

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

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

Análisis de flexión en tuberías híbridas con fibras de vidrio para sentinas en

barcos pesqueros

INGE-2654

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Alex André Nevárez Zambrano

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedico a mi querida madre que, aunque ya no nos acompañe, siempre estará presente en mí; a mi padre, por guiarme constantemente en la dirección correcta hacia mis objetivos; y a mi familia, en especial a Nicole, por nunca dejar de creer en mí.

**Alex N.**

## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, PhD. Patrick Townsend junto a todos los profesores de la facultad y la ESPOL en general, por la educación y el conocimiento plasmado en clases que me nutrieron como profesional.

También quiero agradecer a mis amigos y compañeros por estar presentes y brindar apoyo en tantas circunstancias.

Lords y Gente Sin Luz <3

**Alex N.**

## Declaración Expresa

---

Yo Alex André Nevárez Zambrano 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 durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor 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, 11 de octubre del 2024.

---

Autor

## **Evaluadores**

---

**María Tadea Quintuña Rodríguez**

Profesor de Materia

---

**Patrick Roger Townsend Valencia**

Tutor de proyecto

## **Resumen**

El proyecto demuestra las propiedades del nuevo material híbrido fibra-metal, como el material solución a la corrosión localizada en el interior de las tuberías de sentina en los barcos pesqueros. La fibra de vidrio actúa directamente en esta problemática evitando la corrosión interna mientras que el acero como capa metálica protege a la fibra de vidrio de golpes que podrían fracturar el plástico absorbiendo agua y de esa forma evita la pérdida de sus propiedades mecánicas.

El material híbrido consistió en una capa interna de un tubo de acero negro de 1.2 mm de espesor reforzada por una capa de MAT450, la capa externa consistió en un tubo de 1.8 mm reforzado internamente con Roving800, ambas capas fueron unidas con el uso de poliéster como adhesivo.

Las probetas de material híbrido fueron comparadas con tuberías de acero de 3 mm de espesor mediante ensayos de flexión de 3 puntos. Además, se comparó en el efecto de una corrosión simulada mediante desgaste mecánico del tubo metálico interno.

Los resultados revelaron que la corrosión no afecta de ninguna manera al material híbrido, y sus propiedades mecánicas no llegan al mismo nivel que el del acero, con la actual configuración propuesta.

**Palabras Clave:** corrosión, desgaste, propiedades mecánicas, materiales compuestos.

## **Abstract**

*The project demonstrates the properties of the new fiber-metal hybrid material, as the material solution to localized corrosion inside the bilge pipes in fishing boats. The fiberglass acts directly on this problem, preventing internal corrosion, while the steel as a metallic layer protects the fiberglass from blows that could fracture the plastic, absorbing water and thus prevents the loss of its mechanical properties.*

*The hybrid material consisted of an inner layer of a 1.2 mm thick black steel tube reinforced by a layer of MAT450, the outer layer consisted of a 1.8 mm tube internally reinforced with Roving800, both layers were joined with the use of polyester as adhesive.*

*The hybrid material specimens were compared with 3 mm thick steel pipes using 3-point bending tests. In addition, the effect of simulated corrosion by mechanical wear of the internal metal tube was compared.*

*The results revealed that corrosion does not affect the hybrid material in any way, and its mechanical properties do not reach the same level as that of steel, with the current proposed configuration.*

**Keywords:** *corrosion, wear, mechanical properties, composite materials.*

## Índice general

Resumen .....	VI
<i>Abstract</i> .....	VII
Índice general .....	VIII
Abreviaturas.....	XI
Simbología .....	XII
Índice de figuras .....	XIII
Índice de tablas .....	XIV
Apéndice .....	XV
Capítulo 1 .....	1
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del Problema .....	3
1.3    Justificación del Problema.....	4
1.4    Objetivos.....	4
1.4.1    Objetivo general.....	4
1.4.2    Objetivos específicos.....	4
1.5    Marco teórico .....	4
1.5.1    Corrosión .....	4
1.5.2    Materiales compuestos .....	5
1.5.3    Materiales híbridos .....	7
1.5.4    Teoría de vigas .....	10
1.5.5    Deformación por colapso.....	11
Capítulo 2.....	12
2.1    Metodología.....	13

2.2	Elaboración .....	14
2.2.1	Materiales .....	14
2.2.2	Proceso de elaboración .....	16
2.2.3	Porcentaje de desgaste.....	18
2.3	Ensayo de flexión .....	19
2.3.1	Formador de curvatura.....	20
2.3.2	Descripción de equipos .....	21
2.4	Resultados .....	22
Capítulo 3.....		25
3.1	Resultados y Análisis.....	26
3.2	Resultados del ensayo de flexión .....	26
3.2.1	Distribución de fuerza vs tiempo .....	26
3.2.2	Distribución de deformación unitaria vs tiempo.....	28
3.2.3	Distribución de esfuerzo vs deformación unitaria.....	29
3.2.4	Relación de esfuerzos de fluencia y colapso .....	30
3.3	Estimación teórica.....	31
3.4	Análisis de resultados.....	33
Capítulo 4.....		35
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	36
4.2	Conclusiones .....	36
4.3	Recomendaciones.....	37
Referencias .....		38
Apéndice.....		42



## **Abreviaturas**

ASTM	American Society for Testing and Materials
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HB	Probeta de material híbrido
ISO	International Organization for Standardization
PRFV	Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio
ST	Probeta de acero

## Simbología

$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\emptyset$	Diámetro
$\sigma$	Esfuerzo
F	Fuerza
$\mu\epsilon$	Microdeformación
G	Módulo de Corte
E	Módulo de Young
%V	Porcentaje volumétrico
t	Tiempo

## Índice de figuras

Figura 1. 1 Gráfica de Tensión-Deformación de las fibras y matriz.....	6
Figura 1. 2 Gráfica de Fuerza-Desplazamiento por unidad de fuerza de fatiga .....	7
Figura 1. 3 Curva fuerza-desplazamiento para el acero, material compuesto y material laminado híbrido fibra-metal .....	8
Figura 1. 4 Aplicación de pasadores metálicos en la unión adhesiva .....	9
Figura 1. 5 Geometría de la sección de un tubo colapsado por flexión.....	11
Figura 2. 1 Diagrama de flujo de desarrollo de procesos .....	14
Figura 2. 2 Capas de materiales de las probetas de material híbrido fibra-metal.....	15
Figura 2. 3 Capa de tela MAT reforzando el tubo de menor diámetro .....	16
Figura 2. 4 Guías a modo de encofrado para el vertido de plástico.....	17
Figura 2. 5 Presentación de los tubos internos y externos en las guías .....	17
Figura 2. 6 Encofrado armado con la resina poliéster en su interior .....	18
Figura 2. 7 Probeta finalizada de material híbrido fibra-metal .....	18
Figura 2. 8 Probeta antes y después del desgaste.....	19
Figura 2. 9 Ensayo de flexión de 3 puntos.....	20
Figura 2. 10 Vistas de plano e isométrica del formador de curvatura.....	21
Figura 2. 11 Equipo UH-F500X .....	22
Figura 2. 12 Gráfico de esfuerzo vs deformación unitaria esperados.....	24
Figura 3. 1 Deformación obtenida tras ensayos de flexión.....	26
Figura 3. 2 Curva completa de fuerza vs tiempo .....	27
Figura 3. 3 Curva de fuerza vs tiempo .....	28
Figura 3. 4 Curva de deformación unitaria vs tiempo .....	29
Figura 3. 5 Curva de esfuerzo vs deformación unitaria .....	30
Figura 3. 6 Relación de esfuerzos de fluencia y colapso .....	31

## Índice de tablas

Tabla 2. 1 <i>Distribución de materiales de las probetas y su presencia de corrosión</i> .....	15
Tabla 2. 2 <i>Porcentaje de desgaste local</i> .....	19
Tabla 2. 3 <i>Tabla de resultados para cada probeta empleando la norma ISO 8491</i> .....	23
Tabla 3. 1 <i>Tabla de propiedades de los materiales empleados</i> .....	32
Tabla 3. 2 <i>Matrices <math>Q_k</math> de rigidez reducida</i> .....	32
Tabla 3. 3 <i>Matriz ABD del material híbrido</i> .....	32
Tabla 3. 4 <i>Inversa de Matriz ABD del material híbrido</i> .....	33
Tabla 3. 5 <i>Tabla de estimación teórica del material híbrido</i> .....	33

## **Apéndice**

PLANO 1 Dimensiones de formador de curvatura empleado para los ensayos de flexión de 3 puntos

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

En el ambiente marino la corrosión es una constante amenaza, debido al continuo desgaste de los materiales que limita el tiempo de vida útil del acero en una embarcación. Mediante costosas reparaciones que, debido a la naturaleza del acero y reglas de las Sociedades Clasificadoras, es necesario la renovación del material. Por ello, la correcta selección de materiales es de gran importancia en la ingeniería naval (Birchon, 1970).

El uso de materiales compuestos se presenta como solución a varios campos de ingeniería. En el campo naval, el material compuesto más empleado es el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Las principales características del PRFV son la resistencia a la corrosión, ligereza, alta resistencia por densidad y costes competitivos frente al acero. Sin embargo, su vida útil también puede verse limitada frente a los continuos golpes (slamming) ocasionados por la interacción con las olas en la proa del barco (Omaña, 2022).

Varios autores han estudiado la reacción del PRFV frente a ambientes salinos donde se observan pérdidas en sus propiedades mecánicas tras la absorción de agua salada (Bian, 2012). Kootsookos (2001), experimenta la resistencia y durabilidad de distintas resinas reforzadas con fibra de vidrio y carbono. Concluye que la fibra de carbono no reacciona con el agua salada; sin embargo, el alto coste y la baja disponibilidad del material a nivel nacional limita el uso de este a para su uso en reparaciones.

Las tuberías requieren el uso de materiales con propiedades mecánicas que logren soportar los esfuerzos de fatiga a los que se encuentra sometida la embarcación (Dittenber, 2010) y las presiones internas de operación necesarias para su funcionamiento. En las tuberías de PRFV solemos encontrar fugas con mayor frecuencia en uniones como codos y tee, al ser puntos críticos debido a su geometría (Shenoi, 1995). Sin embargo, es imposible descartar su resistencia a la corrosión y bajos costes.

Por ello este proyecto de materia integradora presenta el análisis sobre la implementación de material híbrido en las tuberías de las sentinas de pesca. El material híbrido compuesto por láminas de acero y PRFV, y diseñado inicialmente para la construcción en la ingeniería naval, combina a un punto intermedio todas las propiedades de

sus componentes (Herreros, 2008). Se presenta al material como una solución capaz de responder frente a las necesidades halladas en las tuberías mencionadas.

## **1.2 Descripción del Problema**

Según el Registro Nacional de Embarcaciones (2024) existen 650 embarcaciones pesqueras registradas en el Ecuador, entre las más destacadas se conforman 116 atuneros y 60 sardineros que operan a su máxima capacidad para contrarrestar las vedas impuestas. Este sector ha representado el 0.72% del PIB con un total de \$509M. (CFN, 2022).

Los buques pesqueros poseen en su interior tanques de almacenamiento llamadas cubas de pesca donde inicia la cadena de frío, vital para la conservación del producto (Cedeño, 2018). Por debajo de las cubas se encuentran las sentinas, estas son tuberías que permiten el flujo de la suciedad restante tras el vaciado de la cuba. Las sentinas de pesca se encuentran constantemente expuestas a restos orgánicos, bajas temperaturas y alta salinidad, que promueven un acelerado deterioro dentro de las tuberías del circuito de sentinas (Rowlands, 1965). El deterioro de las tuberías de sentina por la corrosión junto a las diferentes presiones de operación y cargas mecánicas a las que son sometidas puede llegar a la obstrucción interna completa, hasta rupturas que provocan filtraciones que podrían paralizar las maniobras de pesca.

El empleo de materiales compuestos provee enfoques diferentes como la ausencia de la corrosión y diferentes métodos de aplicación (Escudero, 2001). Las condiciones específicas contribuyen a diferentes comportamientos en la interacción de las cargas y reacción al medio en el que encuentra expuesto (Kootsookos, 2001).

Sin embargo, es importante realizar un estudio de análisis de falla en las tuberías que permita identificar los puntos débiles en los circuitos de sentinas. Este estudio permitiría analizar las cargas mecánicas y las presiones de operación a las que están sometidas las tuberías y su comportamiento con el medio. La implementación del material solución que permita reducir tanto los mantenimientos preventivos como las renovaciones de material resultan de mayor beneficio para las flotas pesqueras (Birchon, 1970).

### **1.3 Justificación del Problema**

El análisis de flexión de tuberías híbridas con fibras de vidrio para las sentinas de las cubas ayuda a resolver el problema de deterioro del material hallado en los barcos pesqueros. El material híbrido por su resistencia a la corrosión y mejores propiedades mecánicas se muestra como material solución a la problemática presentada. El análisis de flexión del nuevo material es necesario para cerciorar el funcionamiento y la garantía en su aplicación en un ambiente agresivo. Finalmente, al extender su vida útil lograría disminuir los costes de mantenimiento preventivo y de renovación de material.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar la eficacia de material híbrido en tuberías de sentina para la protección contra la corrosión, a través de ensayos destructivos.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Elaborar probetas de acero y de material híbrido mediante capas de acero y GFRP para comparar su resistencia.
- Deteriorar internamente las probetas para la simulación de desgaste por corrosión dentro de las sentinas de las cubas de pesca.
- Realizar ensayos destructivos mediante pruebas de flexión para el análisis de sus propiedades mecánicas.
- Identificar los beneficios del empleo de material híbrido en tuberías de sentinas mediante el análisis de los resultados experimentales.

### **1.5 Marco teórico**

#### **1.5.1 Corrosión**

La corrosión es un proceso natural que deteriora los materiales, reaccionando electroquímicamente con su entorno. El proceso de oxidación ioniza los átomos del metal restándole electrones lo que permite su reacción con el oxígeno. La corrosión debilita los

materiales restando resistencia mecánica y por fatiga, por lo que debe ser monitoreada y controlada (Askeland, 1998).

Existen diferentes tipos de corrosión creados a partir de mecanismos. La corrosión generalizada afecta uniformemente las superficies del material, de debe a la humedad del ambiente. La corrosión por picaduras (pitting) se caracteriza por la presencia de agujeros en la superficie del metal. La corrosión por grietas se debe a la formación de estas permitiendo el ingreso de agua. La corrosión galvánica cuando un metal más activo protege al pasivo. Y por último la corrosión por erosión producido por el paso de un fluido, tanto agua como aire.

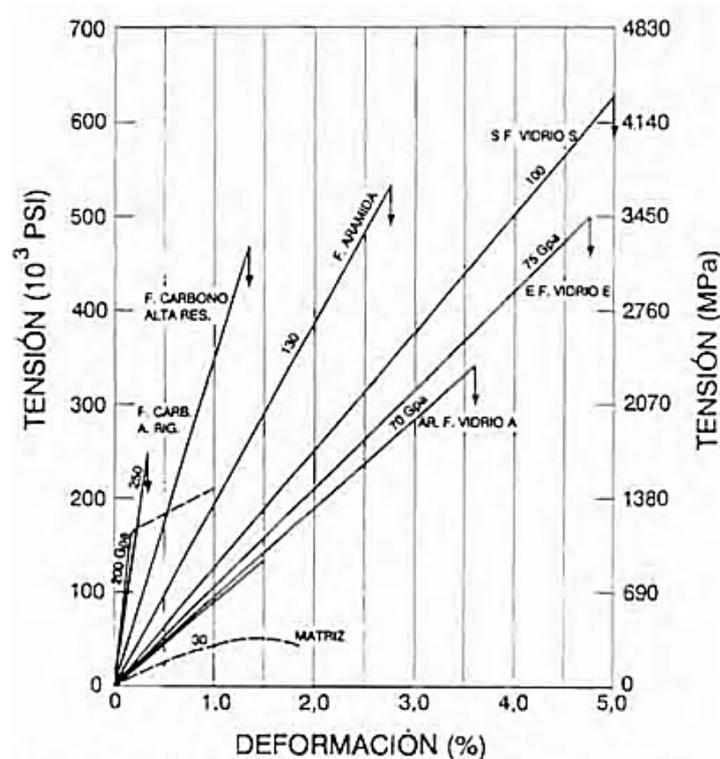
El proceso de la corrosión se ve altamente influenciado por varios factores como son la temperatura, humedad, concentración de oxígeno, pH, y la naturaleza del material. Las tuberías de sentina se exponen a humedad constante por su modo de operación, además de tener ácidos por restos orgánicos que disminuyen el pH y catalizan el proceso de oxidación.

### **1.5.2 Materiales compuestos**

Los materiales compuestos se forman por la unión de dos o más materiales con la finalidad de mejorar las propiedades originales de sus componentes (Escudero, 2001). Dentro de los materiales compuestos se puede ramificar según su unión por: partículas, laminados, contrachapados, y reforzados con fibras. Dentro de la ingeniería naval el más común es el plástico reforzado con fibras de vidrio, sin embargo; también se puede encontrar el uso de fibras de carbono para aplicaciones de mayor calidad, como en los cascos de competencia deportiva.

**Figura 1. 1**

Gráfica de Tensión-Deformación de las fibras y matriz



Nota: Ilustración tomada de *Materiales Compuestos. Aplicaciones*, (Escudero, 2001).

En la Figura 1.1. se observa las propiedades de las diferentes fibras empleados como refuerzo en comparación a la matriz plástica que envuelve a dichas fibras.

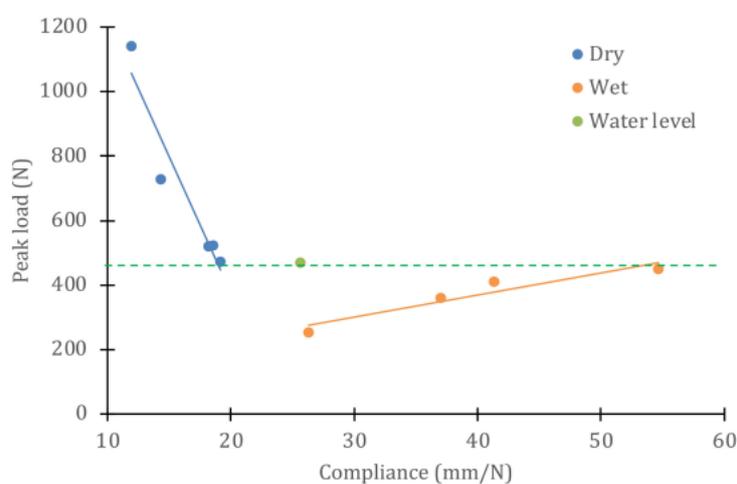
### 1.5.2.1 Plástico Reforzado con Fibras de Vidrio

***El plástico reforzado con fibras de vidrio (PRFV) es el material compuesto más competitivo por sus bajos costes, amplia disponibilidad en el mercado, facilidad de empleo, habilidad poco calificada, bajo peso, alta resistencia por densidad y resistencia a la corrosión. Estas características lo convierten un material ideal para la construcción de tanques y tuberías, además de pequeñas y medianas embarcaciones. Las embarcaciones de menor tamaño limitadas por sus dimensiones aprovechan su ligereza, mejorando su capacidad de transporte, además de bajar los costes de producción al construirse usualmente en serie.***

Sin embargo, su resistencia a la fatiga y a los impactos limita su tiempo de vida, en las fibras. Las fibras presentes en el mar se exponen a golpes constantes (slamming) (Omaña, 2022), que producen microfracturas permitiendo la absorción de agua. Los resultados muestran una pérdida del 45% en la rigidez de la fibra golpeada en agua a comparación de en aire, y un aumento en el 52% del desplazamiento. Bian (2012) compara además su comportamiento en agua salada demostrando una pérdida del 46% en el módulo de Young con sólo un 9% de absorción de agua.

**Figura 1. 2**

*Gráfica de Fuerza-Desplazamiento por unidad de fuerza de fatiga*



Nota: Ilustración tomada de Analysis of the Behavior of Fiberglass Composite Panels in Contact with Water Subjected to Repeated Impacts, (Omaña, 2022).

En la Figura 1.2. se observa el cambio en la rigidez del PRFV en contacto con agua y en aire.

### 1.5.3 Materiales híbridos

El material híbrido nace de un concepto similar al de los materiales compuestos, buscando un equilibrio en las propiedades de sus componentes. El material híbrido se distingue por el uso de láminas o capas de componentes metálicos y no metálicos. Un claro ejemplo de esto es el estudio de Torres (2021) en el que se experimenta componentes no

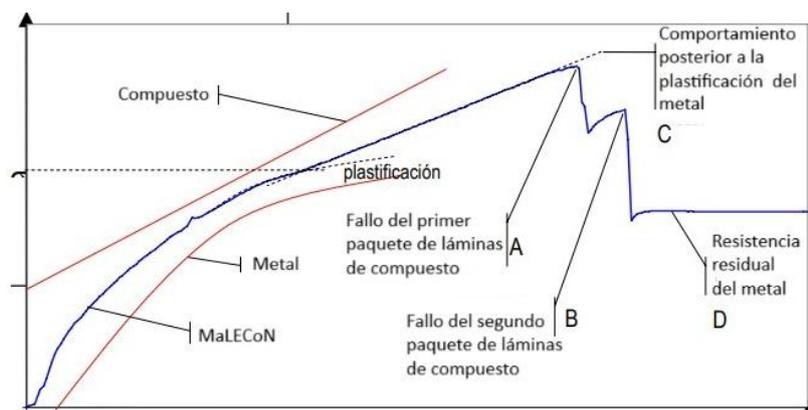
metálicos como espuma de poliuretano, poliuretano, epoxi y mortero. Resultando el mortero un material de mejor resistencia, duración y sin pandeo.

### 1.5.3.1 MaLECoN

Es un material híbrido que combina láminas alternadas de acero y PRFV junto a un adhesivo estructural. Su propósito es disminuir las limitaciones halladas en ambos componentes para obtener estructuras más ligeras, resistentes y seguras, además de eliminar las desventajas de sus componentes. La corrosión en el acero es limitada a atacar solo la capa más externa y la baja resistencia a la fatiga e impacto en los materiales compuestos también es protegido por la capa más externa (Herrerros, 2008).

**Figura 1. 3**

*Curva fuerza-desplazamiento para el acero, material compuesto y material laminado híbrido fibra-metal*



Nota: Ilustración tomada de MaLECoN: un nuevo material híbrido laminado fibra-metal para construcción naval, (Herrerros, 2008).

En la Figura 1.3. se observa las características curvas de fuerza del material híbrido y sus componentes. También se puede apreciar las zonas elástica y plástica, y los fallos del material compuesto.

La implementación de este material conlleva los siguientes beneficios, primero, su bajo peso logra disminuir el consumo de combustible en las maniobras. Segundo, su resistencia a la corrosión, fatiga e impacto aumenta su ciclo de vida disminuyendo los costos de mantenimiento y posterior renovación de material. Y por último la automatización podría reducir notablemente los costos de producción y de mano de obra; junto a la posibilidad del

uso de fibras ópticas en la resina del material compuesto para ser monitoreado a través de un diagnóstico inteligente.

### **1.5.3.2 Modos de fallo**

El comportamiento del material híbrido fibra-metal sometido a flexión se observa dos posible fallos, pandeo local y fractura del adhesivo. En el pandeo local se observa propagación de grietas en la interfase entre componentes que provocan el despegado, relacionado a la energía de fractura de adhesivo. La zona delaminada aumenta junto a la energía de fractura adhesiva, llegando al valor crítico (Suárez, 2004).

### **1.5.3.3 Unión adhesiva**

Los estudios relacionados a los materiales híbridos se enfocan principalmente en la unión adhesiva entre los materiales. Varios autores han analizado los principios de fallas en entre los componentes. Como Herreros (2005) que relaciona las grietas en intercaras con el uso de polímeros de diferentes durezas junto a cada componente. Mientras que López (2004) determina que la unión adhesiva no falla mientras se mantenga la flexión total en cada componente, jugando con los espesores de cada uno. De esa forma fallarían antes sus componentes antes que la unión entre ellos, aumentando la resistencia final.

Se ha estudiado la implementación de diferentes métodos de sujeción, como Arenas (2019) quien demuestra que la implementación de pasadores metálicos. La implementación de pasadores metálicos roscados en el adhesivo mejora la adhesión un 80%; sin embargo, a nivel industrial resulta más práctico el uso de pasadores de alambre. De Vicente (2022) propone la unión entre materiales con el uso de perfiles en C a modo de empotramiento logrando disminuir 16% del peso estructural.

**Figura 1. 4**

*Aplicación de pasadores metálicos en la unión adhesiva*



Nota: Ilustración tomada de Design, manufacturing and testing of hybrid adhesive joints with metallic pins to join steel with fiberglass reinforced composite, (Arenas, 2019).

En la Figura 1.4. se observa el espécimen elaborado por el autor, uniendo los materiales mediante con el uso de pasadores metálicos.

Como Herreros (2005) que relaciona las grietas en intercaras con el uso de polímeros de diferentes durezas junto a cada componente. Mientras que López (2004) determina que la unión adhesiva no falla mientras se mantenga la flexión total en cada componente, jugando con los espesores de cada uno. De esa forma se extendería el valor de falla hasta sus componentes antes que la unión entre ellos, aumentando la resistencia final.

#### **1.5.4 Teoría de vigas**

Una viga cuenta con la capacidad de operar carga lateral, la cual al ser un análisis de equilibrio estático produce reacciones dependientes de las condiciones externas (de frontera). Internamente se encuentran también fuerzas cortantes y momentos flectores que equilibran todas las áreas seccionales de la viga. Ambas están directamente relacionadas a las condiciones de frontera y de carga establecidas.

$$\frac{dV}{dx} = -q_{(x)} \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dx} = -V_{(x)} \quad (7)$$

La combinación de ambas definiciones (6) (7) permite el cálculo de la fuerza cortante y el momento flector a través de una ecuación diferencial ordinaria aplicable a toda sección (8).

$$\frac{d^2 M_z}{dx^2} = q(x) \quad (8)$$

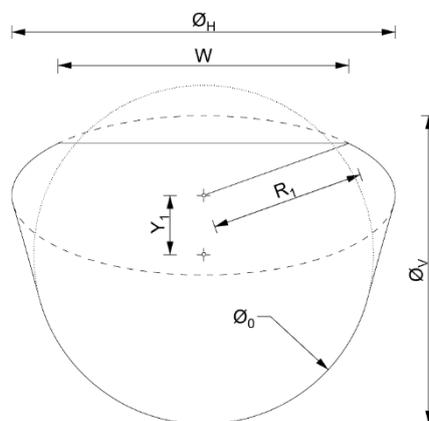
Durante la flexión las secciones transversales de la viga permiten la rotación entre ellas, lo que les permite permanecer planas, este fenómeno es conocido hipótesis cinemática. La rotación entre secciones genera una curvatura cuyo radio se puede relacionar con la deformación unitaria con la distancia hacia el eje neutro. La inversa del radio de curvatura,  $\rho$ , es conocida como deflexión estática,  $k$ .

### 1.5.5 Deformación por colapso

Las vigas con sección hueca se comportan de una manera diferente a las vigas sólidas, dado que parte de su energía se desvía para deformar la cara donde recibe directamente el momento flector. La flexión de un tubo se puede dividir en diferentes etapas, primero como en cualquier sección se encontrará el comportamiento elástico. Luego comienza la etapa de deformación plástica, marcando un área plana denominada meseta de ovalamiento. Y por último el colapso estructural del material, donde se deforma geoméricamente de la siguiente manera.

**Figura 1. 5**

*Geometría de la sección de un tubo colapsado por flexión*



Nota: Elaboración propia

En la figura 1.5 se observa las dimensiones de mayor interés para el análisis del colapso de una tubería, empleado por Elchalakani (2002). En ellas predominan el diámetro original de la sección,  $\emptyset_0$ ; el alto y ancho de la sección colapsada  $\emptyset_V$  y  $\emptyset_H$ . El ancho de la meseta de ovalamiento  $W$  y su altura en referencia al centro original  $Y_1$ .  $R_1$  es la distancia desde el centro del óvalo hasta el extremo de la meseta.

## **Capítulo 2**

## 2.1 Metodología

Durante el estudio propuesto se segmentaron dos análisis, en el primero se elaboraron tuberías de acero y tuberías de material híbrido para establecer una comparación y observar las bondades de la innovación. En total se realizaron 2 probetas de acero y 6 del nuevo material. El material híbrido se elaboró a partir de 2 tubos de acero de concéntricos reforzados con resina de poliéster insaturada con telas de fibra de vidrio de dos calidades. El material de acero simple consistió en el uso de tuberías del menor diámetro y mayor espesor que las empleadas en el material híbrido.

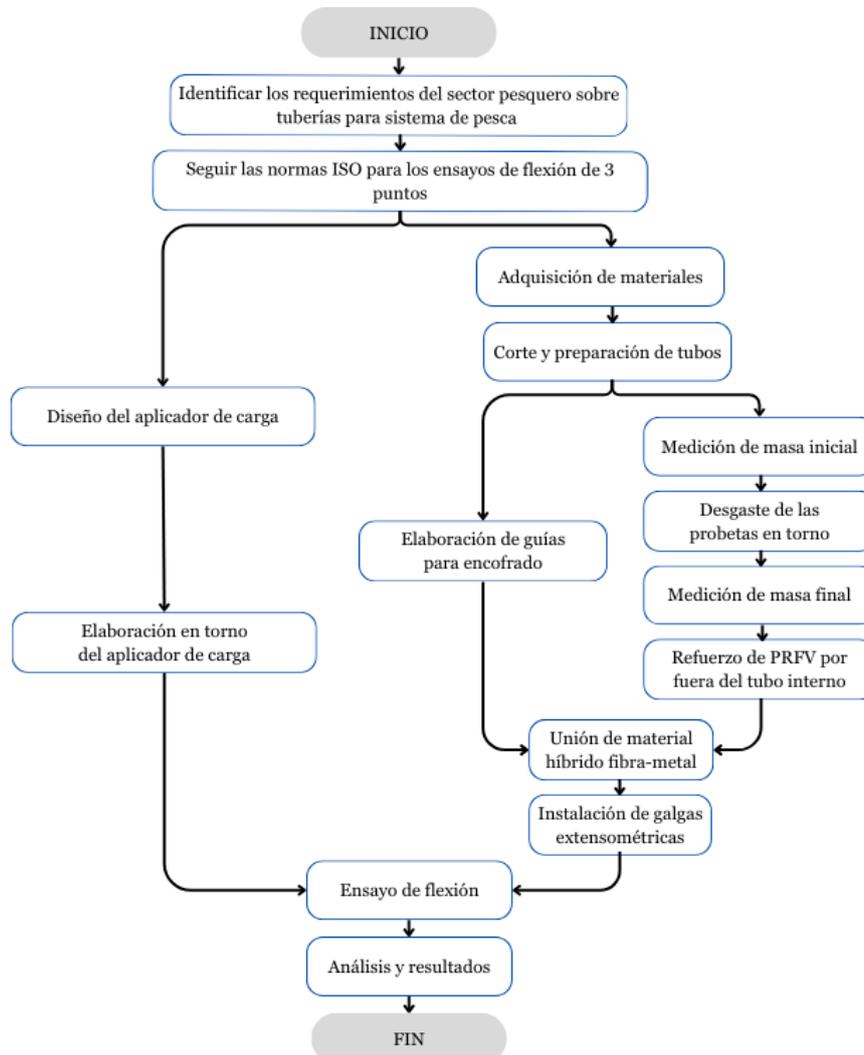
En el segundo segmento se confeccionaron las probetas de ambos materiales, simulando un estado de corrosión interno. La corrosión se ha concebido mediante el desgaste por corte mecánico de la superficie realizado en un equipo giratorio de corte comúnmente conocido como “torno” en nuestro medio. El patrón de corte seleccionado logró captar una distribución uniforme del desgaste en el material.

Dado que la naturaleza de este material no ha sido estudiada en profundidad, se seleccionó el método experimental para la obtención de los resultados. Las tuberías de ambos materiales fueron llevadas al Laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT para la ejecución de los ensayos destructivos. Para ello se empleó un molde guía que permita la aplicación de fuerza durante el ensayo de flexión. Las pruebas se llevaron a cabo dentro del régimen elástico, el cual fue medido a través del uso de galgas extensométricas.

Con los resultados preliminares medidos por las galgas extensométricas se obtuvo gráficas de esfuerzo y desplazamiento del material durante el ensayo. Se tomaron en consideración correcciones debido al error de desalineamiento provocados durante el vertido de resina en la elaboración de las probetas.

**Figura 2. 1**

Diagrama de flujo de desarrollo de procesos



Nota: Elaboración propia

En el diagrama se observa que pueden realizarse varias actividades en paralelo para optimizar el tiempo empleado durante el proyecto.

## 2.2 Elaboración

### 2.2.1 Materiales

Las probetas de acero tuvieron mayor espesor ya que representan cédulas típicamente halladas en las embarcaciones para resistir mayor tiempo al desgaste y corrosión. El tubo interior reforzado con fibra de vidrio del material híbrido fue de gran ayuda para la incorporación de la fibra de vidrio. La resina poliéster fue seleccionada como

adherente en la unión fibra-metal debido a sus propiedades como el no absorber agua, propiedades mecánicas y económico.

**Tabla 2. 1**

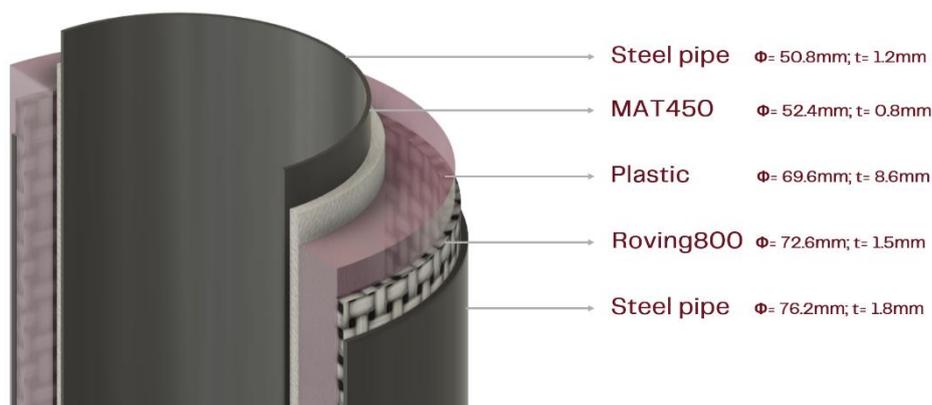
*Distribución de materiales de las probetas y su presencia de corrosión*

<b>Probeta</b>	<b>Material</b>	<b>Desgaste</b>
ST1	acero	sí
ST2	acero	no
HB1	híbrido	no
HB2	híbrido	no
HB3	híbrido	sí
HB4	híbrido	sí
HB5	híbrido	sí
HB6	híbrido	sí

Nota: Elaboración propia

**Figura 2. 2**

*Capas de materiales de las probetas de material híbrido fibra-metal*



Nota: Elaboración propia

En la figura 2.2 se observa las distintas capas y su orden en la probeta. La imagen fue elaborada en el software Fusion360, perteneciente al grupo AutoDesk. Las probetas de acero consisten en una sola capa de un solo tubo de acero negro de 2" de diámetro con 3mm de espesor.

Los materiales seleccionados fueron acero negro (acero dulce bajo en carbono), cuya producción cuenta con las siguientes certificaciones: ISO 6892-1 (2019) que certifica las

propiedades mecánicas del material; y la SAE J403 1008 (2009) que certifica la composición química de los ingredientes empleados en la fundición. La preparación del plástico fue conformada por una base de resina poliéster insaturada, acelerada con octoato de cobalto, y catalizada con peróxido MEK (metiletilcetona) al 2%. El plástico fue reforzado por una capa de tela y otra de tejido de fibra de vidrio. Para el plástico empleado en el vertido que funciona como adhesivo entre los materiales, se añadió a la mezcla anterior, estireno como disolvente al 10% del volumen de la solución, para disminuir su viscosidad y evitar la formación de burbujas.

### 2.2.2 Proceso de elaboración

Para la elaboración de las probetas de material híbrido fibra-metal se emplearon tubos internos de acero negro reforzados externamente con PRFV, empleando una capa de cada tela MAT. El tubo de menor diámetro reforzado es colocado de forma concéntrica dentro del tubo de mayor diámetro, guiado en ambos extremos a modo de encofrado. La unión adhesiva entre los materiales se realiza finalmente con resina poliéster. Tanto para los tubos externos de material híbrido fibra-metal, y los de solo acero, se cortaron con una longitud de 300 mm. Mientras que para los tubos internos de material híbrido se cortaron a 320 mm con la finalidad de guía para que queden correctamente concéntricos durante el encofrado.

#### Figura 2. 3

*Capa de tela MAT reforzando el tubo de menor diámetro*



Nota: Elaboración propia

El reforzamiento exterior en el tubo de menor diámetro que usó tela de fibra de vidrio fue de aplicación directa. Sin embargo, el tejido de fibra de vidrio mostró complicaciones en su aplicación debido a la curvatura de la tubería, por lo que se prefirió su aplicación en el interior del tubo de mayor diámetro, y su completa unión resultó de la adherencia final tras el vertido de plástico.

**Figura 2. 4**

*Guías a modo de encofrado para el vertido de plástico*



Nota: Elaboración propia

El uso de los tableros de madera permitió el alineamiento de los tubos de forma concéntrica en un mismo eje axial.

**Figura 2. 5**

*Presentación de los tubos internos y externos en las guías*



Nota: Elaboración propia

Al finalizar la base del encofrado se probó que el ancho de corte de cada tubo permitiese el ingreso sin holgura en su posición correspondiente.

**Figura 2. 6**

*Encofrado armado con la resina poliéster en su interior*



Nota: Elaboración propia

**Figura 2. 7**

*Probeta finalizada de material híbrido fibra-metal*



Nota: Elaboración propia

El proceso de elaboración de las probetas de material híbrido mostró eficacia y sencillez que pueden ser mejoradas al producir el material a gran escala.

### **2.2.3 Porcentaje de desgaste**

Para la simulación de desgaste por corrosión se retiró material mecánica y uniformemente en forma espiral en un torno en la mitad del tubo interno. Para obtener un desgaste superficial de 30% se consideró una cuchilla de 2 mm siguiendo un paso de 4 mm (espacio entre cortes). La profundidad que se logró penetrar con la cuchilla fue el 50% del espesor del tubo, dado que empezaba a visualizarse marcas internas del calor generado por el

corte y estaría próximo a deformarse. Finalmente se midió la masa inicial y final del material obteniendo una pérdida de material de 10%.

**Figura 2. 8**

*Probeta antes y después del desgaste*



Nota: Elaboración propia

El desgaste se generó en la mitad del tubo donde se iban a encontrar los mayores esfuerzos generados por el momento flector en una viga simplemente soportada.

**Tabla 2. 2**

*Porcentaje de desgaste local*

<b>Referencia</b>	<b>Masa Inicial [g]</b>	<b>Masa Final [g]</b>	<b>Diferencia [g]</b>	<b>Masa inicial local [g]</b>	<b>Desgaste local [%]</b>
ST1	1041	1010	31	347.0	8.9
HB3	555	540	15	173.4	8.6
HB4	553	538	15	172.8	8.7
HB5	556	541	15	173.8	8.6
HB6	555	539	16	173.4	9.2

Nota: Elaboración propia

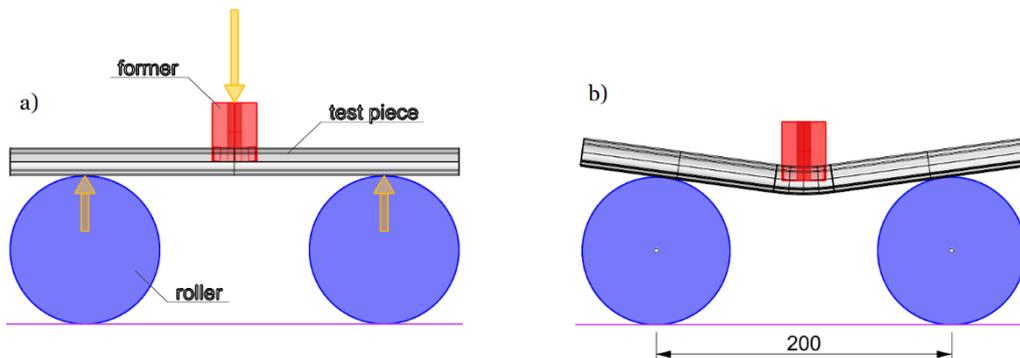
### **2.3 Ensayo de flexión**

La prueba de flexión de 3 puntos es un ensayo destructivo, donde el material se encuentra simplemente soportado en sus extremos por dos rodillos, y se aplica una carga concentrada en la mitad. Dado que el material híbrido fibra-metal está siendo comparado con acero, se prefirió el uso de normas de acero ISO 8491 (1998) y su análogo ASTM E290 (2022) para ensayos en tuberías. De acuerdo con la norma ISO 7438 (2016), la distancia

entre soportes debe ser al menos el diámetro de la probeta. Estableciéndose una distancia de 200 mm, siendo ampliamente superior al diámetro externo de la probeta, 76.2 mm (3 pulg.).

**Figura 2. 9**

*Ensayo de flexión de 3 puntos*



Nota: Elaboración propia

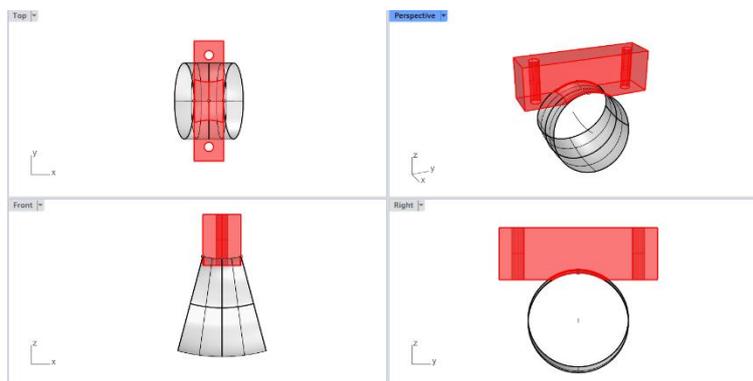
En la figura 2.2 se observa: a) Aplicación de fuerzas durante ensayo de flexión de 3 puntos. b) Deformación esperada de la probeta al finalizar el ensayo. La imagen fue elaborada con el software RhinoCeros.

### **2.3.1 Formador de curvatura**

Durante los ensayos de flexión el equipo estuvo acoplado a una pieza que permitió aplicar una carga concentrada mientras su forma le permitía guiar la flexión del tubo. El formador de curvatura del tubo debe evitar que la sección se ovale, considerando una ranura correspondiente al diámetro exterior de la probeta. La longitud de las probetas y el ángulo de doblez durante el ensayo, no se encuentran bajo ninguna restricción salvo de reportarlos al final de los ensayos. Se consideró en el diseño de la pieza un ángulo máximo de flexión de  $15^\circ$ . Mientras que por motivos de dimensiones de la pieza era más conveniente rodear la tercera parte del tubo.

**Figura 2. 10**

Vistas de plano e isométrica del formador de curvatura



Nota: Elaboración propia

En la figura 2.3 se observa la acción esperada del formador de curvatura sobre la probeta durante el ensayo de flexión de 3 puntos. La imagen fue elaborada con el software RhinoCeros.

### 2.3.2 Descripción de equipos

Para la experimentación con los ensayos destructivos de flexión de 3 puntos se utilizaron los siguientes equipos:

#### 2.3.2.1 UH-FX Series

Dentro de la amplia gama de fuerza máxima disponibles en los equipos de la serie se encuentran de: 300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 kN. Dentro del laboratorio se encuentra disponible el modelo de 500 kN, UH-F500X. La serie permite el desplazamiento controlado en (mm/min), fuerza controlada en (N/s), tensión controlada (MPa/s) y deformación unitaria controlada (%/min). El equipo registra hasta 1000 puntos por segundo de prueba.

**Figura 2. 11**

*Equipo UH-F500X*



Nota: Ilustración tomada de UH-X/FX Series - Hydraulic Universal Testing Machines (Shimadzu Latin America).

La máquina de ensayos universales tiene el beneficio de realizar diferentes pruebas como: tracción, flexión, o compresión.

### **2.3.2.2 Equipos de medición**

El equipo presionó a velocidad continua hasta llegar al límite elástico, el cual fue monitorizado a través de un computador externo. Los esfuerzos medidos por galgas extensiométricas indicaron en tiempo real, pudiéndose observar el momento en que se llegó al límite elástico. Dando por finalizado el ensayo de flexión de la probeta analizada.

Las galgas empleadas registran las microdeformaciones como pequeñas variaciones de potencial eléctrico en mV, corresponden a la marca VPG Sensors. La tarjeta de adquisición de datos, Omega, se encuentra conectada a las galgas y transforman el potencial eléctrico a un formato binario digital. Finalmente, los datos fueron proyectados al usuario mediante el software LabView2017.

## **2.4 Resultados**

La formulación para el procesamiento de datos se realizó su evaluación mediante las fórmulas de energía para estudiar el comportamiento del material híbrido y conocer sus propiedades mecánicas, sus ventajas y desventajas.

La norma ISO 8491 (1998) además indica los datos a presentarse al final de los ensayos.

**Tabla 2. 3**

*Tabla de resultados para cada probeta empleando la norma ISO 8491*

<b>Identificación del espécimen</b>	ST1 / ST2	HB1 / HB2 / HB3 HB4 / HB5 / HB6
<b>Dimensiones del espécimen</b>	L = 300 mm	L = 300 mm
	$\phi = 50.8$ mm	$\phi = 76.2$ mm
<b>Ángulo de dobléz</b>	15 ° máx.	
<b>Resultado de la prueba</b>	xxx [N]	

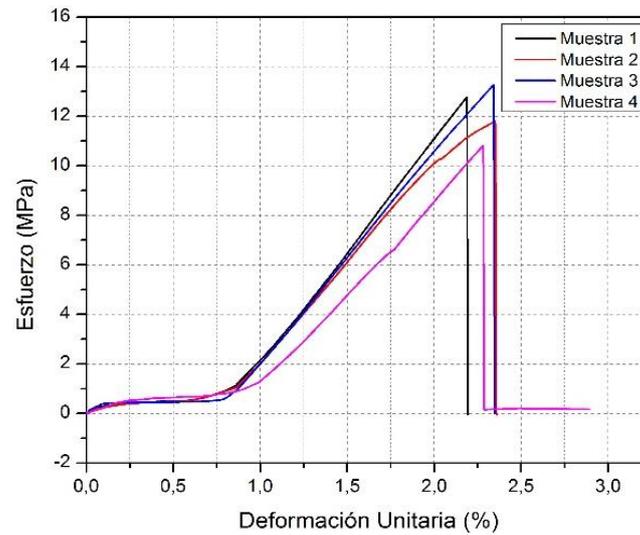
Nota: Elaboración propia

En consideración del proceso de curado habiéndose encontrado en un espacio confinado, a modo de encofrado en los extremos de las probetas, la resina por adición del catalizador generó una cantidad de calor que pudo sobrepasar los 100 °C. Dicho calor provocó la liberación del soporte superior del encofrado, generando un movimiento relativo en la concentricidad de los tubos. Por esto se realizaron calibraciones en los extremos que permitan considerar los errores por desalineamiento.

Los resultados de fuerza y de desplazamiento registrados por los equipos de medición, mostraron el acoplamiento del equipo con la probeta desde el principio de la prueba, los cuales fueron considerados como errata.

**Figura 2. 12**

Gráfico de esfuerzo vs deformación unitaria esperados



Nota: Ilustración tomada de Caracterización mecánica de compuestos poliéster/fibra de guadúa y poliéster/fibra de guadúa-vidrio, (Moreno, 2018).

El gráfico final de presentación se obtuvo a partir del comportamiento lineal, típico de la zona elástica de los materiales.

## **Capítulo 3**

### 3.1 Resultados y Análisis

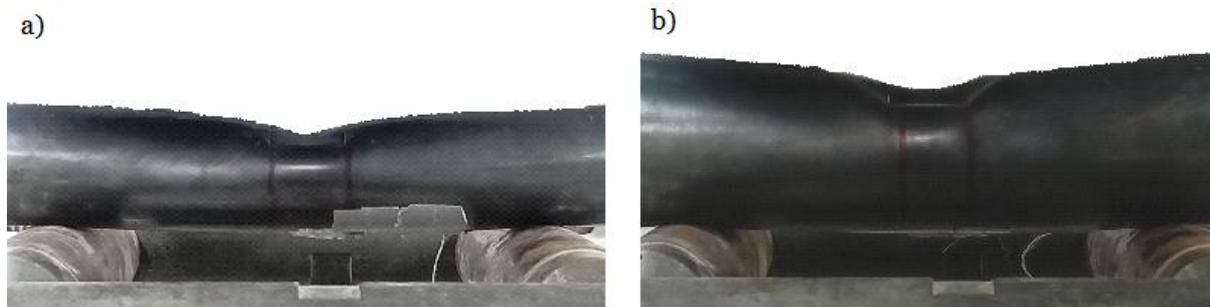
Los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de flexión se presentan inicialmente mostrando la fuerza aplicada por la máquina de ensayos universales y la deformación unitaria medida por las galgas extensométricas. Finalmente, se obtuvo el esfuerzo presente en el material.

### 3.2 Resultados del ensayo de flexión

Los ensayos de flexión de 3 puntas se ejecutaron mediante la aplicación de una fuerza concentrada en la mitad de la probeta, provocando a su vez un momento flector que deformó la probeta. La deformación típica obtenida después de los ensayos en las probetas mostró un aplastamiento pronunciado en la cara superior del tubo.

**Figura 3. 1**

*Deformación obtenida tras ensayos de flexión*



Nota: Elaboración propia

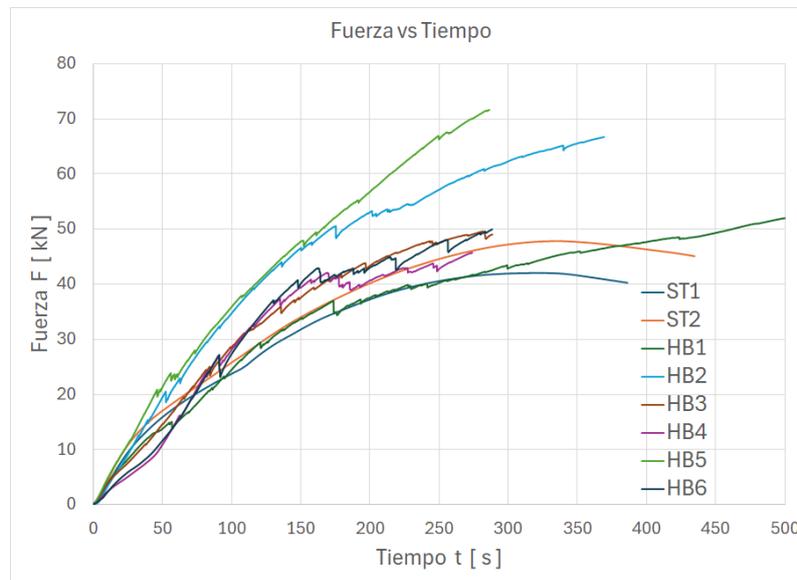
En la figura 3.1 se observa la deformación obtenida en: a) La probeta ST2, conformada solo por acero de 2". b) La probeta HB1, material híbrido. La probeta ST2 soportó una fuerza de 45.1 [kN], mientras que la probeta HB1 64.3 [kN].

#### 3.2.1 Distribución de fuerza vs tiempo

A continuación, se observan los resultados medidos por el equipo de ensayo. Para mayor detalle, se encontrarán con mayor tamaño en el Apéndice al final del documento. Tener en cuenta que las probetas de solo acero se encuentran etiquetadas como ST mientras que, las de material híbrido como HB.

**Figura 3. 2**

Curva completa de fuerza vs tiempo



Nota: Elaboración propia

En el gráfico se pudo observar de primera mano el comportamiento típico del material, y las diferentes fuerzas a las que puede llegar. Se observó además distintos quiebres en los materiales híbridos, por lo que se prefirió cortar las curvas en sus picos más representativos, permitiendo un mejor estudio de estas. Sin embargo, se consideró importante presentar las curvas completas de esta forma porque muestra que el material híbrido superó la fuerza máxima en algunos casos al acero a pesar de incluso ya haber fallado.

**Figura 3.3***Curva de fuerza vs tiempo*

Nota: Elaboración propia

En el gráfico se observa claramente la pérdida de fuerza al final de cada curva, que fueron puntos donde se considera que el material falló. Cabe destacar que las probetas HB2 y HB5 lograron soportar mayor fuerza que las probetas de acero en el mismo periodo de tiempo antes de alcanzar sus puntos de falla.

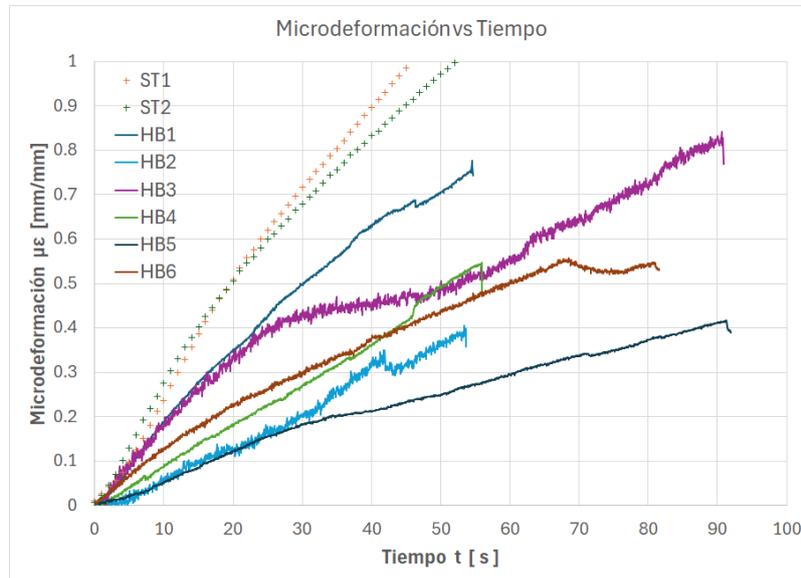
La curva de fuerza de la probeta HB1 alcanzó el menor valor antes del fallo del material. Las curvas de las probetas HB3, HB4 y HB6 soportaron mayor fuerza previo al fallo del material, sin embargo, sucedió en un intervalo de tiempo mayor. La mayoría de las probetas de material híbrido presentaron una mayor fuerza dentro del mismo intervalo de tiempo.

### 3.2.2 Distribución de deformación unitaria vs tiempo

A continuación, se observan los resultados medidos por las galgas extensométricas. Para mayor detalle, se encontrarán con mayor tamaño en el Apéndice al final del documento.

**Figura 3.4**

Curva de deformación unitaria vs tiempo



Nota: Elaboración propia

El presente gráfico, al final de cada curva se encuentra un cambio repentino que corresponde al punto de fallo del material, que además coincide con la lectura de fuerzas de parte del equipo de ensayos universal. Todas las curvas de deformación unitaria mostraron una mayor resistencia a la flexión por parte de los materiales híbridos (HB) respecto al acero (ST).

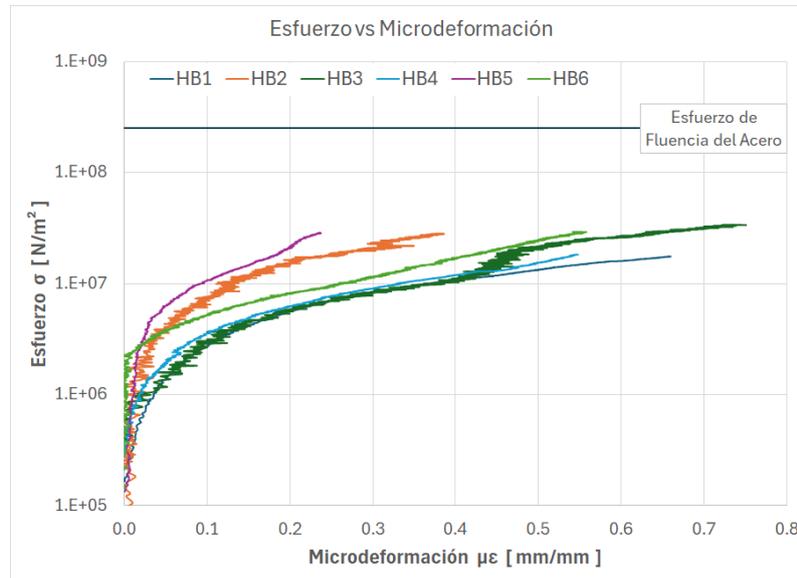
Las alteraciones verticales en algunas de las curvas se debieron al constante quiebre del plástico durante los ensayos de las probetas de material híbrido. Nuevamente las probetas HB2 y HB5 resaltaron entre las demás al presentar menor deformación respecto al resto de probetas del mismo material y del acero. Las probetas de acero ST1 y ST2 son presentaron mayores deformaciones que todas las probetas de material híbrido.

### 3.2.3 Distribución de esfuerzo vs deformación unitaria

A continuación, se observan los resultados de los esfuerzos calculados, producidos por el momento flector durante el ensayo. El procedimiento de los resultados obtenidos se puede observar con mayor detalle en el Apéndice.

**Figura 3.5**

Curva de esfuerzo vs deformación unitaria



Nota: Elaboración propia

El gráfico de esfuerzos mostró nuevamente a las probetas HB2 y HB5 ser más resistentes que el resto. La pendiente de estas curvas representa al módulo de elasticidad, lo que nuevamente las probetas HB2 y HB5 mostraron poseer un mayor módulo de elasticidad, al presentar pendientes más empinadas.

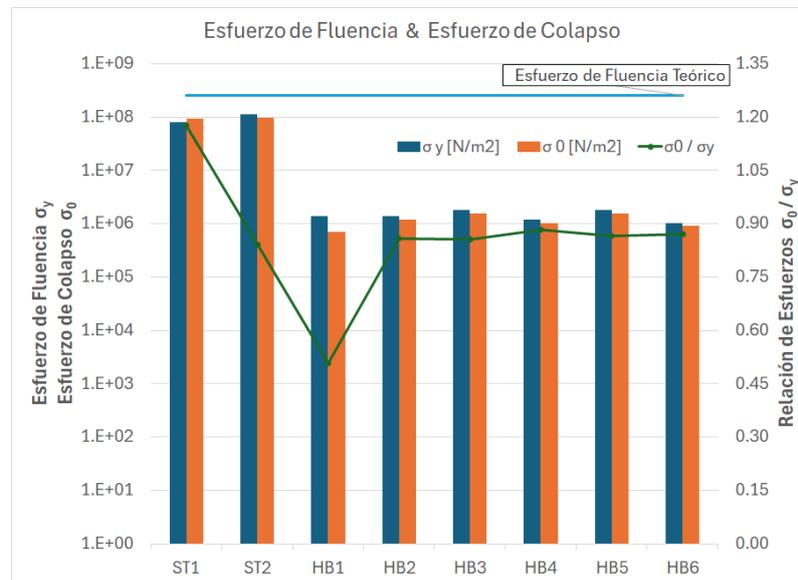
El eje del esfuerzo se encuentra en escala logarítmica para apreciar de mejor manera tanto el comportamiento de las curvas del material híbrido y compararlo con el ya conocido esfuerzo de fluencia del acero.

### 3.2.4 Relación de esfuerzos de fluencia y colapso

Para la obtención de los esfuerzos de fluencia y de colapso de los materiales se aplicó el método de Elchalakani que obtiene resultados mediante la geometría de las deformaciones finales y junto al uso de formulaciones empíricas.

**Figura 3. 6**

Relación de esfuerzos de fluencia y colapso



Nota: Elaboración propia

Las probetas de acero mostraron una mayor capacidad de tolerar esfuerzos de ambas naturalezas, fluencia y colapso. La relación de los esfuerzos muestra una proporción típica de 0.86 entre ambos materiales, indicando que normalmente el esfuerzo de fluencia es ligeramente mayor que el del colapso.

### 3.3 Estimación teórica

Tras la organización de las capas de distintos materiales, como material híbrido y compuesto. Las propiedades como módulo de Young y coeficiente de Poisson de cada material se combinan en torno a sus espesores y porcentajes volumétricos en un entramado de matrices.

**Tabla 3. 1**

Tabla de propiedades de los materiales empleados

Material	Módulo de Young E	Coefficiente de Poisson $\nu$	Porc. volumétrico %V
Acero	$2.1 \times 10^{11}$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.30	[-]
MAT450	$7.0 \times 10^9$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.25	0.70
Poliéster	$3.0 \times 10^9$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.32	[-]
Roving800	$7.3 \times 10^{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.25	0.50

Nota: Elaboración propia

**Tabla 3. 2**

Matrices  $Q_k$  de rigidez reducida

Acero	$Q_k$	$k = 1, 5$	MAT 450	$Q_k$	$k = 2$
$2.3 \times 10^{11}$	$6.9 \times 10^{10}$	0	$6.3 \times 10^9$	$1.7 \times 10^9$	0
$6.9 \times 10^{10}$	$2.3 \times 10^{11}$	0	$1.7 \times 10^9$	$6.3 \times 10^9$	0
0	0	$8.1 \times 10^{10}$	0	0	$2.3 \times 10^9$
Poliéster	$Q_k$	$k = 3$	Roving 800	$Q_k$	$k = 4$
$3.3 \times 10^9$	$1.1 \times 10^9$	0	$4.1 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{10}$	0
$1.1 \times 10^9$	$3.3 \times 10^9$	0	$1.2 \times 10^{10}$	$4.1 \times 10^{10}$	0
0	0	$1.1 \times 10^9$	0	0	$1.5 \times 10^{10}$

Nota: Elaboración propia

Las matrices de rigidez reducida se realizan por cada capa de material, nótese que la capa de acero se repite al principio y al final. Las capas de MAT450 y Roving800 fueron consideradas como capas compuestas, quiere decir que ya fueron integradas como PRFV.

**Tabla 3. 3**

Matriz ABD del material híbrido

$7.9 \times 10^8$	$2.4 \times 10^8$	0	$2.6 \times 10^7$	$7.6 \times 10^6$	0
$2.4 \times 10^8$	$7.9 \times 10^8$	0	$7.6 \times 10^6$	$2.6 \times 10^7$	0
0	0	$2.8 \times 10^8$	0	0	$8.9 \times 10^6$
$2.6 \times 10^7$	$7.6 \times 10^6$	0	$8.5 \times 10^5$	$2.6 \times 10^5$	0
$7.6 \times 10^6$	$2.6 \times 10^7$	0	$2.6 \times 10^5$	$8.5 \times 10^5$	0
0	0	$8.9 \times 10^6$	0	0	$3.0 \times 10^5$

Nota: Elaboración propia

**Tabla 3. 4***Inversa de Matriz ABD del material híbrido*

$4.4 \times 10^{-8}$	$-1.3 \times 10^{-8}$	0	$-1.3 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-7}$	0
$-1.3 \times 10^{-8}$	$4.4 \times 10^{-8}$	0	$4.0 \times 10^{-7}$	$-1.3 \times 10^{-6}$	0
0	0	$1.2 \times 10^{-7}$	0	0	$-3.4 \times 10^{-6}$
$-1.3 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-7}$	0	$4.1 \times 10^{-5}$	$-1.2 \times 10^{-5}$	0
$4.0 \times 10^{-7}$	$-1.3 \times 10^{-6}$	0	$-1.2 \times 10^{-5}$	$4.1 \times 10^{-5}$	0
0	0	$-3.4 \times 10^{-6}$	0	0	$1.1 \times 10^{-4}$

Nota: Elaboración propia

La matriz final ABD contiene la combinación de cada material según sus dimensiones. La matriz está conformada por la matriz A que representa la tracción, la matriz D que representa a la flexión, y la matriz B que representa el acoplamiento entre ambas. En la matriz inversa se pudo observar el mayor valor absoluto de cada matriz, que nos permitirá predecir cómo será la falla del material.

**Tabla 3. 5***Tabla de estimación teórica del material híbrido*

Constantes efectivas	Simbología	Valor	Unidades
<b>Módulo de Young</b>	$E_x = E_y$	$1.1 \times 10^{11}$	$[N/m^2]$
<b>Módulo de Corte</b>	$G_{xy}$	$4.2 \times 10^{10}$	$[N/m^2]$
<b>Coefficiente de Poisson</b>	$\nu_{12} = \nu_{21}$	0.30	$[-]$

Nota: Elaboración propia

Finalmente, de la matriz inversa y el espesor total de todas las capas, se obtuvieron los resultados esperados del material híbrido.

### 3.4 Análisis de resultados

Los resultados directos relacionados a las lecturas de Fuerza (Figura 3.2 y 3.3) y de Deformación Unitaria (Figura 3.4), muestran desde un principio la ventaja de las probetas HB2 y HB5 ante el resto de las probetas de material híbrido y las probetas de solo acero. Los cálculos muestran que su módulo de elasticidad se encuentra mejor que el acero.

La probeta HB2 no fue desgastada, mientras que la HB5 sí lo fue, siendo esta última la de mayor resistencia. Demostrando que no se vincula la pérdida de las propiedades mecánicas por desgaste en el material, al ser sometidas a flexión, como claramente sucedió en las probetas de acero ST1 (desgastada) y ST2 (no desgastada). La Figura 3.5 mostró una pendiente similar entre el resto de las probetas, resultando en Módulos de Young similares entre ellos.

La figura 3.1 demostró la necesidad de corregir y/o implementar la deformación por ovalamiento, que comprime una cara de la sección antes de flexionar por completo.

Cabe reconocer que las probetas HB2 y HB5 fueron elaborados posteriormente al resto de probetas de material híbrido, mejorando (gracias a la experiencia previa) significativamente su alineamiento concéntrico frente al resto de probetas. Se sugiere considerar el alineamiento como un posible punto clave de éxito para la elaboración del material híbrido.

# Capítulo 4

#### **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

La ciencia de materiales aplicada a distintas ingenierías es crucial para el progreso de sus distintas ramas. Los materiales son seleccionados de acuerdo con sus beneficios y desventajas al frente de distintos proyectos. Los materiales empleados en la ingeniería naval se enfrentan constantemente a la intemperie, en un ambiente húmedo y salino, que propicia la corrosión.

Actualmente el material predominante por costos y propiedades mecánicas en la ingeniería naval es el acero. Sin embargo, como cualquier otro material no es perfecto, y este reacciona con facilidad frente al oxígeno, corroyéndose. Por lo que constantemente requiere de protección y mantenimiento, que a lo largo de los años representa un aumento en los costos.

Los materiales híbridos y compuestos en general buscan solucionar la principal problemática del acero que es la corrosión. Sus propiedades y comportamientos siguen siendo estudiadas.

#### **4.2 Conclusiones**

Se observa que la corrosión inducida por desgaste mecánico en un material híbrido muestra según los datos de fuerza y esfuerzo que la corrosión no afectan de manera significativa al material. El mismo material híbrido con la misma sección y presentando desgaste por corrosión HB3 a HB6 muestra un comportamiento similar a las probetas HB1 y HB2 que no presentaron el desgaste. Mientras que la diferencia entre las probetas ST1 con desgaste y ST2 sin desgaste hay una proporción similar a la del desgaste por corrosión, como se esperaba de forma teórica.

Es importante remarcar las limitaciones del material y recordar que no todos los materiales pueden ser mejor en todos los parámetros. Con los presentes resultados se observa que el material híbrido no es superior al acero en términos de propiedades mecánicas. Su régimen elástico es muy limitado frente al acero, lo que lo expone a constante deformaciones; a pesar de que su esfuerzo máximo (en el régimen plástico) es superior que el acero.

Los beneficios económicos presentes en el material híbrido representan un ahorro significativo a partir de un análisis de 5 años, representado por un precio aproximado de \$7.70 en material de solo acero vs \$7.92 de material híbrido con un 15% de TIR. Al extender el análisis de mantenimientos a lo largo de 15 años, el valor actual neto resulta en \$10.46 para el material de acero con sus respectivos mantenimientos vs similarmente \$9.40 para el material híbrido. Representando un 10% de ahorro en costos de mantenimiento en los circuitos de sentinas dentro de un buque pesquero.

### **4.3 Recomendaciones**

La mayor diferencia que se logró observar en las probetas de material híbrido es el alineamiento. Se observó en todas las gráficas que las probetas HB2 y HB5 fueron superiores a sus pares en todos los parámetros, y su única diferencia fue la precisión que se logró obtener en su alineamiento concéntrico. Por lo que se recomienda considerar el alineamiento concéntrico como una prioridad y un factor a considerar en los resultados de futuros análisis en materiales híbridos.

Debido al tiempo disponible para ejecutar el presente proyecto se prefirió desgastar el material de forma mecánica, sin embargo, existe la posibilidad de que las reacciones químicas en el acero den paso a un comportamiento diferente al material híbrido que podría ser considerado en un próximo estudio.

Los materiales híbridos al igual que los materiales compuestos pueden presentar múltiples diferencias en sus capas que su resultado culmine en un material único con diferentes módulos de elasticidad, por lo que sería prudente considerar para futuras investigaciones analizar diferentes secciones para determinar bajo otro enfoque sus propiedades mecánicas.

## Referencias

- [1] Birchon, D. (1970). The use and abuse of materials in ocean engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 185(1), 241-271.  
[https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1970\\_185\\_034\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_034_02)
- [2] Omaña, A.C., Arenas, J.M., & Suárez, J.C. (2022). Analysis of the Behavior of Fiberglass Composite Panels in Contact with Water Subjected to Repeated Impacts. *Polymers*, 14(19), 4051. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14194051>
- [3] Bian, L., Xiao, J., Zeng, J., & Xing, S. (2012). Effects of seawater immersion on water absorption and mechanical properties of GFRP composites. *Journal of Composite Materials*, 46(25), 3151-3162. <https://doi.org/10.3390/polym14142804>
- [4] Kootsookos, A., Mouritz, A.P., & St John, N.A. (2001). Comparison of the seawater durability of carbon and glass polymer composites. In *Proceedings of the 13th international conference on composite materials*. <https://iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/Paper-1200.pdf>
- [5] Dittenber, D. B., & Hota, G. V. (2010). Evaluation of a life prediction model and environmental effects of fatigue for glass fiber composite materials. *Structural Engineering International*, 20(4), 379-384.  
<https://doi.org/10.2749/101686610793557753>
- [6] Sheno, R.A., Read, P.J., Hawkins, G.L. (1995). Fatigue failure mechanisms in fibre-reinforced plastic laminated tee joints. *International Journal of Fatigue*, 17(6), 415-426.  
[https://doi.org/10.1016/0142-1123\(95\)98238-X](https://doi.org/10.1016/0142-1123(95)98238-X)
- [7] Herreros, M.A., Suárez, J.C., Pinilla, M.P., Miguel Alonso, S., López, F., de Ulzurrun, I.D. (2008). MaLECoN: un nuevo material híbrido laminado fibra-metal para construcción naval. *47º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima*.  
[https://oa.upm.es/4229/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_59131.pdf](https://oa.upm.es/4229/1/INVE_MEM_2008_59131.pdf)
- [8] Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. (2024). *Registro Nacional de Embarcaciones*. <https://srp.produccion.gob.ec/registro-nacional-de-embarcaciones>

- [9] Corporación Financiera Nacional (2022). *Ficha Sectorial Pesca*.  
<https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2022/fichas-sectoriales-4-trimestre/Ficha-Sectorial-Pesca.pdf>
- [10] Cedeño, S.D. (2018). *Diseño de un buque atunero de 2500 ton de capacidad en cubas para la industria ecuatoriana*. Proyecto de Grado Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46900>
- [11] Rowlands, J.C. (1965). Corrosion of tube and pipe alloys due to polluted seawater. *Journal of Applied Chemistry*, 15(2), 57-63. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010150201>
- [12] Escudero, D. (2001). Materiales compuestos. Aplicaciones. *Informes De La Construcción*, 52(472), 45-52.  
<https://doi.org/10.3989/ic.2001.v52.i472.676n/article/view/676/758>
- [13] Herreros, M.A., López, F., Díez, I., Suárez, J.C. (2005). Propagación de grietas en intercaras de uniones adhesivas en materiales híbridos estructurales. En *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 22, pp. 267-272).  
<https://www.researchgate.net/publication/267234071>
- [14] López, F., Díez, I., Suárez, J.C. (2004). Determinación de la energía de fractura adhesiva de uniones disimilares en materiales híbridos estructurales. En *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 21, pp. 186-190). <https://www.researchgate.net/publication/242624315>
- [15] Elchalakani M., Zhao X.L., Grzebieta R.H. (2002). Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, (44) 1117-1143. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00017-6)
- [16] Torres, G., Suárez, J.C. Arenas, J.M. (2021). Compression behaviour of hybrid tubes for lightweight Steel structures. *Materials* 14(22). <http://dx.doi.org/10.3390/ma14226797>
- [17] Arenas J.M., Suárez, J.C., Gavrilenko, E, Alía, C. (2019). Design, manufacturing and testing of hybrid adhesive joints with metallic pins to join steel with fiberglass reinforced composite. *Procedia Manufacturing*, (41) 500-507.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.037>

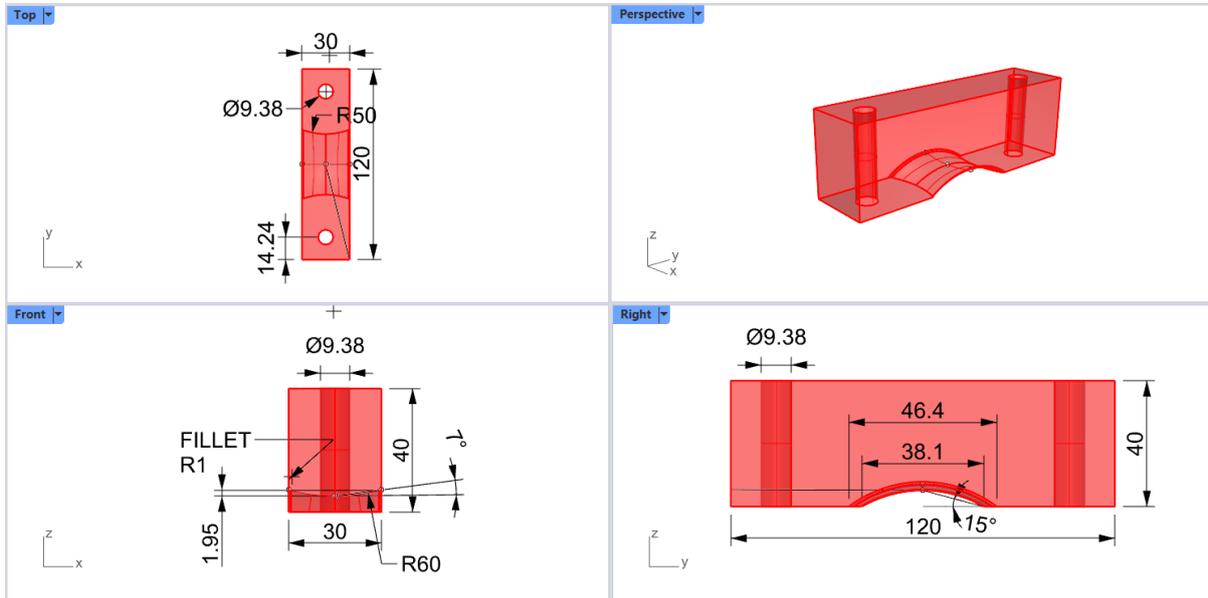
- [18] De Vicente, M., Silva, M., Herreros, M.A., Suárez, J.C. (2022). Design of a structurally welded/adhesively bonded joint between a fiber metal laminate and a steel plate for marine applications. *Journal of Marine Science and Technology*. (27) 1002-1014.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00773-022-00885-7>
- [19] Suárez, J.C., Miguel, S., Díez, I., Pinilla, P., Herreros, M.A., López, F. (2004). Modos de fallo en un material híbrido estructural para construcción naval: MaLECoN. In *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 21, pp. 350-355).  
<https://www.researchgate.net/publication/266606573>
- [20] Askeland, D.R., & Phulé, P.P. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 3). Méjico: International Thomson Editores.
- [21] Young, W.C. (1938). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. McGraw-Hill.
- [22] Ugural, A.C. (1981). *Stresses in Plates and Shells*. McGraw-Hill.
- [23] Shimadzu Corporation (2011). *Hydraulic Universal Testing Machines UH-X/FX Series*.  
<https://www.shimadzu-la.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/uh-xfx-series/spec.html>
- [24] International Organization for Standardization (1998). *Metallic materials, Tube, Bend Test (ISO 8491)*.
- [25] American Standard for Testing and Materials (2022). *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility (ASTM E290)*.
- [26] International Organization for Standardization (2016). *Metallic materials, Bend Test (ISO 7438)*.
- [27] International Organization for Standardization (2019). *Metallic materials, Tensile testing (ISO 6892-1)*.
- [28] Society of Automotive Engineers (2009). *Propiedades (Mecánicas, Químicas, Clasificación) (SAE J403 1008)*.
- [29] Moreno, L.E., Florez, J.D., Hernández, B.D. (2018). Caracterización mecánica de compuestos poliéster/fibra de guadúa y poliéster/fibra de guadúa-vidrio. *Scientia et Technica*, (Vol. 23) 344-348. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84959041005>

[30] Scott, R.J. (1996). Fiberglass boat design and construction. *Society of Naval Architects and Marine Engineers*, (Ed. 2).

# Apéndice

## Plano 1

Dimensiones de formador de curvatura empleado para los ensayos de flexión de 3 puntos



Nota: Elaboración propia

## Anexos

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)

Date: 16 / dec / 2024

### Destructive Testing - Three Point Bending Test

Test tube: ST1

#### Test Specimen Dimensions

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	3.00	[mm]
Outside diameter	∅	50.8	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: 200 [mm]

Max bending angle: 7.5 [°]

#### Test Results

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	40.29	[kN]
Stroke	d	13.50	[mm]
Time	t	407.0	[s]

Made by

Lab Assistant

Thesis Tutor

Alex Nevárez

Ing. Arián Briones

PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_16 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_ST2\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	3.00	[mm]
Outside diameter	∅	50.8	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	45.11	[kN]
Stroke	d	15.20	[mm]
Time	t	458.0	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_16 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_HB1\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	64.28	[kN]
Stroke	d	28.29	[mm]
Time	t	851.7	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_18 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_HB2\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	66.71	[kN]
Stroke	d	13.22	[mm]
Time	t	398.6	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: 23 / dec / 2024

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: HB3

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: 200 [mm]

Max bending angle: 7.5 [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	49.02	[kN]
Stroke	d	10.21	[mm]
Time	t	308.1	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_18 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_HB4\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	45.73	[kN]
Stroke	d	10.19	[mm]
Time	t	307.4	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_18 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_HB5\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	71.63	[kN]
Stroke	d	9.961	[mm]
Time	t	300.4	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**  
**Laboratorio de Geotecnia y Construcción (FICT)**

Date: \_18 / dec / 2024\_

**Destructive Testing - Three Point Bending Test**

Test tube: \_HB6\_

**Test Specimen Dimensions**

Description	Symbol	Value	Units
Thickness	t	13.9	[mm]
Outside diameter	∅	76.2	[mm]
Length	L	0.300	[mm]

Simple Supported  (x)      Cantilever  ( )      Clamped  ( )

Span: \_200\_ [mm]

Max bending angle: \_7.5\_ [°]

**Test Results**

Description	Symbol	Value	Units
Force	F	49.93	[kN]
Stroke	d	9.979	[mm]
Time	t	300.1	[s]

<b>Made by</b>	<b>Lab Assistant</b>	<b>Thesis Tutor</b>
Alex Nevárez	Ing. Arián Briones	PhD. Patrick Townsend