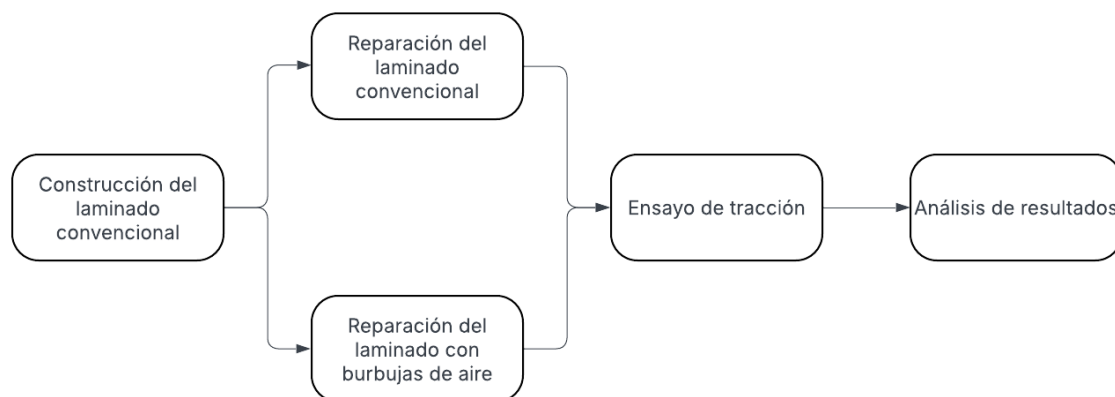
P2	7	ROVING 60	Unidireccional – 0°
		MAT 450	
		ROVING 60	
		MAT 450	
		ROVING 60	
		MAT 450	
		MAT 450	
		ROVING 60	
		MAT 450	
		ROVING 60	
		BURBUJA 1mm	
		MAT 450	
		ROVING 60	
		MAT 450	

Nota. Elaboración propia

El proceso a seguir en el estudio de las probetas es el presentado en la Figura 2.1. Este flujo de procesos sigue lo estipulado en las normativas ISO 527-4 y ASTM D3039.

Figura 2.1

Flujograma del estudio de las probetas.



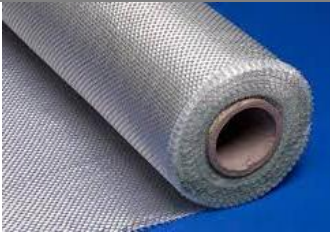
Nota. Elaboración propia

2.3.1. Construcción del laminado convencional

El primer paso es la fabricación de un laminado convencional de 7 capas distribuidas como se explicó anteriormente. Los materiales a utilizar son los presentados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3

Materiales para la fabricación de las probetas

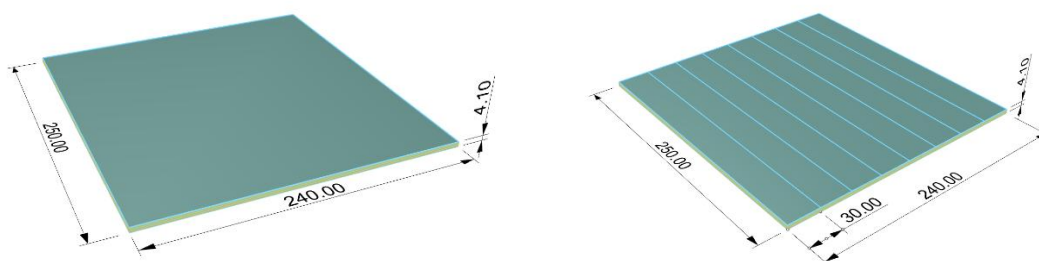
MAT 450	ROVING 600	RESINA POLIESTER 33000
		

Nota. Fuente: <https://shop.hp-textiles.com/shop/en/450g-m-ECR-glass-mat-HP-MP450C.html>

Además de los materiales que conforman la matriz, se utilizaron herramientas manuales como brocha, recipiente de mezcla y una base de vidrio para la colocación de la placa a fabricar. El diseño de la plancha, así como su configuración se muestran en la Figura 2.2 y Figura 2.3. Una vez fabricada la plancha y pasado el tiempo de curado se cortan las probetas a las medidas especificadas en la ISO 527-4 para probetas tipo II.

Figura 2.2

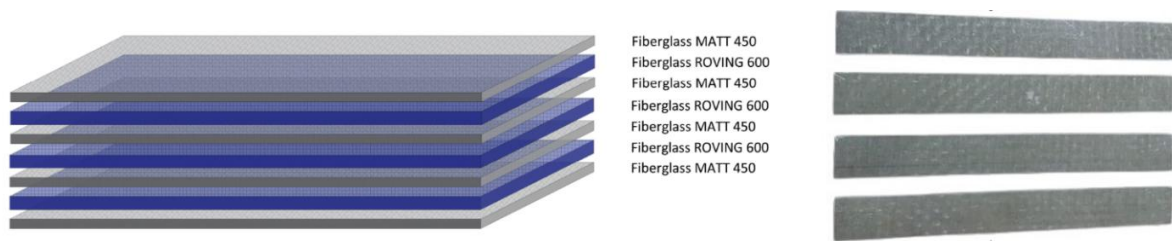
Diseño de plancha y probetas



Nota. Elaboración propia

Figura 2.3

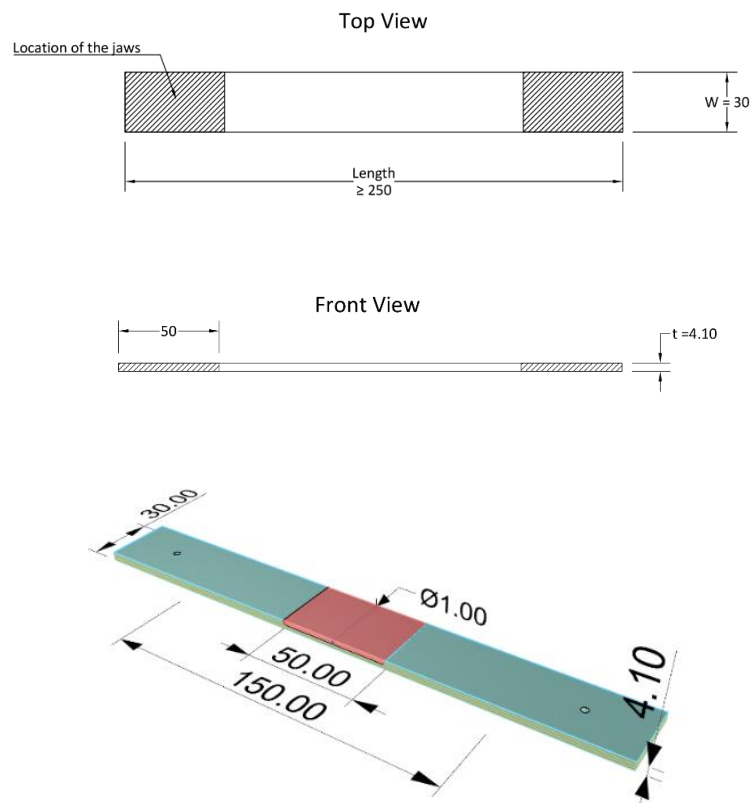
Configuración de plancha



Nota. Elaboración propia

Figura 2.4

Dimensiones de probetas para ensayo de tracción



Nota. Elaboración propia

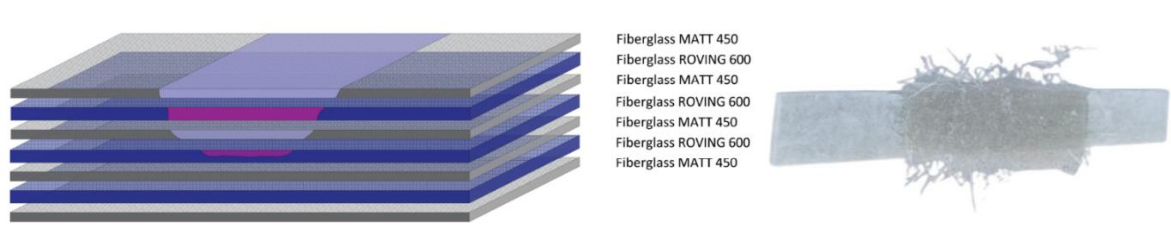
2.3.2. Reparación de laminado convencional

Con las probetas ya cortadas, se realiza la reparación en la zona central de un largo de 50 mm x 30mm. Para simular una reparación del barco, se pulió hasta la mitad del espesor

y se completó con la configuración expuesta anteriormente, completando hasta llegar al espesor inicial.

Figura 2.5

Configuración de las probetas con reparación convencional.



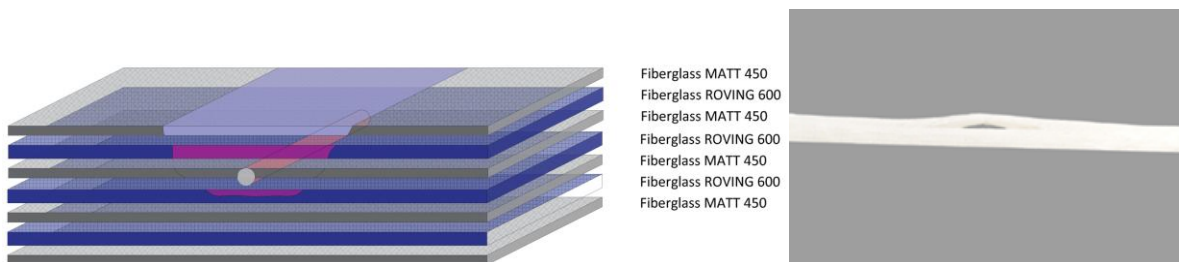
Nota. Elaboración propia

2.3.3. Reparación de laminado convencional con burbuja de aire.

Para simular una burbuja de aire se colocó un alambre circular de 1.5 mm de diámetro en la zona de la reparación y se procedió a completar con las capas correspondientes. Una vez finalizado el proceso de secado se retiró este alambre dejando el defecto en la probeta. El resultado de estas probetas se pueden visualizar en las siguientes imágenes:

Figura 2.6

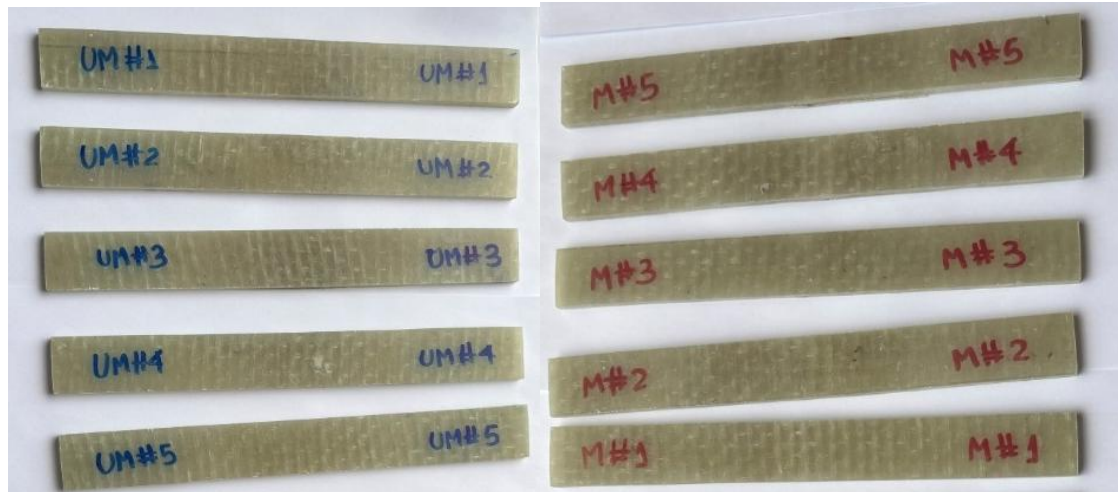
Configuración de las probetas con reparación y el defecto.



Nota. Elaboración propia

Figura 2.7

Resultado de las probetas fabricadas sin defecto (UM) y con defecto (M)

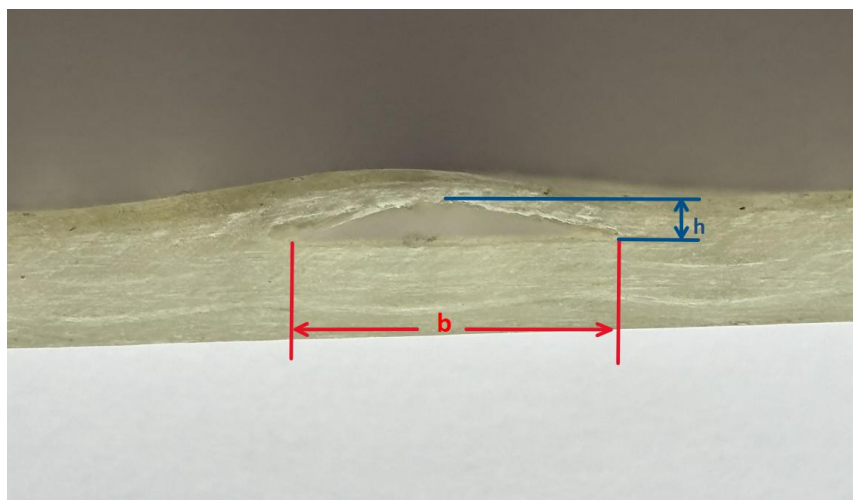


Nota. Elaboración propia

La inclusión de un alambre de 1.5 mm dejó defectos que tienen forma de parábola debido a la continuidad de la fibra. Las dimensiones finales del defecto se toman en base a los parámetros presentados en la Figura 2.8. El largo del defecto es el ancho de la probeta, que para todas vendrían a ser 30 mm, y en la Tabla 2.4.

Figura 2.8

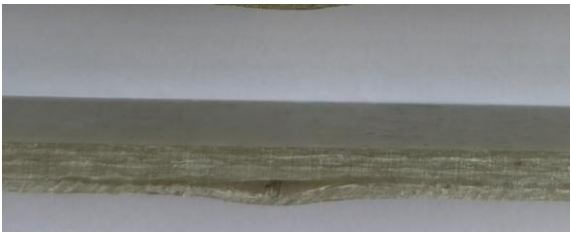
Parámetros del defecto



Nota. Elaboración propia

Tabla 2.4

Dimensiones del defecto inducido

	Derecho		Izquierdo		
	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	
M 1	1,65	13,01	1,70	18,85	
M 2	1,61	13,52	1,50	12,20	
M 3	1,71	14,00	1,40	12,60	
M 4	1,81	13,75	2,40	20,70	
M 5	1,75	14,91	1,50	14,00	

Nota. Elaboración propia

Como se puede observar, el ancho del defecto alcanza valores entre 13 a 15 mm mientras que su altura está entre 1.5 y 1.85 mm, lo cual nos da valores similares para su comparación al momento de someterlos al ensayo.

2.4. Descripción del ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción se siguió una secuencia de ir alternando las probetas con reparación convencional y después la reparada con burbuja a fin de que se evite cualquier eventualidad durante el ensayo que impida el análisis de uno u otro tipo de probetas. Este ensayo fue realizado en la máquina SHIMADZU mostrada en la siguiente figura:

Figura 2.9

Máquina de ensayo de tracción SHIMADZU.



Nota. Elaboración propia

2.4.1. Diseño del ensayo

La prueba de tracción consistió en aplicar una carga uniaxial para romper el material. La probeta estandarizada se sujetó firmemente en un extremo mediante las mordazas hidráulicas de la máquina de ensayo para evitar que se deslizara, y el cabezal móvil de la máquina aplicó la tensión al material compuesto aplicando la carga crítica que provocó la delaminación.

Para una correcta ejecución del ensayo, se definieron de antemano dos parámetros críticos: la velocidad de ensayo, que permitía un registro preciso de los datos, y la longitud medida de la probeta, que era de 150 mm. Las velocidades utilizadas fueron de 2 mm por minuto, lo que dio como resultado una duración de la prueba de entre 5 y 7 minutos por prueba.

Durante la prueba, se determinaron las siguientes propiedades mecánicas: tensión máxima y mínima, tensión de rotura, módulo de elasticidad y deformación.

El principal resultado obtenido fue la curva de fuerza y tensión en función del desplazamiento, que define el comportamiento del material bajo tensión. La visualización y el análisis de los datos generados durante las pruebas se realizaron utilizando el software Trapezium X, que viene como software predeterminado en todos los bastidores de ensayo universales de la marca Shimadzu. Cuenta con una interfaz intuitiva y funciones completas que mejoran la eficiencia y la precisión de las pruebas, así como módulos adicionales para personalizar la adquisición y el análisis de datos (Shimadzu Scientific Instruments, n.d.)

El procedimiento para configurar y llevar a cabo el ensayo consta de siete pasos que son los siguientes:

1. Selección del tipo de ensayo y del sistema de unidades a aplicar en la ejecución de la prueba.
2. Configuración de los sensores de medición, enrolando por tanto en este caso de los sensores de la fuerza y de los desplazamientos.
3. Definición de las zonas de interés que se establecen dentro del ensayo, como son la zona elástica, la zona plástica y la zona de la ruptura, que despliegan el propio ensayo y las características del material para poder proceder al análisis posteriormente.

4. Ingreso de las características geométricas del específico: tipo de material, forma y dimensiones.
5. Selección de las propiedades físicas y de resultados deseados, esfuerzo máximo, deformación o módulo de elasticidad, que se emplean en la ejecución de los ensayos.
6. Configuración de los ejes del gráfico, como la frecuencia de los ejes en el gráfico de acuerdo con las características que se deberán analizar.
7. Personalizar el informe, que permite definir y generar un informe final que va de acuerdo con los intereses permitidos por el estudio.

2.5. Resultados Esperados

Durante los ensayos de tracción realizados sobre cada una de las probetas, el comportamiento del material sigue una secuencia característica. Inicialmente, la respuesta del material es lineal, correspondiente a la zona elástica, hasta alcanzar un punto, que marca el inicio del despegue o separación del material.

A partir de ese punto, se inicia una fase de micro deformación progresiva, donde las capas del material comienzan a separarse lentamente, hasta llegar a la ruptura completa del espécimen. Este comportamiento define la naturaleza del deslaminado en materiales compuesto.

El resultado principal del ensayo es la curva de fuerza vs desplazamiento. A partir de esta curva, se obtiene los esfuerzos máximos ya que estos permitirán deducir cuanto cambia lo que puede soportar los diferentes tipos de probetas.

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

En este capítulo se describen los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, realizados sobre probetas de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) reparadas y estipulados en la especificación de norma ISO 527-4. Se realizaron ensayos a dos poblaciones de probetas, una referencia sin defectos intencionados y una segunda con burbujas de aire a propósito en el área reparada, intentando simular defectos habituales en operaciones de mantenimiento naval.

El análisis se refería tanto a parámetros mecánicos convencionales como a parámetros energéticos. En los primeros encontramos el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad, la deformación a rotura y el esfuerzo de rotura y en el plano energético los parámetros resolutivos de tenacidad, energía de fractura y energía residual. Estos últimos, calculados a partir del área bajo la curva esfuerzo–deformación, nos permiten extraer la capacidad del material por absorber y disipar energía antes y después de iniciarse el fallo, ofreciendo una visión más completa del comportamiento estructural del laminado reparado.

La presentación de resultados se inicia con la exhibición de los datos en crudo obtenidos para cada probeta, así como también se incluyen los estadísticos descriptivos. A continuación, se incluyen las curvas esfuerzo–deformaciones representativas para cada grupo de ensayo, marcando además las zonas claves como el comportamiento elástico inicial, el inicio del deslaminado y la rotura final. En una fase posterior se efectúa la comparación cuantitativa y estadística de todos los parámetros medidos entre las probetas con y sin burbujas, determinando tendencias y magnitudes en la diferencia. Finalmente se interpreta la relevancia de dichas diferencias en función de los objetivos planteados en la investigación y de los valores de referencia indicados en la bibliografía.

Éste es un enfoque exhaustivo ya que no sólo permite la cuantificación de la reducción de la capacidad mecánica provocada en bondad por la inclusión de burbujas, sino también

comprender el efecto que éstas ejercen sobre la disipación de energía y sobre la resistencia residual del laminado.

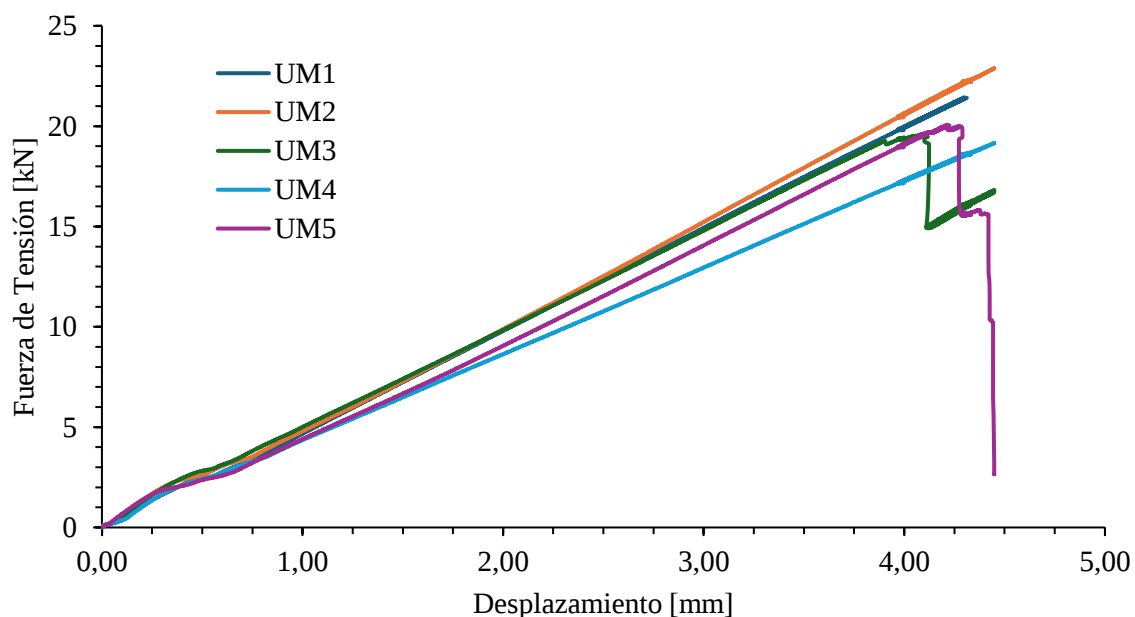
3.1. Resultados ensayo de Tracción

Como se indicó previamente, los resultados derivados del ensayo de tracción realizado en el laboratorio de geotecnia proporcionaban valores específicos del desplazamiento de la muestra en relación con la fuerza aplicada a las mordazas del aparato, sometiendo al espécimen a un control de velocidad de 2 mm por minuto. La Figura 3.1 muestra la fuerza de tensión aplicada a las muestras con reparación convencional, mientras que en la Figura 3.2 se representa el resultado de la fuerza de atención aplicada a las muestras que exhiben la burbuja inducida.

El primer parámetro que se puede obtener de las gráficas es la fuerza de tensión última de las probetas antes de la ruptura total y su máximo desplazamiento. Estos valores son presentados en la Tabla 3.1.

Figura 3.1

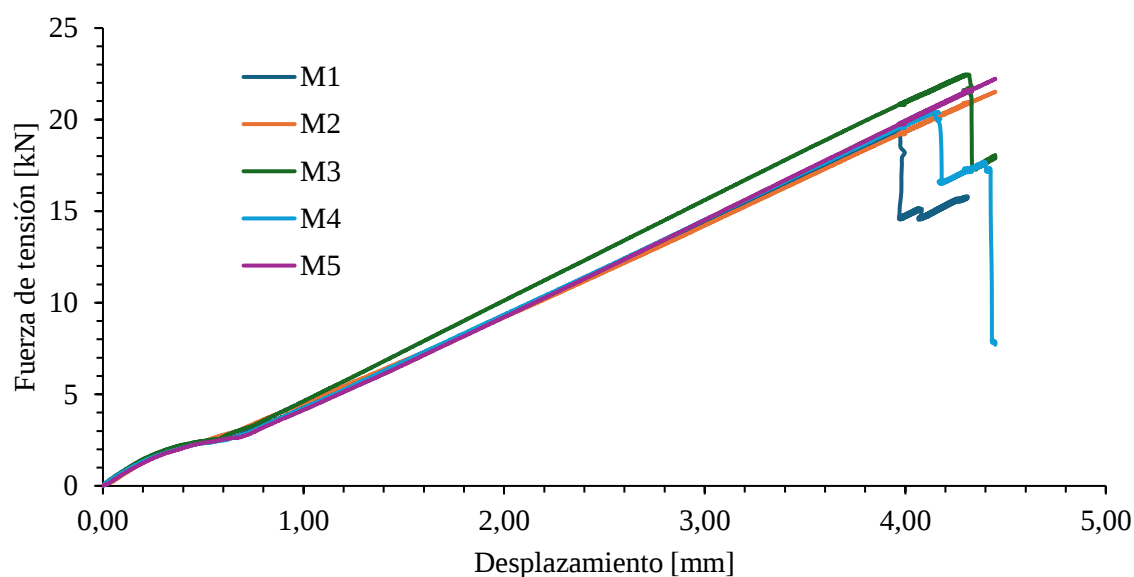
Fuerza de tensión aplicada vs la deformación de las probetas sin defecto (UM).



Nota. Elaboración propia

Figura 3.2

Fuerza de tensión aplicada vs la deformación de las probetas con defecto (M).



Nota. Elaboración propia

Tabla 3.1

Fuerza de Tensión Máxima de probetas

Probeta	Sin modificar		Modificada	
	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
1	20,05	4,218	23,06	4,651
2	19,59	4,090	22,45	4,306
3	21,85	5,204	20,42	4,155
4	23,75	4,627	22,39	4,643
5	21,43	4,307	19,38	3,965

Nota. Elaboración propia

3.2. Resultados de propiedades mecánicas calculadas

El siguiente gráfico corresponde a la relación esfuerzo–deformación obtenida para ambos tipos de probeta, considerando la ecuación básica del esfuerzo - σ , definida como la razón entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal.

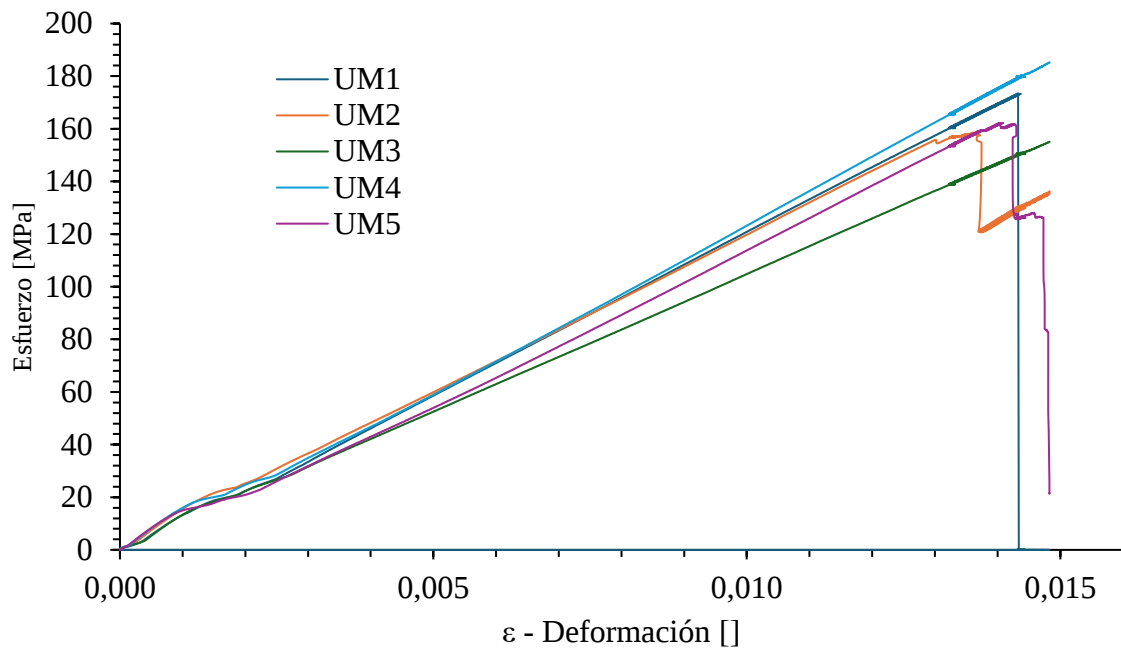
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

En el caso particular de las probetas con defecto, la presencia de la burbuja generó una protuberancia en la zona central de análisis, lo que modificó localmente su espesor. Para obtener un valor representativo del área seccional en esta región irregular, se llevaron a cabo cinco mediciones de la altura en puntos distribuidos a lo largo de la zona afectada. Subsecuentemente, se determinó el promedio de estas mediciones, y con este valor se estableció el área seccional utilizada para el cálculo de esfuerzo en estas categorías de muestras.

El ancho de las probetas, tanto sin defecto como con defecto, fue constante en todos los casos, con un valor de 30 mm. En cuanto a la altura, las probetas sin modificar presentaron un espesor uniforme de 4.12 mm, mientras que, en las probetas con defecto, la altura promedio —calculada a partir de cinco mediciones en la zona central afectada— fue de 4,55 mm. Estas mediciones se llevaron a cabo en los 50 mm de la zona central de los especímenes, que corresponden al área válida de análisis prescrita por la normativa. En consecuencia, el área de la sección transversal en las muestras sin defectos se estimó en 19,38 mm², mientras que, en las muestras con defectos, el área promedio se estimó en 20,43 mm², teniendo en cuenta el promedio de las cinco muestras evaluadas. Las Figura 3.3 y Figura 3.4 muestran los resultados del esfuerzo calculado para ambos tipos de probeta.

Figura 3.3

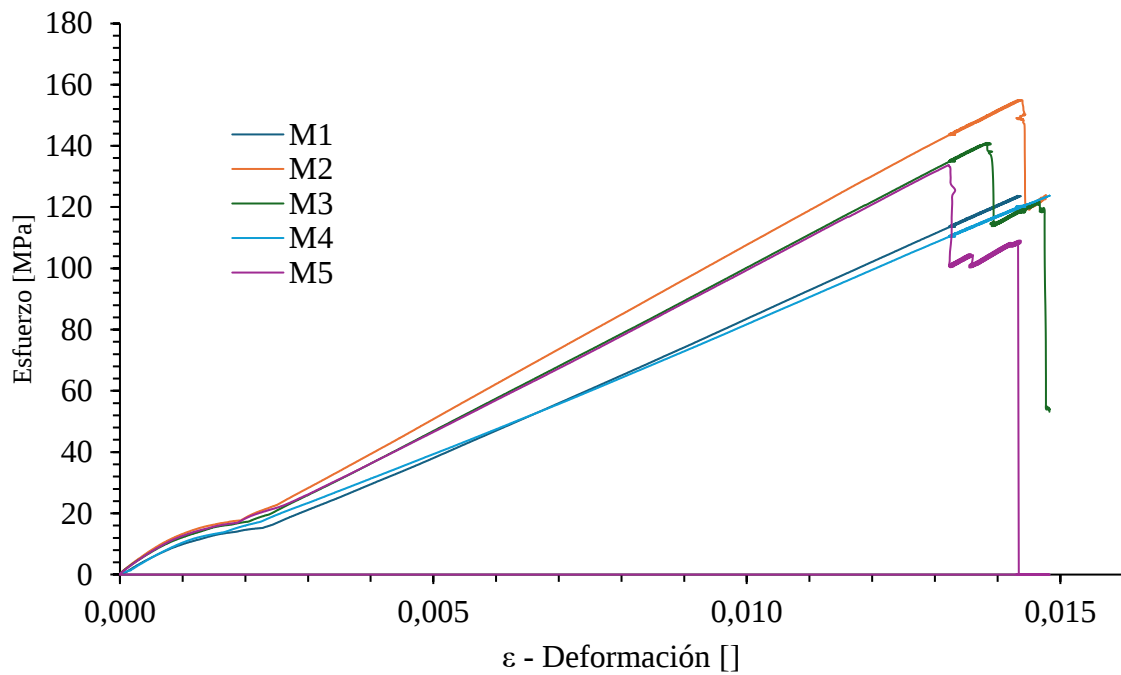
Esfuerzo vs la deformación de las probetas sin defecto (UM).



Nota. Elaboración propia

Figura 3.4

Esfuerzo vs la deformación de las probetas con defecto (M).



Nota. Elaboración propia

La Tabla 3.2 muestra el esfuerzo último de rotura de las probetas:

Tabla 3.2

Esfuerzos últimos de las probetas ensayadas.

	Sin modificar	Modificada
Probeta	[MPa]	[MPa]
1	162,18	132,62
2	158,47	154,93
3	176,75	140,96
4	192,17	128,79
5	173,39	133,78

Nota. Elaboración propia

Tabla 3.3

Parámetros estadísticos del esfuerzo último.

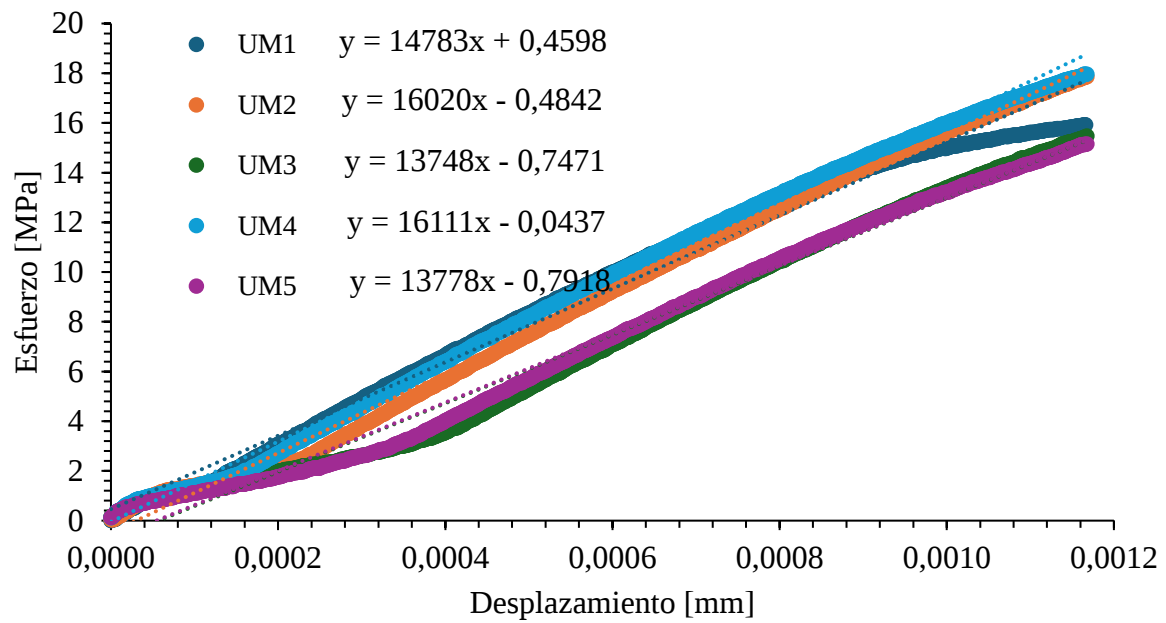
Mínimo	158,47	132,62
Máximo	192,17	154,93
Promedio	172,59	138,21
Desv. Stand.	11,90	9,23753343
Coef. Variac.	0,07	0,06
Error	5,32	4,13

Nota. Elaboración propia

El próximo parámetro determinado fue el módulo de elasticidad, calculado de la pendiente de la curva esfuerzo–deformación en su zona lineal inicial, anterior al inicio del deslaminado causante de la carga aplicada. Esta región, la cual puede identificarse con las figuras correspondientes y se caracteriza por una relación elástica proporcional entre esfuerzo y deformación, seguido de una zona de transición donde se arranca la pérdida de la integridad interlaminar.

Figura 3.5

Zona inicial elástica de probetas sin defecto.

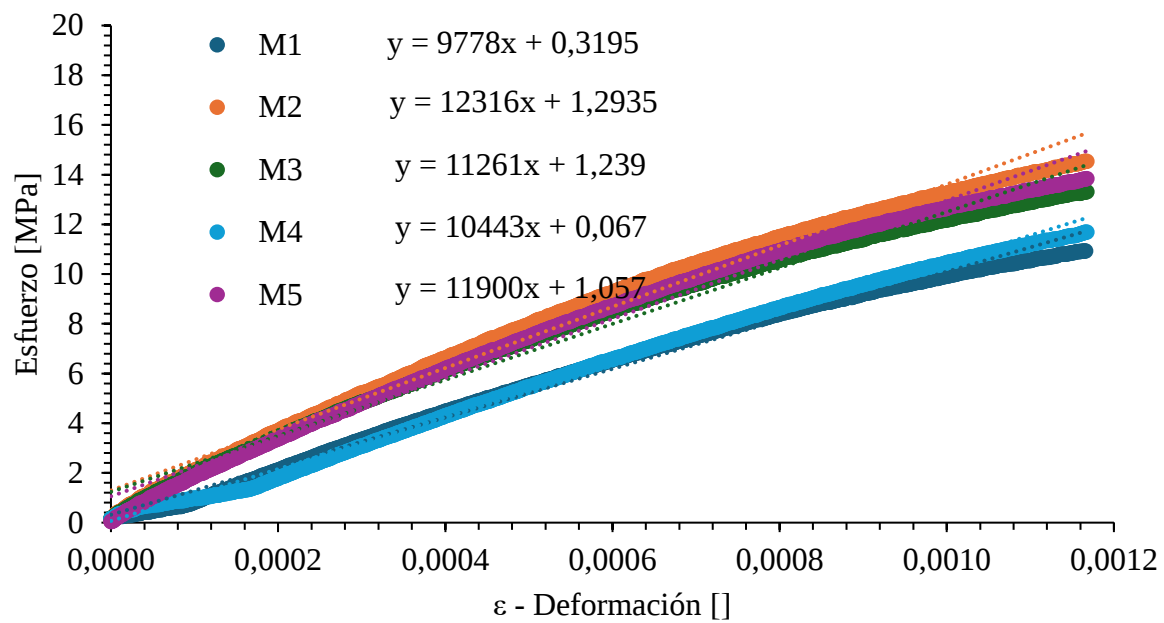


Nota. Elaboración propia

Los valores del módulo de elasticidad, junto con sus parámetros estadísticos se presentan en la Tabla 3.4 correspondiente, permitiendo realizar la comparación entre los tipos de probeta evaluados.

Figura 3.6

Zona inicial elástica de probetas con defecto.



Nota. Elaboración propia

Tabla 3.4

Módulo de elasticidad probetas con y sin la burbuja de aire.

	Sin modificar	Modificada
Probeta	[GPa]	[GPa]
1	14,783	9,778
2	16,020	12,316
3	13,748	11,261
4	16,111	10,443
5	13,778	11,400

Nota. Elaboración propia

Tabla 3.5

Parámetros estadísticos del módulo de elasticidad.

Mínimo	13,748	9,778
Máximo	16,111	12,316
Promedio	14,89	11,04
Desv. Stand.	1,03	0,87

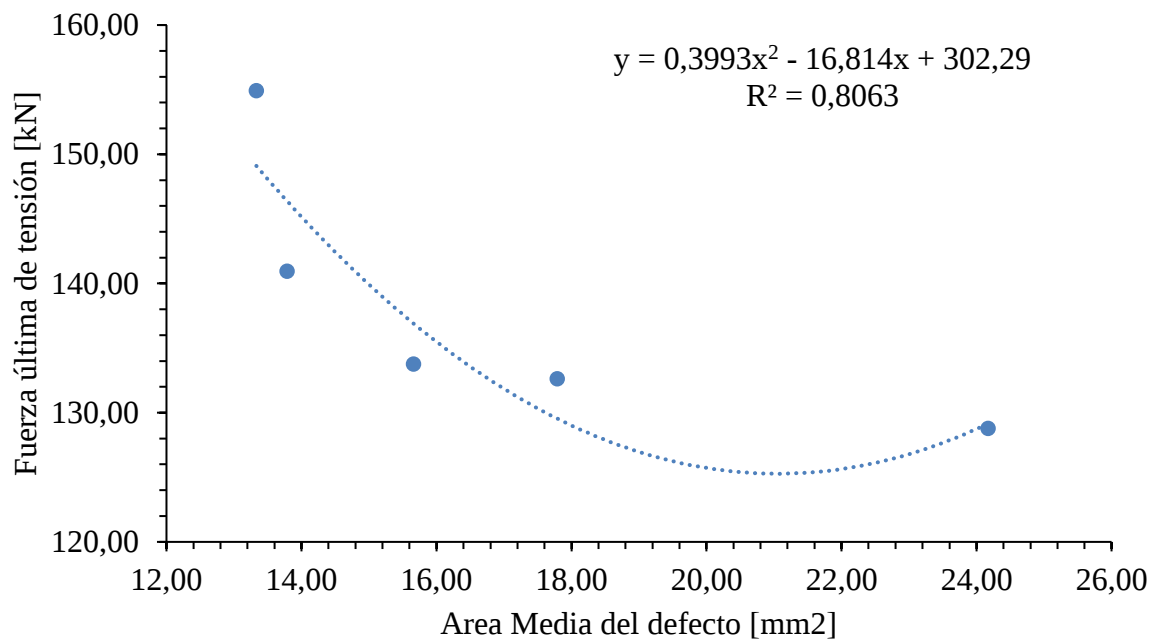
Coef. Variac.	0,07	0,08
Error	0,46	0,39

Nota. Elaboración propia

Previo a la exhibición de los resultados correspondientes a los parámetros energéticos mencionados, un aspecto crucial dentro de estas primeras propiedades es la variación de las propiedades en función del tamaño del defecto. Para determinar el área del defecto, se tomaron tanto la base como la altura del defecto en los lados derecho e izquierdo, resultando en un promedio de ambos y resultando en el área de la forma parabólica del defecto. Esto condujo a los resultados ilustrados en la Figura 3.7, Figura 3.8, y Figura 3.9.

Figura 3.7

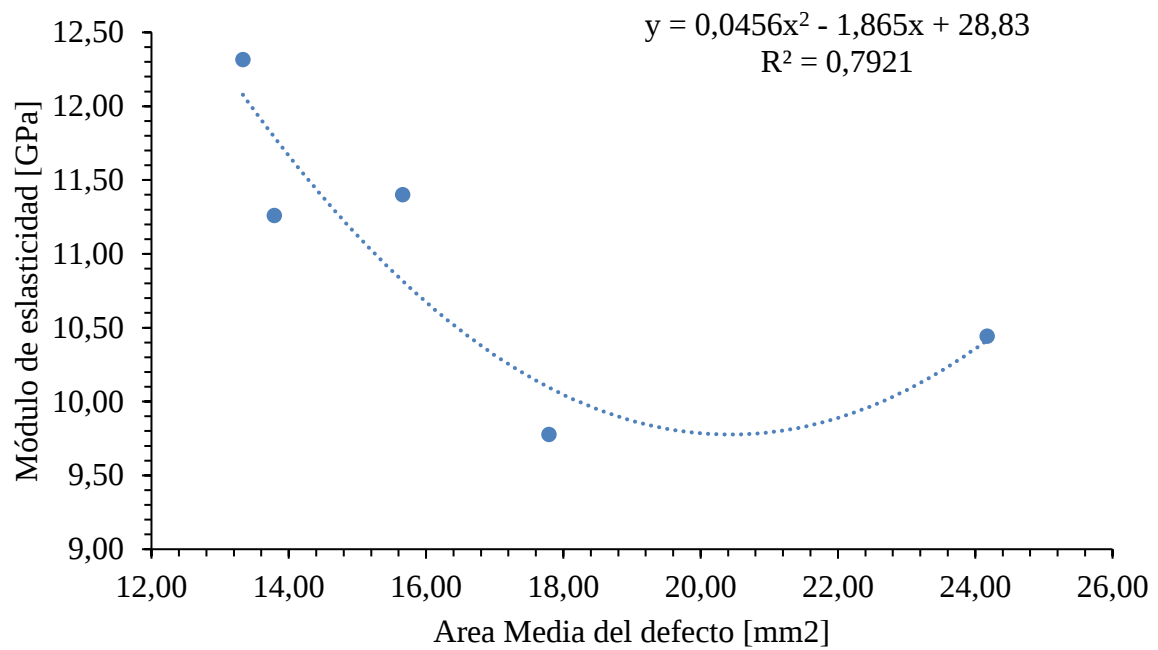
Fuerza última de tensión en función del área promedio del defecto.



Nota. Elaboración propia

Figura 3.8

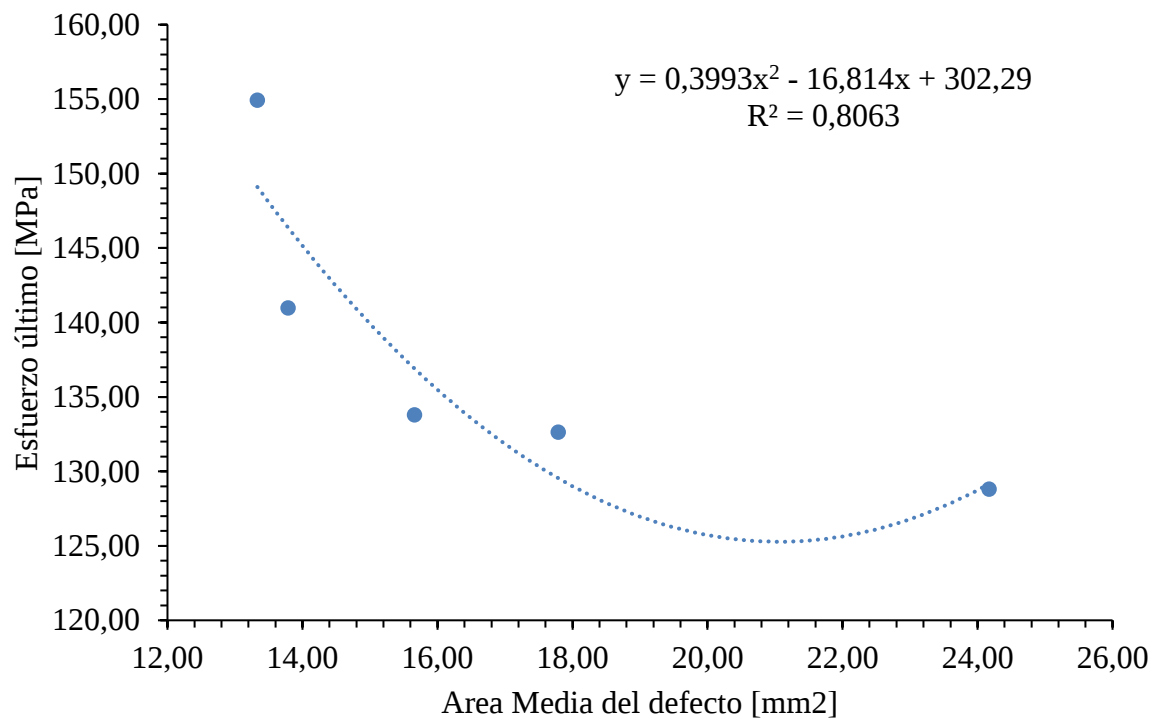
Módulo de elasticidad en función del área promedio del defecto.



Nota. Elaboración propia

Figura 3.9

Esfuerzo último en función del área promedio del defecto.



Nota. Elaboración propia

Figura 3.10

Tabla de resultados de propiedades mecánicas en función del área promedio del defecto.

	A	Fuerza de tensión última	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último
	[mm²]	[kN]	[GPa]	[MPa]
M1	17,79	132,62	9,78	132,62
M2	13,33	154,93	12,32	154,93
M3	13,79	140,96	11,26	140,96
M4	24,17	128,79	10,44	128,79
M5	15,66	133,78	11,40	133,78

Nota. Elaboración propia

El primer parámetro energético a exhibir es la tenacidad, definida como el área bajo la curva de los gráficos de esfuerzo contra deformación. Posteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados para las muestras sin defectos con valores presentados en la tabla:

Tabla 3.6

Tenacidad en probetas sin el defecto.

Tenacidad	
Probeta	[J/m³]
UM1	1,12
UM2	1,12
UM3	1,58
UM4	1,46
UM5	1,23

Nota. Elaboración propia

Tabla 3.7

Tenacidad en probetas con el defecto de la burbuja de aire.

Tenacidad	
Probeta	[J/m³]
M1	1,00
M2	1,10

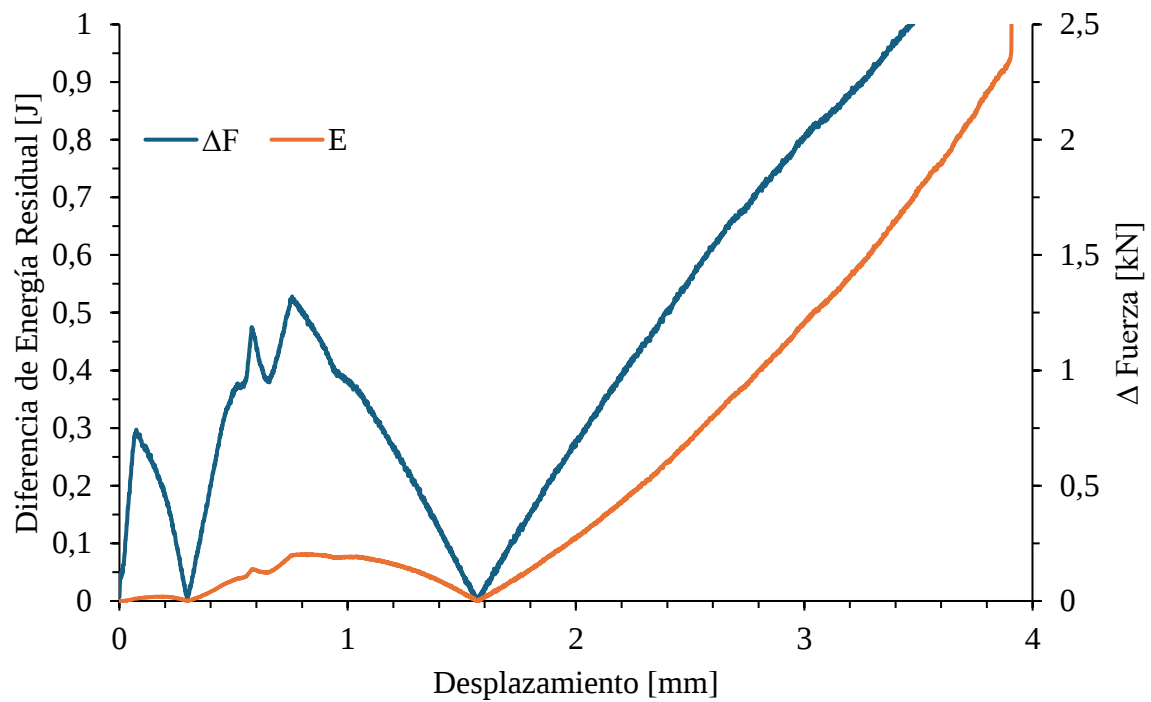
M3	1,06
M4	0,98
M5	0,86

Nota. Elaboración propia

Los parámetros energéticos dieron como resultado las siguientes graficas de energía residual y diferencial de Fuerza de tensión entre las probetas correspondientes.

Figura 3.11

Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM1 y M1.



Nota. Elaboración propia

Figura 3.12

Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM2 y M2.

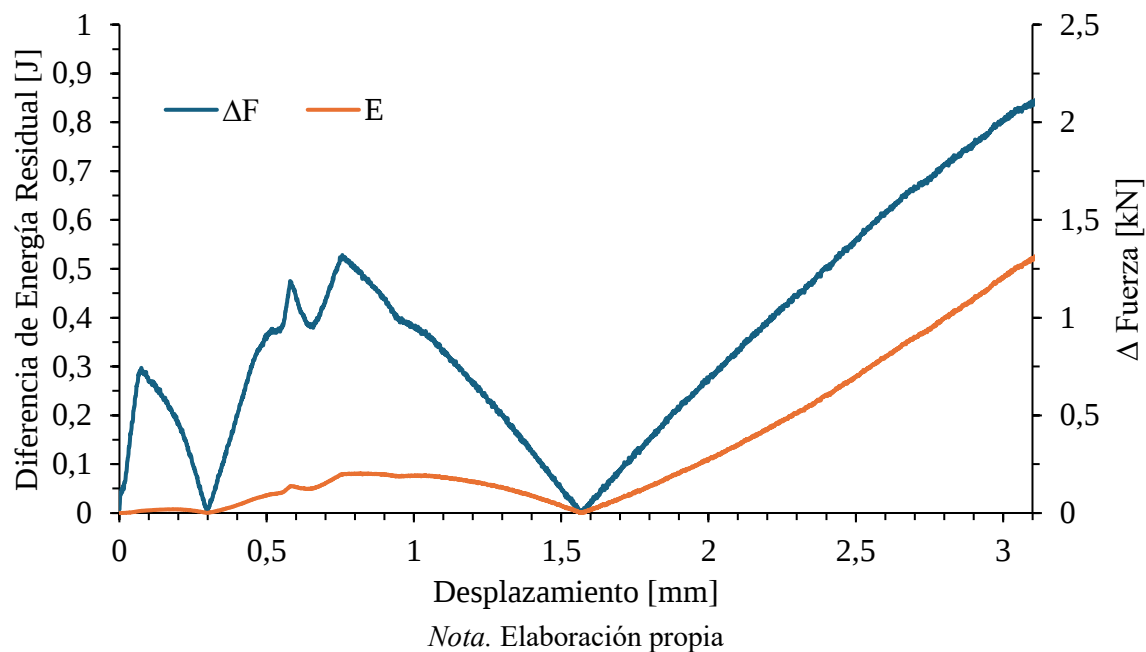


Figura 3.13

Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM3 y M3.

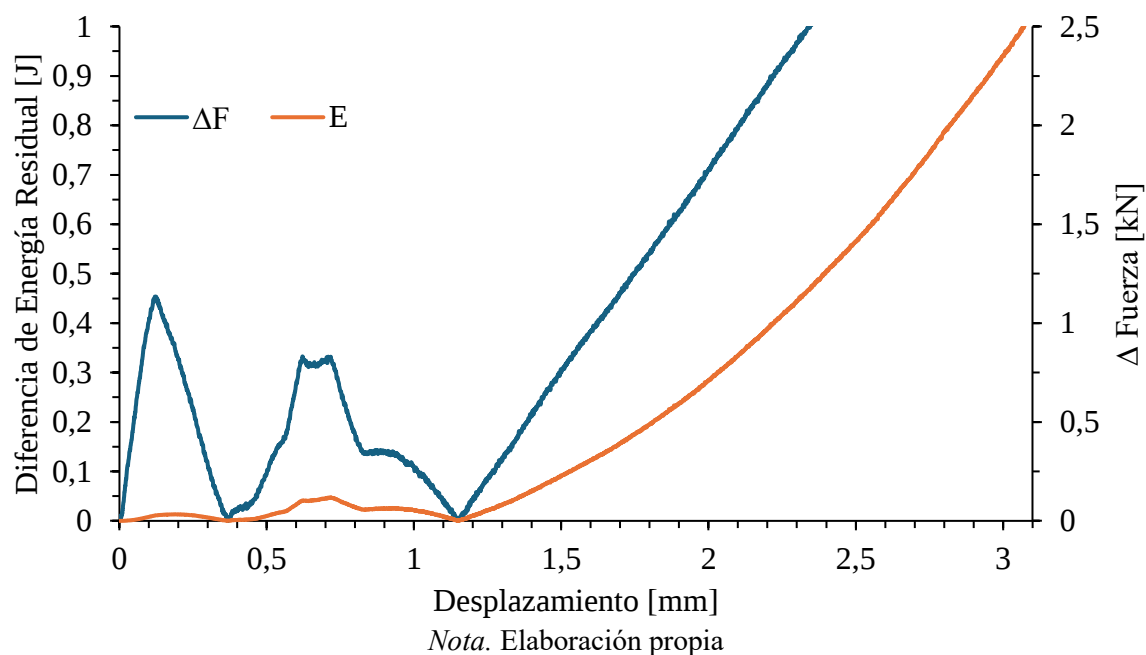


Figura 3.14

Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM4 y M4.

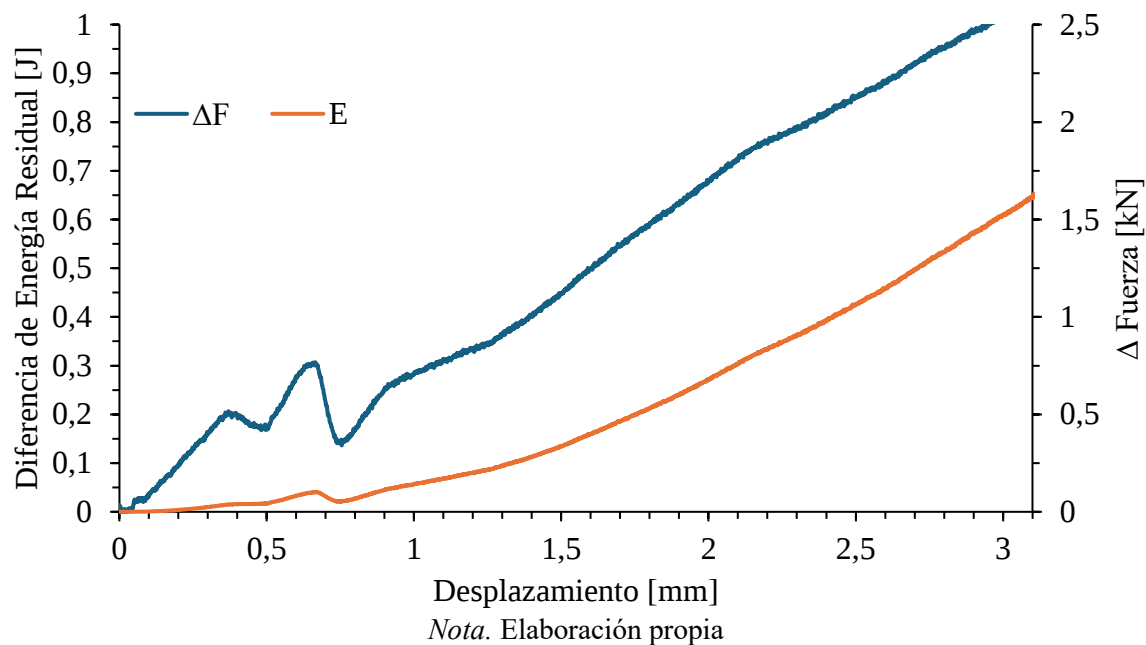
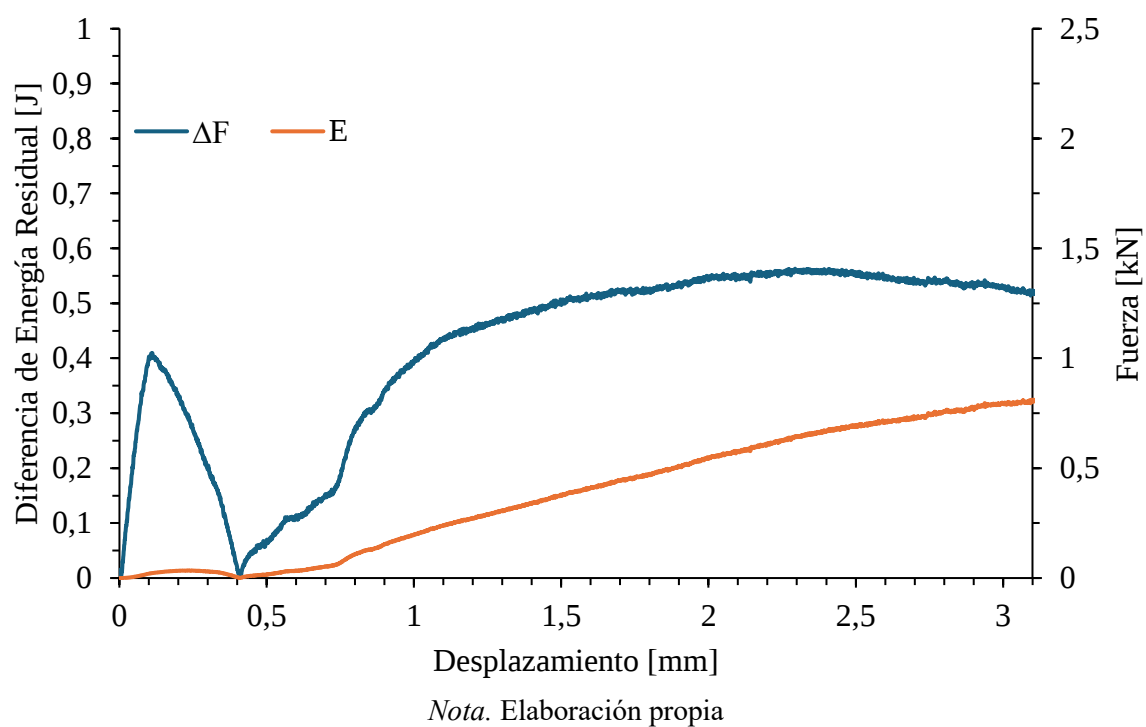


Figura 3.15

Variación de Energía Residual y Diferencial de Fuerza de Tensión según el Desplazamiento de las probetas UM5 y M5.



3.3. Análisis de Resultados

Los ensayos de tracción generaron inicialmente las curvas fuerza–desplazamiento para ambos grupos de probetas. En la Figura 3.1 se presentan las probetas reparadas sin defecto, mientras que la Figura 3.2 muestra las probetas con burbuja inducida. A partir de estos registros se extrajeron la fuerza última y el desplazamiento al fallo, cuyos valores individuales se recopilan en la Tabla 3.1. Estas curvas fueron transformadas a esfuerzo–deformación empleando la ecuación 1.4 y el área efectiva medida en la zona válida de análisis (50 mm centrales), lo que permitió comparar de forma directa el desempeño mecánico entre ambos grupos.

En términos de resistencia última $\sigma_{\max}$, las probetas con burbuja evidencian, en general, valores inferiores a los del grupo sin defecto. Esta tendencia se observa en las curvas representativas de la Figura 3.3 (sin defecto) y de la Figura 3.4 (con defecto) y queda cuantificada en la Tabla 3.2 (valores por probeta) y en la Nota. Elaboración propia

Tabla 3.3(estadísticos del grupo). La disminución de $\sigma_{\max}$ en presencia de discontinuidades es consistente con el papel de las burbujas como concentradores de tensiones y con la reducción de sección portante interlaminar, que favorecen la iniciación temprana del daño y precipitan la rotura.

El módulo de elasticidad - E se determinó con la ecuación 1.5 como la pendiente de la parte inicial lineal de la curva $\sigma - \epsilon$ antes del límite asociado al principio del delaminado, como se pone de manifiesto en la Figura 3.5, donde se destaca esa parte de la curva representativa sin defecto; de manera análoga, la Figura 3.6 realiza lo mismo para una probeta con burbuja. Se muestran los valores individuales de E en la Tabla 3.4 y sus parámetros derivativos (media, SD, CV, IC95) en la Tabla 3.5. De forma global, el grupo con defecto muestra una zona elástica más corta y ligeras no linealidades tempranas, reflejando microfisuración de la matriz o pérdidas de continuidad interlaminar; en consecuencia, el

valor medio de E resulta menor que en el grupo sin defecto, lo que confirma una pérdida de rigidez atribuible al vacío.

La deformación a rotura ϵ_{rot} es igualmente sensible a la presencia de defectos. En las curvas de la Figura 3.4 se aprecia que las probetas con burbuja transitan antes desde el régimen elástico a la fase de propagación de daño y presentan una caída abrupta de capacidad portante tras el pico, lo que evidencia una menor tolerancia al daño. Los valores de ϵ_{rot} por probeta se incluyen junto con σ_{max} en la Tabla 3.2, y su resumen estadístico en la Nota.

Elaboración propia

Tabla 3.3 muestra una reducción del valor medio y un incremento de la dispersión en el grupo con defecto.

Los parámetros energéticos confirman y amplifican esta conclusión. La tenacidad —calculada como área bajo la curva $\sigma - \epsilon$ hasta la rotura— y la energía residual se presentan por probeta en las Tabla 3.6 (sin defecto) y Nota. Elaboración propia

Tabla 3.7(con defecto). La evolución comparativa de la energía acumulada y residual puede observarse en las Figura 3.11 a la Figura 3.15. En todas ellas, el grupo con burbuja muestra una capacidad inferior de absorción y disipación de energía, lo que anticipa peor desempeño en fatiga e impacto aun cuando, en algunos casos puntuales, las diferencias en σ_{max} fueran moderadas.

Dado que el tamaño del defecto condiciona la severidad del daño, se cuantificó el área de la burbuja y su relación con las propiedades mecánicas. La metodología de medición se ilustra en la Figura 3.7, mientras que las correlaciones área del defecto vs. σ_{max} y área del defecto vs. E se muestran en la Figura 3.8 y la Figura 3.9, respectivamente. El resumen por probeta con defecto (p. ej., M1–M5) se recoge en la Figura 3.10. En conjunto, se observa una correlación negativa entre el área del vacío y el desempeño mecánico: a mayor área, menor

$\sigma_{\max}$ y menor E, atribuido a la reducción de la sección portante y al incremento de las tensiones locales que aceleran la delaminación.

En cuanto a la variabilidad del ensayo, las Nota. Elaboración propia

Tabla 3.3 y Tabla 3.5 evidencian que el coeficiente de variación (CV) es sistemáticamente mayor en el grupo con burbuja, especialmente en métricas energéticas. Dicha diferencia de la dispersión viene dada por la heterogeneidad local (voids, variaciones de impregnación y compactación) de los materiales compuestos, y además resalta que, sin lugar a dudas, los defectos no sólo disminuyen el nivel medio de las propiedades mecánicas, sino que, además, también degradan la homogeneidad de la reparación.

En síntesis, el análisis integrado de Figura 3.1–Figura 3.6 y Tabla 3.1–Tabla 3.5 (resistencia y rigidez), junto con Figura 3.7–Figura 3.10 (tamaño del defecto) y Figura 3.11–Figura 3.15 y Tabla 3.6 –Nota. Elaboración propia

Tabla 3.7 (tenacidad y energía residual), confirma que la presencia de burbujas afecta negativamente la integridad estructural del laminado reparado: disminuye la resistencia última y el módulo de elasticidad, reduce la capacidad de deformación y merma la energía absorbida hasta la rotura y la energía residual. Estos resultados presentan criterios técnicos a partir de los cuales poder aceptar/rechazar reparaciones (en función de las dimensiones del defecto y su situación respecto a la cara traccionada, que puede estar en la misma cara que la cara traccionada o no) y dan también soporte a la introducción de controles de proceso (impregnación, compactación, desairado y curado) e inspecciones no destructivas con el objetivo de reducir la cantidad de vacíos presentes y, con ello, incrementar la fiabilidad en servicio.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

Este estudio abordó el efecto de las burbujas de gas en reparaciones de laminados GFRP del yate El Mangle mediante un enfoque experimental: se diseñaron y fabricaron probetas representativas (con y sin defecto), se ensayaron a tracción conforme a ISO 527-4 y se analizaron parámetros mecánicos (esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación a rotura) y energéticos (tenacidad, energía de fractura y energía residual) a partir de la conversión de curvas fuerza–desplazamiento a esfuerzo–deformación. El objetivo fue determinar en qué medida la presencia de vacíos interlaminares compromete la capacidad portante y la integridad estructural de la reparación.

4.1. Conclusiones

Los resultados que se obtuvieron son consistentes con el hecho de que también la presencia de burbujas de aire afectó negativamente el rendimiento propio del laminado reparado, así como su resistencia, en donde las muestras con defectos mostraron una reducción del esfuerzo máximo en comparación con el grupo de las que no tenían defectos, lo cual se ha relacionado con el hecho de que las discontinuidades crean tensiones y favorecen el deslaminado prematuro. En el caso de la rigidez, el módulo de elasticidad, basado en la región de la curva de esfuerzo-deformación en la cual la relación entre esfuerzo e inclinación es lineal, también fue inferior en el grupo con burbujas de aire, lo cual pone de manifiesto el descenso de la continuidad efectiva entre capas y el inicio de una microfisuración en la matriz. En cuanto a la ductilidad, la deformación a la rotura también se vio limitada, siendo la transición de sus regímenes elasticidad - daño de menor tamaño, más temprana y mucho más propensa a encontrar el umbral a partir del cual la extensión de las fisuras se inicia y propaga. El estudio energético fue consistente con las observaciones realizadas: la tenacidad y la energía residual se vieron notablemente disminuidas en el caso de las muestras que

presentaban vacíos, lo cual nos hace intuir un menor margen de seguridad al aplicar demandas cíclicas, impactos o condiciones ambientales severas.

Aunque el patrón global es claro, el comportamiento de los compuestos presenta dispersión inherente. En algunos especímenes pudieron observarse valores puntuales cercanos (o incluso ligeramente superiores) a los del control en ciertos parámetros; tales casos se explican por variaciones geométricas locales, diferencias de compactación/volumen de fibra o grado de curado. Sin embargo, al normalizar el cálculo de esfuerzo con el área efectiva medida en la zona válida de análisis y al comparar con criterios estadísticos (medias, dispersión e intervalos de confianza), prevalece la conclusión central: las burbujas interlaminares degradan resistencia, rigidez y capacidad de absorción de energía de la reparación, y aumentan la variabilidad, reduciendo la confiabilidad del resultado del proceso.

4.2. Recomendaciones

Desde el punto de vista operativo, se recomienda prevenir la formación de vacíos mediante mejoras del proceso: control de impregnación y desairado, uso de vacío/bolsa o compactación equivalente, y curado con control de temperatura/tiempo para asegurar conversión adecuada de la matriz. En la verificación posreparación, conviene implementar inspecciones no destructivas acordes al tamaño y criticidad del área (inspección visual asistida, medición sistemática de espesor/ancho en la zona calibrada, y—cuando sea pertinente—métodos como ultrasonido de baja frecuencia o termografía activa para detectar discontinuidades sub-superficiales). A efectos de evaluación, se sugiere adoptar criterios de aceptación basados en la pérdida admisible de propiedades (mecánicas y energéticas) y en la geometría del defecto (área/forma y ubicación respecto a la cara traccionada), de modo que la decisión de aceptar o reprocesar una reparación no dependa únicamente de la apariencia superficial sino de su desempeño cuantificado. Como práctica de control, es aconsejable documentar el área efectiva usada en el cálculo de esfuerzo para probetas o zonas con no

uniformidad, y reportar estadísticos de variación (p. ej., coeficiente de variación) que reflejen la consistencia del proceso.

4.3. Alcance, limitaciones y líneas futuras

El trabajo se centró en tracción cuasiestática y en una morfología de defecto representativa de reparaciones habituales, por lo que sus conclusiones se aplican con mayor certeza a escenarios de carga monotónica y a defectos interlaminares de características semejantes. Quedan fuera del alcance la evaluación directa de fatiga, impacto y ambientes higrótérmicos propios del servicio real, así como el efecto de combinaciones de carga (flexión/compresión) y de orientaciones de fibra distintas a las ensayadas. En consecuencia, se propone como línea futura ampliar el programa experimental hacia ensayos cíclicos e impacto instrumentado, incorporar técnicas de correlación de imágenes (DIC) para mapear campos de deformación y validar modos de daño, y estudiar la relación cuantitativa entre geometría del defecto (área/espesor/ubicación) y pérdida de propiedades bajo distintos regímenes de carga. Estas extensiones permitirán traducir los criterios de aceptación propuestos en umbrales operativos robustos para la toma de decisiones en astilleros y talleres, fortaleciendo la confiabilidad en servicio de reparaciones en GFRP como las del yate El Mangle.

5. Referencias

- Atodaria, D. R., Putatunda, S. K., & Mallick, P. K. (1997). A Fatigue Crack Growth Model for Random Fiber Composites. *Journal of Composite Materials*, 31(18), 1838–1855. <https://doi.org/10.1177/002199839703101804>
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939–948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)
- British Standards Institution. (2023). *BS EN ISO 527-4:2023 Plastics. Determination of tensile properties. Part 4, Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*. British Standards Institution.
- Calin-Dumitru, C. (2018). Numerical analysis for the influence of the geometrical and mechanical parameters on the stiffness and strength of the composite bolted joints. *INCAS BULLETIN*, 10(4), 21–33. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2018.10.4.3>
- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>
- Chen, N.-Z., & Guedes Soares, C. (2007). Longitudinal strength analysis of ship hulls of composite materials under sagging moments. *Composite Structures*, 77(1), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.002>
- Diniță, A., Ripeanu, R. G., Ilincă, C. N., Cursaru, D., Matei, D., Naim, R. I., Tănase, M., & Portoacă, A. I. (2023). Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis. *Polymers*, 16(1), 2. <https://doi.org/10.3390/polym16010002>
- Dvorak, G. J. (2000). Composite materials: Inelastic behavior, damage, fatigue and fracture. *International Journal of Solids and Structures*, 37(1–2), 155–170. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00085-2)

- Gaffney, K. M., & Botsis, J. (1999). Deformation and fracture of a uniaxially reinforced composite material. *Composites Science and Technology*, 59(12), 1847–1859.
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00044-5)
- Gao, G., & Li, Y. (2016). Mechanical properties of woven glass fiber-reinforced polymer composites. *Emerging Materials Research*, 5(2), 201–208.
<https://doi.org/10.1680/jemmr.16.00018>
- Hughes, O. F., Paik, J. K., Béghin, D., (2010). *Ship structural analysis and design* (2.^a ed.). Society of Naval Architects and Marine Engineers. Jersey City, NJ. ISBN-10 0939773821
- Jordan, Himarosa, R. A., Fisabilillah, D. T., Hasan, W. H., Salim, U. A., Mahardika, M., & Muflikhun, M. A. (2022). *Flaw analysis on the manufacturing process of GFRP laminates using wet lay-up method*. *AIP Conference Proceedings*, 2499(1), 060003.
<https://doi.org/10.1063/5.0131618>
- Kirugulige, M. S., & Tippur, H. V. (2009). Measurement of Fracture Parameters for a Mixed-Mode Crack Driven by Stress Waves using Image Correlation Technique and High-Speed Digital Photography. *Strain*, 45(2), 108–122. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00449.x>
- Lee, D., Tippur, H., Kirugulige, M., & Bogert, P. (2009). Experimental Study of Dynamic Crack Growth in Unidirectional Graphite/Epoxy Composites using Digital Image Correlation Method and High-speed Photography. *Journal of Composite Materials*, 43(19), 2081–2108. <https://doi.org/10.1177/0021998309342139>
- Liu, Q., & Hughes, M. (2008). The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1644–1652. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.008>

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites*. CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9781420005981>

Mehdikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I., & Lomov, S. V. (2019). Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 53(12), 1579–1669.

<https://doi.org/10.1177/0021998318772152>

Pascoe, D. (2023, May 5). *Failed Blister Repairs - A Case History & Solutions: Boat Hull Blisters*. [Artículo en línea]. Yacht Survey Online

<https://www.yachtsurvey.com/BlisterRepairFail.htm>

Pérez Alonso, C., & Martínez García, X. (2016). *Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval*. [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España].

Santulli, C. (2007). Impact properties of glass/plant fibre hybrid laminates. *Journal of Materials Science*, 42(11), 3699–3707. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0662-y>

Silva, R. V., Spinelli, D., Bose Filho, W. W., Claro Neto, S., Chierice, G. O., & Tarpani, J. R. (2006). Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites.

Composites Science and Technology, 66(10), 1328–1335.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.10.012>

Suhot, M. A., & Chambers, A. R. (2014). The Effects of Voids on the Flexural Properties and Failure Mechanisms of Carbon/Epoxy Composites. *Jurnal Teknologi*, 71(2), 151–157.

<https://doi.org/10.11113/jt.v71.3736>

Tippur, H. V., Krishnaswamy, S., & Rosakis, A. J. (1991). Optical mapping of crack tip deformations using the methods of transmission and reflection coherent gradient sensing: a study of crack tip K-dominance. *International Journal of Fracture*, 52(2), 91–117. <https://doi.org/10.1007/BF00032372>

Shimadzu Scientific Instruments. (n.d.). Trapezium X materials testing software – Universal testing. Recuperado el 10 de agosto de 2025, de

<https://www.ssi.shimadzu.com/products/materials-testing/uni-ttm-software/trapezium-x/index.html>

Tugrul Seyhan, A., Tanoglu, M., & Schulte, K. (2008). Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(18), 5151–5162.

<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.08.003>

U.S. Naval Academy (USNA). (2020, July). *Principles of Ship Performance Course Notes (EN400)*.

https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/EN400_Course_Notes,_Summer_2020.pdf

Wales, J. (2016). *Manual para uso de fibra de Vidrio*. [Manuscrito no publicado].

Academia.edu.

https://www.academia.edu/19981672/Manual_para_uso_de_fibra_de_Vidrio

6. Apéndice

Fotografías de las probetas ensayadas.

