

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Estudio de deformación del bulbo en buques pesqueros de GFRP modificado
viscoelásticamente

INGE-2655

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

María José Valdez Mendoza

Walter Adrián Sánchez Pérez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a la memoria de mi abuelo Jesús Mendoza, cuyo amor y enseñanzas fueron fundamentales en la formación de la persona que hoy soy. A mis padres Jorge Valdez y Marianela Mendoza, por su amor incondicional y apoyo en cada etapa de mi vida. A mis hermanos Cristhian y Valentina, quienes me inspiran a ser mejor cada día. A mis abuelas Victoria y Gladys, que son mi ejemplo de fortaleza. Y a José D, por brindarme su apoyo y motivación en estos últimos años de carrera.

Maria José Valdez Mendoza

A Dios, por guiarme siempre, no dejarme desfallecer y tener a las personas que amo junto a mí. A mis padres Walter y Katty junto a mi hermana María Leonor por apoyarme y siempre estar a mi lado a lo largo de este camino. A mis abuelos maternos Washington, Leonor y Rosa mis segundos padres. A mis abuelos paternos José y Lilia que me observan desde el cielo. A mis tíos Ximena y Washington que siempre me supieron dar una mano y aconsejarme cuando lo necesitaba. A mis primos Ximenita, Sofia y Jorgito que son mi motivación para seguir adelante. A Olga María por su apoyo y consejo en todo momento.

Walter Adrián Sánchez Pérez

Agradecimientos

A Dios por darnos salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa. A nuestras familias, por el apoyo y palabras de aliento durante todo el proceso. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral y su profesorado por impartir sus conocimientos y experiencias, especialmente al PhD Patrick Townsend por guiarnos en este proyecto innovador. Al personal encargado del laboratorio de Geotecnia y Construcción de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra por siempre estar prestos a ayudarnos en los ensayos. Y a nuestros compañeros, con lo que hemos compartido alegrías y tristezas durante toda esta travesía.

Agradecimientos

Quiero darle gracias a Dios, quien ha guiado mi camino en esta travesía inesperada, pero que me ha llevado a vivir experiencias únicas en mi vida. A mis padres, por ser un pilar de inspiración, enseñándome con su ejemplo de fortaleza y esfuerzo a perseverar en mis metas.

A mi tutor y amigo, PhD. Patrick Townsend, por su invaluable orientación, sus sabios consejos y por motivarme a ser mejor tanto en lo académico como en lo profesional. A mis maestros de carrera, en especial al PhD. José Rolando Marín y al Msc. Isaac Mendoza, por su profesionalismo y su enseñanza impartida.

Agradezco a la ESPOL por brindarme las herramientas necesarias para completar mis estudios y alcanzar mis objetivos.

Finalmente, a mis compañeros, quienes han sido mi apoyo constante durante estos años y se han convertido en mi familia naval. Este logro también es de ustedes

Declaración Expresa

Nosotros María José Valdez Mendoza y Walter Adrián Sánchez Pérez acordamos y reconocemos:

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, 11 enero del 2024.

María José Valdez Mendoza

Walter Adrián Sánchez Pérez

Evaluadores

MSc. María Tadea Quintuña Rodríguez

Profesor de Materia

PhD. Patrick Roger Townsend Valencia

Tutor de proyecto

Resumen

Los cascarones esféricos son estructuras críticas en aplicaciones marinas debido a su susceptibilidad a fallas estructurales bajo presión externa. En el caso del GFRP, los defectos de laminación, especialmente en construcciones artesanales, representan un desafío significativo. Este estudio busca implementar materiales viscoelásticos en bulbos de proa para mejorar su resistencia estructural, reducir deformaciones y optimizar el consumo de combustible, aumentando así la operatividad de las embarcaciones. Se construyeron cinco cascaros esféricos de GFRP, tres con modificación viscoelástica, y se sometieron a ensayos de compresión. Los análisis incluyeron esfuerzos biaxiales, deformaciones locales y fuerzas de membrana. Los resultados mostraron que el cascaron modificado soportó mayores esfuerzos circunferenciales con una menor deformación generada gracias a la influencia del viscoelástico y de una menor presencia de imperfecciones geométricas y de laminación del mismo. Se concluye que el uso de materiales viscoelásticos en GFRP aumenta la capacidad a la deformación con mayor capacidad de carga antes de fallar estructuralmente. Sin embargo, es esencial minimizar las imperfecciones durante la fabricación para maximizar su desempeño. Este enfoque promueve embarcaciones más eficientes, resistentes y económicamente sostenibles.

Palabras Claves: Deformaciones, esfuerzo, Cascaron esférico, Viscoelásticos.

Abstract

Spherical shells are critical structures in marine applications due to their susceptibility to structural failures under external pressure. In the case of GFRP lamination defects, especially in artisanal construction, pose a significant challenge. This study aims to implement viscoelastic materials in bow bulbs to improve structural resistance, reduce deformation, and optimize fuel consumption, thereby enhancing vessels operability. Five spherical GFRP shells were constructed, three of which included viscoelastic modifications, and subjected to compression testes. The analyses included biaxial stresses, local deformation, and membrane forces. The results showed that the modified shell with viscoelastic material endured higher circumferential stresses with less deformation, attributed to the viscoelastic influence and fewer geometric and lamination imperfections. It is concluded that the use of viscoelastic materials in GFRP increases deformation capacity while supporting greater loads before structural failure. However, minimizing imperfection during fabrication is essential to maximize performance. This approach promotes more efficient, durable, and economically sustainable vessels.

Keywords: *Deformations, Buckling, Spherical Shell, Viscoelastic Materials.*

Índice General

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice General.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de Figuras.....	VIII
Índice de Tablas.....	IX
Capítulo 1.....	9
1. Introducción.....	10
1.1 Descripción del Problema.....	11
1.2 Justificación del Problema.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	13
1.4 Marco Teórico.....	13
1.4.1. La Flota Pesquera Ecuatoriana y sus materiales de construcción.....	13
1.4.2. Materiales tradicionales usados en la construcción artesanal de embarcaciones	13
1.4.3. Materiales Compuestos.....	18
1.4.4. Cáscaras esféricas de GFRP.....	20
1.4.5. Teoría de las membranas.....	23
1.4.6. Viscoelásticos.....	24
1.4.7. Manufactura de fibras y compuestos.....	24
Capítulo 2.....	25
2.1 Metodología.....	26
2.2 Flujograma.....	27
2.3 Descripción de Equipos.....	28
2.2.1 Equipo SHIMADZU UH-FX Serie.....	28
2.2.2 Equipo National Instruments NI 9235.....	29
2.4 Descripción de los especímenes.....	30
2.4.1. Diseño del espécimen.....	30
2.4.2. Dimensión de espécimen.....	31

2.4.3.	Dimensión del viscoelástico	31
2.5	Descripción de ensayo de compresión	32
2.5.1.	Fabricación de Espécimen	32
2.5.2.	Diseño del ensayo	35
2.5.3.	Obtención de datos.....	36
2.6	Cálculos desarrollados	36
2.6.1	Fuerzas y tensiones de membranas	36
2.6.2	El esfuerzo radial	38
2.6.3	Deformación y Comportamiento Mecánico.....	38
2.6.4	Esfuerzo Circunferencial	39
2.4.3.1.	Relación deformación Superficial y deformación total	40
Capítulo 3.....		9
3	Resultados y análisis	10
3.1	Resultados de ensayo de compresión.....	10
3.2	Resultados Cualitativos de Microfibras	11
3.2.1.	Esfuerzo radial vs deformación radial	13
3.2.2.	Esfuerzo circunferencial vs deformación tangencial	15
3.2.3.	Deformación local vs tiempo	17
3.2.4.	Fuerza de membrana y Fuerza de compresión vs deformación.....	19
3.3	Análisis de resultados	20
3.3.1.	Microfracturas en Probetas	20
3.3.2.	Esfuerzo radial vs deformación radial	21
3.3.3.	Esfuerzo circunferencial vs deformación tangencial	22
3.3.4.	Deformación local vs tiempo	22
3.3.5.	Fuerza de membrana y Fuerza de compresión vs deformación.....	23
Capítulo 4.....		25
4.1	Conclusiones y recomendaciones	26
4.2	Conclusiones	27
4.3	Recomendaciones	28
Referencias.....		29
Apéndices.....		32
Sección A.	Evidencia fotográfica de Proceso de Fabricación de Probetas de Estudio	32
Sección B.	Evidencia fotográfica de probetas a someter a ensayos de Laboratorio	33

Sección C. Captura Microscópica en fibras de Probetas Previo a Ensayos.....	33
Sección D. Captura Microscópica en fibras de Probetas Posterior a Ensayos.....	36

Abreviaturas

<i>ABS</i>	American Bureau of Shipping
<i>ESPOL</i>	Escuela Superior Politécnica del Litoral
<i>FAO</i>	Food and Agriculture Organization
<i>FICT</i>	Facultad de Ingeniería en Ciencia de la Tierra
<i>FIMCM</i>	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
<i>GFRP</i>	Glass Fiber Reinforced Polymer
<i>MEKP</i>	Catalizador de Metiletilcetona
<i>NI</i>	National Instruments
<i>PMC</i>	Materiales Compuestos con matriz polimérica
<i>UE</i>	Unión Europea
<i>UN</i>	United Nations

Simbología

A	Área de contacto
cm	Centímetro
E	Módulo de elasticidad
F	Fuerza del laminado
h	Deformación vertical
máx	Máximo
min	Mínimo
mm	Milímetro
N_y	Fuerza de la membrana
P	Presión ejercida
r	Radio medio del cascarón.
s	Segundo
t	Espesor del cascarón
r_o	Radio del cascarón
ω	Desplazamiento radial
$\Delta\delta$	Deformación vertical de la máquina de ensayos.
Δh	Deformación vertical total
ε_θ	Deformación tangencial
σ	Esfuerzo
σ_θ	Esfuerzo circunferencial de la membrana
σ_r	Esfuerzo radial de la membrana
°C	Grados Celsius

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Bongos de pesca (embarcación artesanal ancestral manabita)</i>	14
Figura 2. <i>Canoa de pesca en Río los Tintos- Ecuador</i>	14
Figura 3. <i>Panga de madera</i>	15
Figura 4. <i>Lancha de pesca LO-18</i>	15
Figura 5. <i>Barco Open fuera de borda</i>	16
Figura 6. <i>Embarcación MDV-1 propuesta por FAO</i>	17
Figura 7. <i>Panga de fibra de vidrio</i>	17
Figura 8. <i>Barco palangrero de fibra de vidrio</i>	18
Figura 9. <i>Ejemplo de disposiciones de laminados compuestos</i>	19
Figura 10. <i>Curva de tensión-deformación para fibra, FRP y resina</i>	20
Figura 11. <i>Zona de equilibrio y modo de fallo de los cascarones esféricos: (a) cruce superficial curvado (AIW-1) y (b) cruce superficial recto (AIW-2)</i>	21
Figura 12. <i>Deformación progresiva de una semiesfera</i>	22
Figura 13. <i>Curvas de indentación de curvas del cascaron hemisférico aplicadas en centro $\Theta=0$</i>	22
Figura 14. <i>Comparación del cascarón con (a) bajo y (b) alto número de Föppl-von Kármán: el primero presenta una sola indentación, mientras que el segundo muestra múltiples indentaciones y arrugas</i>	23
Figura 15. <i>Las principales aplicaciones de las fibras de vidrio (incluyen los sectores de la automoción, energía alternativa, aeroespacial, transporte, construcción, deportes y otros usos diversos)</i>	24
Figura 16. <i>Flujograma que detalla metodología a realizar</i>	27
Figura 17. <i>Máquina de ensayo SHIMADZU UH-FX</i>	28
Figura 18. <i>Equipo National Instruments NI 9235</i>	29
Figura 19. <i>Dimensiones principales del cascarón esférico. a) sin modificar, b) modificado viscoelásticamente</i>	31
Figura 20. <i>Dimensión de Viscoelástico</i>	32
Figura 21. <i>Molde de madera “Mango” semiesférica</i>	33
Figura 22. <i>Cascarón semiesférico sin modificar</i>	33
Figura 23 <i>Cascarón sin modificación #2, a) previo ensayo, b) post ensayo</i>	12
Figura 24 <i>Cascarón con modificación #2, a) previo ensayo, b) post ensayo</i>	12
Figura 25. <i>Zona de falla en cascarón con modificación #2, a) antes de prueba, b) después de prueba</i>	13
Figura 26. <i>Zona de falla en cascarón con modificación #2, a) antes de prueba, b) después de prueba</i>	13
Figura 27 <i>Curva de esfuerzo radial vs deformación radial</i>	15
Figura 28. <i>Esfuerzo Circunferencial vs deformación tangencial</i>	16
Figura 29. <i>Deformación local (circunferencial) vs tiempo / strain gages</i>	18
Figura 30. <i>Fuerza de membrana y fuerza aplicada de compresión vs deformación tangencial</i>	20

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Dimensiones principales de espécimen de ensayos</i>	31
--	----

Capítulo 1

1. Introducción

Ecuador es un país marítimo, con la flota pesquera más grande del Pacífico oriental, destacándose por su potente flota atunera. Actualmente, están registradas 12790 embarcaciones artesanales y 615 industriales. (Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca., 2024). La flota pesquera artesanal, compuesta en su mayoría por buques de mediana y pequeña eslora, se construyen tradicionalmente de madera y plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP) (El Diario.Ec, 2018). Sin embargo, el diseño de estas embarcaciones sigue un enfoque empírico, basado principalmente en el uso de moldes, lo que carece de un análisis de su integridad estructural.

EL GFRP ofrece ventajas significativas en términos de reducción de peso, resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación, lo que ha impulsado su uso creciente en la industria pesquera. (Oh et al., 2022). Estos buques, si bien presentan ventajas notables, enfrentan desafíos estructurales específicos, particularmente relacionados con el comportamiento del material bajo condiciones de carga hidrodinámica y presión externa (Vliegenthart & Gompper, 2011).

A pesar de que el diseño de bulbos para buques pesqueros ha sido una técnica clave para mejorar la hidrodinámica y eficiencia en la navegación, uno de los aspectos más destacados, es el comportamiento del bulbo de GFRP (cascarones esféricos) bajo presión. Estudios realizados a cascarones esféricos, han demostrado que son susceptibles a fallas estructurales cuando se exponen a cargas de compresión o presión externa, lo que puede llevar a colapsos significativos si no se gestionan adecuadamente las tensiones (Liu et al., 2021). Además, la vida útil de estos cascarones depende de varios factores, como el diseño estructural y el tipo de carga al que están sometidos (Audoly & Hutchinson, 2020). Un aspecto clave en el diseño de cascarones esféricos de GFRP es la relación entre el espesor del cascarón y su radio, lo que determina en gran medida su resistencia al pandeo. A medida que

esta relación disminuye, la capacidad del cascarón para soportar cargas externas también disminuye, haciéndolos más susceptibles a fallas estructurales. (Wang et al., 2022).

En este contexto, la industria naval continúa avanzando, impulsada por la evolución de sus métodos constructivos y la mejora de sus herramientas tecnológicas. Una de las innovaciones clave en este proceso es la incorporación de modificaciones viscoelásticas en el interior de los paneles laminados de preimpregnado, diseñados para mejorar su eficiencia estructural al incrementar su capacidad para absorber energía y reducir las deformaciones inducidas por cargas externas, particularmente bajo presiones hidrostáticas (Townsend et al., 2018).

El diseño de la “lámina viscoelástica”, compuesta por celdas de material elastomérico encapsuladas en una matriz de plástico rígido, presenta un espesor mínimo y moldeable que se inserta dentro del laminado en las zonas críticas de impacto del casco (Townsend et al., 2018). Este material mejora la ductilidad del sistema, facilitando la disipación de energía en forma de calor y minimizando el efecto de las cargas cíclicas, lo que reduce el riesgo de pandeo y colapso. (García Quesada, 2008)

El presente trabajo, tiene por objetivo estudiar el uso de materiales viscoelásticos como una alternativa innovadora en la industria naval artesanal. Basándose en la hipótesis de que el material viscoelástico en conjunto con el cascarón esférico de GFRP reduce la deformación del material frente a presión externa.

1.1 Descripción del Problema

La flota pesquera ecuatoriana está en auge respecto a la construcción de embarcaciones de GFRP, debido a los beneficios económicos que ofrece. Sin embargo, enfrentan desafíos por el ambiente marino y el diseño empírico de muchas de estas embarcaciones (Suaréz, 2018). Ante la necesidad de mejorar las propiedades hidrodinámicas,

la incorporación de bulbos de proa en embarcaciones pesqueras sigue siendo una opción viable, causando una disminución en la resistencia al avance, lo cual generaría menor potencia requerida del motor y una reducción de gastos de combustible por faena realizada (Marín et al., 2012). Consecuentemente, la disminución de la carga operativa del motor contribuiría en una mayor vida útil del mismo y la reducción de gases contaminantes.

El desafío de este estudio reside en las afectaciones estructurales a los que están sometidos estos apéndices. Dado a que enfrentan riesgos debido a presiones externas, imperfecciones geométricas y la degradación del material bajo cargas prolongadas. Estos factores incrementan la susceptibilidad a la flexión y al colapso estructural, especialmente bajo condiciones críticas de presión o deformación (Zhu et al., 2018). No obstante, el uso de capas compuestas y técnicas de laminación avanzadas aumentan la capacidad de carga de estos cascarones, permitiendo su uso en condiciones críticas.

1.2 Justificación del Problema.

A medida que la industria pesquera busca mejorar el rendimiento de sus embarcaciones y reducir los costos operativos, la ingeniería naval avanza continuamente con la evolución de técnicas y desarrollo de materiales que mejoren la operatividad de las embarcaciones. Entre estos, el uso de materiales viscoelásticos en el GFRP se vuelve crucial, ya que estos materiales ofrecen propiedades únicas, particularmente beneficiosas en entornos marinos donde las embarcaciones están sujetas a cargas dinámicas y condiciones variables. (Li et al., 2018).

La implementación de materiales viscoelásticos en el bulbo de proa no solo mejoraría su comportamiento estructural al aumentar su resistencia, sino que generaría un mayor interés en la aplicación de los apéndices a las embarcaciones, de manera que se logre una reducción

en el consumo de combustible y en el desgaste de los motores, lo que contribuirá a la sostenibilidad de la industria pesquera.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estudiar un bulbo para buques pesqueros de GFRP con modificación viscoelástica, mediante ensayos de laboratorio para mejorar su comportamiento estructural.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Fabricar cascarones de GFRP modificados con componentes viscoelásticos y sin modificar para ensayos de laboratorio.
2. Evaluar las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los cascarones mediante ensayos mecánicos, con el fin de analizar su capacidad de reducción de la deformación.
3. Comparar los resultados entre el bulbo modificado y no modificado para establecer las ventajas del comportamiento estructural.

1.4 Marco Teórico

1.4.1. La Flota Pesquera Ecuatoriana y sus materiales de construcción

La construcción de buques pesqueros en Ecuador tiene sus orígenes en la tradición pesquera artesanal, profundamente arraigada en las comunidades costeras. Desde tiempos antiguos, se han utilizado embarcaciones rudimentarias, como balsas y bongos, fabricada a partir de troncos y árboles. Sin embargo, con el avance de la tecnología, se ha dado paso a la incorporación de materiales más modernos y eficientes, como la fibra de vidrio (GFRP) y el acero naval, lo que ha mejorado la eficiencia y capacidad de las embarcaciones. (Jara, 2006)

Materiales tradicionales usados en la construcción artesanal de embarcaciones

Madera. La madera ha sido el material tradicional por excelencia en la construcción de embarcaciones pesqueras ecuatorianas. Se utiliza principalmente en:

Bongos: Construidos a partir de troncos de árboles, carecen quillas y cuadernas, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Bongos de pesca (embarcación artesanal ancestral manabita).



Nota: Foto tomada de publicación “El bongo icono ancestral y turístico de Manabí”, por (Código de Manta, 2020)

Canoa: Mejoradas con tablas para aumentar su capacidad como se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Canoa de pesca en Río los Tintos- Ecuador



Nota: Foto tomada de diario El Universo disponible en

<https://www.eluniverso.com/noticias/2014/09/25/nota/4026331/pesca-se-resiste-desaparecer/>

Pangas y botes de madera: Estructuras más complejas que incluyen quilla y cuadernas, ofreciendo mejor desplazamiento, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Panga de madera



Nota: Foto tomada de Memoria técnica de embarcaciones pesqueras, por (Castro, 2012)

Fibra de vidrio o GFRP. Las embarcaciones de pesca de fibra de virio han ganado popularidad debido a sus ventajas en durabilidad, resistencia a la corrosión y bajo mantenimiento. A continuación, se presentan algunos tipos comunes de embarcaciones de pesca construidas con este material:

Lanchas LO-18: Ideal para pesca comercial y recreativa, ya que puede ser propulsada por motor o remos, con diseño para operar en aguas calmadas como lagunas y ríos, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.

Lancha de pesca LO-18



Nota: Foto tomada del artículo de “Botes por Eduardoño- Manda en servicio” disponible en https://www.eduardono.com/collections/botes/eslora_18

Barcos Open: Diseñados para ofrecer un espacio abierto, populares entre los pescadores deportivos, con una gran capacidad de maniobra y facilidad para pescar desde cualquier punto, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Barco Open fuera de borda



Notas: Foto tomada de Nautic Expo Connect por Qingdao Lian Ya Boat Co.,Ltd. disponible en <https://www.nauticexpo.es/prod/qingdao-lian-ya-boat-co-ltd/product-30082-369663.html>

Embarcaciones MDV-1: Modelo desarrollado por la FAO, para reemplazar a embarcaciones tradicionales de madera, adecuado para la pesca artesanal, Como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.

Embarcación MDV-1 propuesta por FAO



Nota: Foto tomada de Asociación de las Organizaciones Nacionales de empresas pesqueras de la UE por Europeche disponible en <https://europeche.chil.me/prensa>

Pangas: Embarcaciones abiertas, utilizadas comúnmente en la pesca costera. Su diseño permite acceso fácil al agua y son altamente maniobrables.(Castro, 2012), como se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Panga de fibra de vidrio



Nota: Foto tomada de Manabi Evisos por Don Toni disponible en <https://manabi.evisos.ec/vendo-bote-o-panga-de-fibra-para-la-id-143571>

Barcos Industriales: Embarcaciones más grandes utilizadas en la pesca comercial a gran escala, equipadas con tecnología avanzada para la navegación y captura, suelen tener

motores potentes y capacidad para transportar grandes volúmenes de pescado, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8.

Barco palangrero de fibra de vidrio



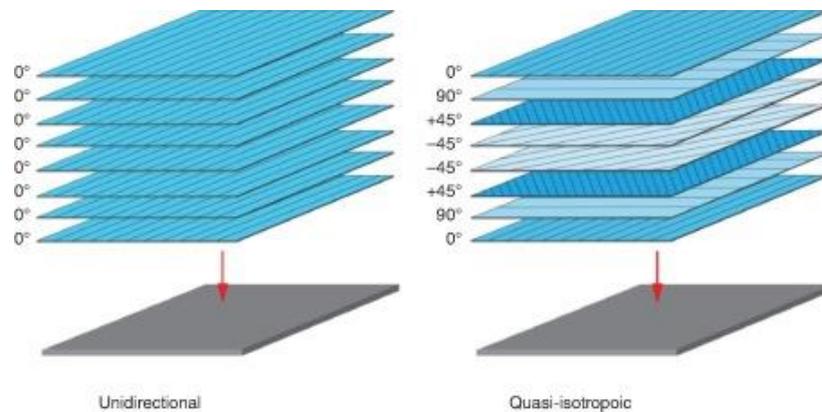
Nota: Foto tomada de Memoria técnica de embarcaciones pesqueras, por (Castro, 2012)

1.4.2. Materiales Compuestos

Un material compuesto consiste en la combinación de dos o más materiales para formar un tercer material con propiedades mejoradas. Uno de los componentes se denomina fase de refuerzo, mientras que el componente en el que se incrusta se llama matriz. El material de la fase de refuerzo puede presentarse en forma de fibras, partículas o escamas, mientras que los materiales de la fase matriz suelen ser continuos (Manohar, 2019).

Figura 9.

Ejemplo de disposiciones de laminados compuestos

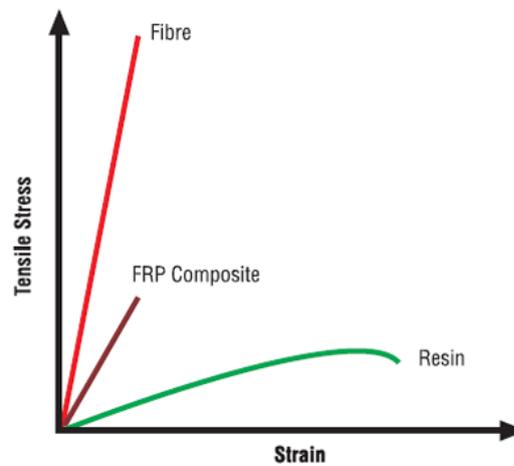


Nota: Ilustración tomada de teoría de laminación usando macromecánica por (Aboudi et al., 2021).

Los materiales compuestos con matriz polimérica (PMC) combinan un sistema de resina con fibra de refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas. Las resinas por si solas no poseen altas propiedades mecánicas altas, pero pueden moldearse en formas complejas. Mientras que las fibras como vidrio o boro, aunque tienen una alta resistencia a la tracción y compresión, en su forma solida no muestran todo su potencial debido a fallas superficiales aleatorias. Para mitigar esto, se fabrican en forma de fibras, lo que permite que dichas fallas afecten solo a algunas fibras, preservando la resistencia del conjunto. Al combinar las fibras con una matriz de resina, se distribuyen las cargas y se protegen las fibras, logrando un material compuesto de alta resistencia y bajo peso, ideal para diversas aplicaciones (Manohar, 2019). Los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) son generalmente usados en la industria de la construcción naval (Kim et al., 2014).

Figura 10.

Curva de tensión-deformación para fibra, FRP y resina.



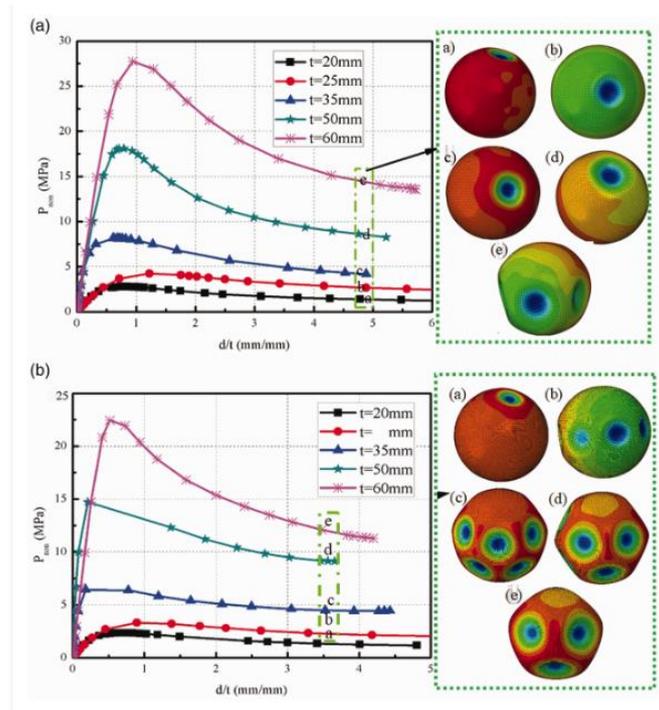
Nota: Ilustración tomada de Introducción a los materiales compuestos por (Manohar, 2019)

1.4.3. Cáscaras esféricas de GFRP

Las cáscaras esféricas de materiales compuestos tejidos en 3D se utilizan ampliamente en aplicaciones submarinas debido a su alta resistencia a la delaminación y a los daños por compresión. Estas también destacan como la relación entre el radio y el grosor, y los defectos iniciales afectan la estabilidad estructural. Con simulaciones multiescala se han validado la precisión de los modelos teóricos, destacando la importancia de los defectos iniciales en la predicción de la resistencia estructural. (Wang et al., 2022)

Figura 11.

Zona de equilibrio y modo de fallo de los cascarones esféricos

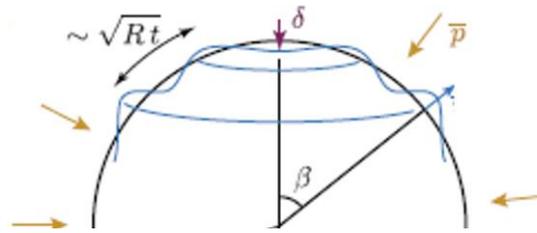


Nota: Ilustración tomada de Análisis de resistencia y pandeo a múltiples escalas de cascarones esféricos compuestos tejidos en 3D sometidos a presión hidrostática por (Wang et al., 2022), (a) cruce superficial curvado (AIW-1) y (b) cruce superficial recto (AIW-2).

Las cáscaras delgadas son estructuras altamente sensibles a imperfecciones. La presión crítica de pandeo, basada en modelos teóricos, frecuentemente sobreestima la resistencia real de la estructura. Este estudio se enfoca en cáscaras esféricas con un defecto localizado de tipo "hoyuelo" en el polo norte (Abbasi et al., 2021)

Figura 12.

Deformación progresiva de una semiesfera

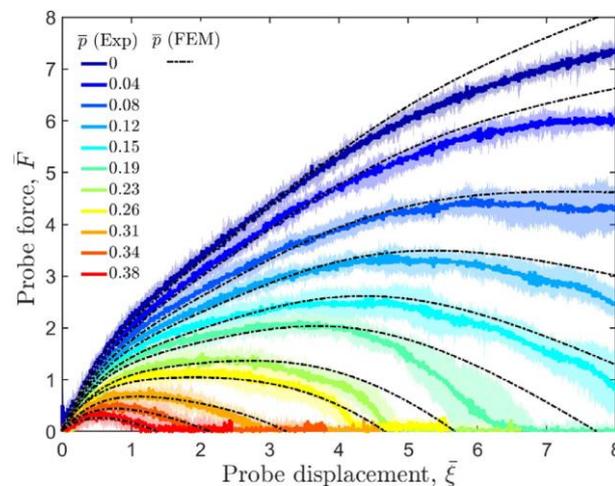


Nota: Ilustración tomada de Investigación del pandeo de cáscaras esféricas presurizadas por (Abbasi et al., 2021)

Un estudio realizado al Pandeo de cascaras esféricas introduce un modelo analítico para predecir en cascaras esferos cilíndricas compuestas tipo sándwich, sometidas a presión externa. El enfoque propuesto considera la cascara hemisférica como un soporte elástico de la sección cilíndrica. Utilizando el método de Galerkin, se derivan fórmulas para la presión crítica de pandeo, verificadas mediante simulaciones de elementos finitos. Donde se muestra que el modelo es eficaz y ofrece una herramienta rápida y fiable para el diseño de este tipo de estructuras, siendo relevante para aplicaciones en ingeniería oceánica. (Liu et al., 2021)

Figura 13.

Curvas de indentación de curvas del cascaron hemisférico aplicadas en centro $\Theta=0$

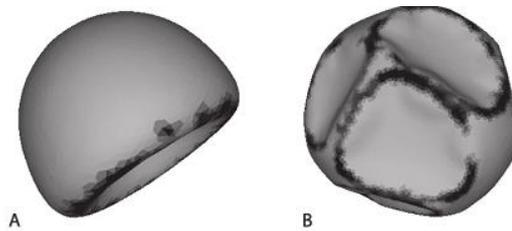


Nota: Las curvas de indentación del cascarón hemisférico muestran que, con 11 tipos de despresurización, una menor presión resulta en una menor deformación. Ilustración tomada de (Liu et al., 2021).

Por otro lado, en el estudio de compresión y colapso de cascaras esféricas, se analiza la deformación de cascaras delgadas bajo presión externa o reducción de volumen. Las simulaciones muestran como la forma de la cascara cambia dependiendo de la tasa de compresión, relevando que a deformaciones lentas las cascaras forman una única indentación, mientras que a altas tasas presentan múltiples indentaciones o arrugas. (Vliegenthart & Gompper, 2011)

Figura 14.

Comparación del cascarón con (a) bajo y (b) alto número de Föppl-von Kármán: el primero presenta una sola indentación, mientras que el segundo muestra múltiples indentaciones y arrugas.



Nota: Ilustración tomada de Compresión, deformación y colapso de carcacas y cápsulas esféricas por (Vliegenthart & Gompper, 2011)

1.4.4. Teoría de las membranas

En las cáscaras, la fuerza de membrana (N_x, N_y, N_{xy}) soporta las cargas, mientras que los momentos de flexión (M_x, M_y, M_{xy}) son insignificantes salvo en puntos de carga concentrada y alrededor de los soportes. Las tensiones de membrana en estructuras curvas permiten una distribución uniforme en todo el espesor, a diferencia de las placas planas. (Barbero, 2010)

1.4.5. Viscoelásticos

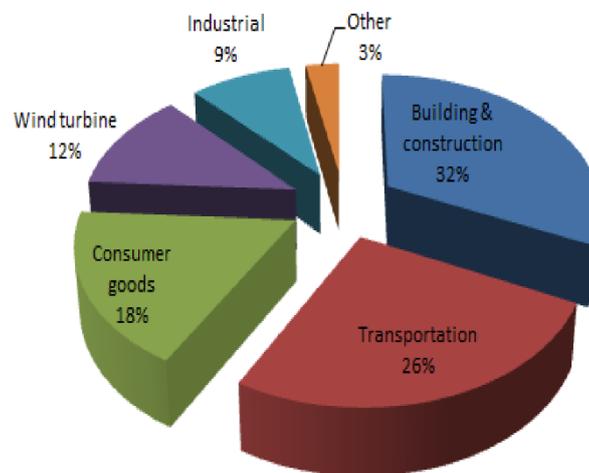
Los materiales plásticos, particularmente los termoplásticos (polímeros lineales) poseen dos tipos de propiedades, donde su comportamiento es denominado como “sólidos elásticos” con respuesta al instante que es independiente al tiempo, dependiendo solo de las propiedades del material (Balart et al., 2020).

1.4.6. Manufactura de fibras y compuestos

Actualmente, las fibras de vidrio se identifican como los materiales de fabricación más adaptables entre otros. Se fabrican fácilmente a partir de materia prima, la cual está disponible en una oferta casi infinita (Rajak et al., 2021).

Figura 15.

Las principales aplicaciones de las fibras de vidrio (incluyen los sectores de la automoción, energía alternativa, aeroespacial, transporte, construcción, deportes y otros usos diversos)



Nota: Ilustración tomada de Tecnologías de fabricación de compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono/vidrio y sus propiedades: una revisión por (Rajak et al., 2021)

Capítulo 2

2.1 Metodología

Este proyecto tuvo una metodología de investigación de tipo cuantitativa, donde se llevó a cabo el análisis sobre la influencia de la deformación en el cascaron esférico de fibra de vidrio (GFRP) con modificación viscoelásticas. Se diseñaron probetas que posteriormente fueron sometidas a ensayos de compresión, el cual fue un ensayo que permitió establecer el resistencia de un cascaron esférico sometido a fuerzas de compresión por presión externa.(Creswell, 2014). Se construyeron cuatro probetas de formas esférica con cuatro capas de laminado, de las cuales tres tenían la de fibra de vidrio con incorporación de material viscoelástico y dos sin modificación. Todas las probetas fueron diseñadas con el menor espesor comercial para evidenciar el comportamiento a escala que tendrían los cascarones al someterlos a compresión hasta llegar a la deformación del laminado y estimar la capacidad de carga de los cascarones esféricos de GFRP. Estos procedimientos se realizaron en el laboratorio de Geotecnia y Construcción en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) con la máquina de ensayo SHIMADZU UH-F500kNX en conjunto al equipo National Instruments - NI 9235 del Laboratorio SIMAR de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM).

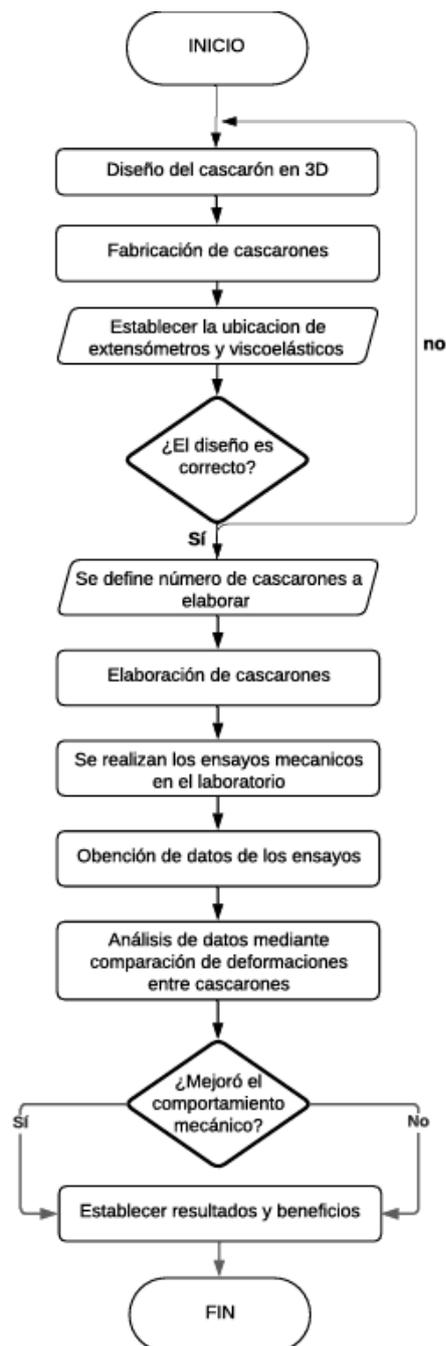
Los ensayos desarrollados permitieron estudiar la capacidad de reducción a la deformación con la incorporación del viscoelástico mediante la obtención de deformaciones y fuerzas aplicada, por lo que, con los datos recopilados se obtuvieron las gráficas de, esfuerzo radial vs deformación radial, esfuerzo circunferencial vs deformación tangencial, deformación local vs tiempo, fuerza de membrana y fuerza aplicada vs deformación global para cada cascaron esférico. La máquina SHIMADZU UH-F500kNX proporciona datos de fuerza y desplazamiento, y el equipo National Instruments - NI 9235 proporciona datos de deformación y tiempo. Una vez obtenido los datos, se procedió a interpretarlos, verificando el comportamiento de cada probeta, se calculó la deformación del cascaron esférico,

permitiendo finalmente determinar el comportamiento elástico en los cascarones esféricos analizados.

2.2 Flujograma

Figura 16.

Flujograma que detalla metodología a realizar.



2.3 Descripción de Equipos

Los ensayos de compresión de cada cascaron esférico fueron realizados con los siguientes equipos:

2.2.1 Equipo SHIMADZU UH-FX Serie

La máquina SHIMADZU UH-F500kNX es una máquina de ensayos de alta capacidad, capaz de aplicar cargas de hasta 500 kN (Temeco, 2022). Al utilizarla para ensayos de compresión en un cascaron esférico, se puede obtener información sobre la resistencia a la compresión del cascaron, incluyendo:

- Carga de compresión máxima soportada por el cascaron antes de fallar
- Deformación bajo carga, lo cual permite calcular módulos de elasticidad y otros parámetros de rigidez
- Puntos de falla estructural en el cascaron
- Curvas de esfuerzo-deformación que muestran el comportamiento mecánico del material en condiciones de compresión.

Figura 17.

Máquina de ensayo SHIMADZU UH-FX



Nota: Obtenido de catálogo de Equipos SHIMADZU DT SERIES (Temeco, 2022)

2.4 Descripción de los especímenes

2.4.1. Diseño del espécimen

Las dimensiones se definieron utilizando valores proporcionales a diseños de bulbos de fibra de vidrio en pesqueros, considerando las dimensiones que admitía la máquina de ensayo y escalando a un valor promedio.

Se elaboró el diseño preliminar de las probetas, tanto sin modificación como con modificación viscoelástica utilizando el software Rhinoceros 3D. En este programa, se modeló el cascaron esférico con la incorporación del material viscoelástico y sin el mismo.

2.4.2. Dimensión de espécimen

Figura 19.

Dimensiones principales del cascarón esférico. a) sin modificar, b) modificado viscoelásticamente.

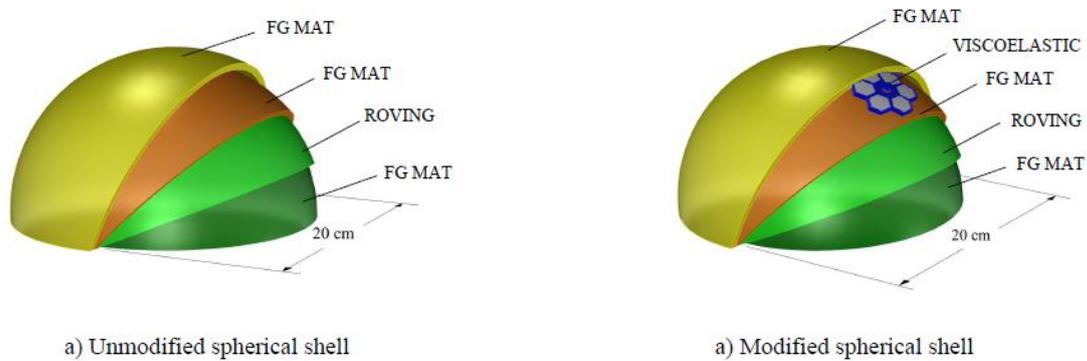


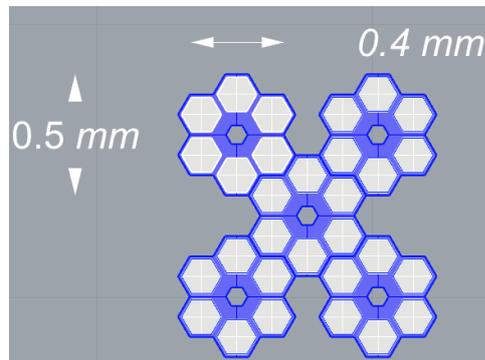
Tabla 1

Dimensiones principales de espécimen de ensayos.

Característica	Dimensión	Unidad
Díámetro total del cascaron	20	Cm
3 Fibra de vidrio Mat 450 -	0.09	Cm
1 Woven Roving 400	0.01	Cm
Resina de Poliéster no saturado	60	mL
Molde de Madera (Mango)	25	Cm

2.4.3. Dimensión del viscoelástico

El viscoelástico estudiado pertenece a la segunda generación, y está formado por celdas hexagonales interconectadas. Cada celda está compuesta por una capa acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) de 3mm de grosor, combinada con un elastómero (Townsend et al., 2018)

Figura 20.*Dimensión de Viscoelástico*

2.5 Descripción de ensayo de compresión

Las probetas se diseñan para realizar una comparación entre los modelos, estimando la fuerza que soportan a una carga distribuida que va aumentando paulatinamente, donde se utiliza un molde de madera que va sobre los cascarones de fibra, permitiendo la distribución de la fuerza ejercida por la máquina de ensayos encima del cascarón. Estos análisis experimentales mediante ensayos mecánicos proporcionan información crítica sobre el comportamiento de los materiales bajo condiciones específicas. (ASTM International, 2010)

2.5.1. Fabricación de Espécimen

Definidas las dimensiones y materiales a emplear, se procedió a la elaboración de un molde adecuado para ubicar en la máquina de ensayos y distribuir uniformemente la carga de compresión. Este molde también se utilizó para la fabricación de los cascarones esféricos.

Para la fabricación de las probetas, se empleó la técnica de laminación manual utilizando resina poliéster insaturado y fibra de vidrio mat 450 y woven roving 400. Inicialmente, se cortaron la telas de fibra en laminas para asegurar una distribución del material sobre el molde. Posteriormente, se mezcló la resina con un catalizador de metiletilcetona peróxido (MEKP) en una proporción de 1-2% con respecto al peso de la resina. La aplicación de la resina se realizó mediante una brocha, impregnando

progresivamente cada capa de fibra de vidrio y presionándola contra el molde para asegurar su completa adhesión y la eliminación de burbujas de aire, repitiendo el proceso hasta alcanzar el laminado requerido.

Tras la aplicación de la última capa, se dejó curar la resina durante una hora a temperatura ambiente (25 °C). Una vez que este se curó completamente, se retiró cuidadosamente la pieza del molde. De similar manera se repitió el proceso para el molde con modificación viscoelástica, de manera que en las últimas capas de laminado se ubicaron los laminados en el centro del cascarón con en un arreglo polar para mejorar el comportamiento estructural del cascarón.

Figura 21.

Molde de madera “Mango” semiesférico.



Figura 22.

Cascarón semiesférico sin modificar.



Figura 22.

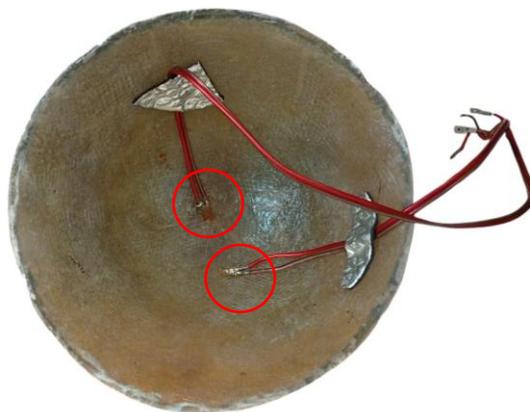
Cascarón semiesférico modificado viscoelásticamente.



Adicionalmente, se colocaron para el análisis, dos extensómetros EA-13-250BB-120 por cascarón, con dos metros de cables cada uno, medidos con la ayuda del equipo National Instruments – NI 9235, de manera que se registren las deformaciones. Para lograr esto, en cada probeta se coloca estos extensómetros en lugares específicos donde nos beneficiaría el análisis, en el centro de la semiesfera (sentido meridional), y en un costado (sentido circunferencial) donde se encuentra un viscoelástico instalado.

Figura 23.

Ubicación de extensómetros en cascarones esféricos



Finalmente, para evitar que durante el ensayo la fuerza se localice en un solo punto del cascarón y se distribuya alrededor de toda el área, se utiliza una base de madera que impide que este fenómeno ocurra.

Figura 24.

Base de madera “Amarillo” usada en el ensayo.



Previo a los ensayos de laboratorio se realizan capturas fotográficas microscópicas de los cascarones fabricados, como se muestra en la Sección C de anexos para los cascarones, logrando obtener evidencia visual de cómo se encuentra la estructura interna de los cascarones.

2.5.2. Diseño del ensayo

El ensayo comprendió una prueba de compresión a manera de simular la presión hidrostática que ejerce el mar en los bulbos cuando se encuentran sumergidos, utilizando el molde de madera simulando esta presión, aquí se procesa la curva de ensayo para el cálculo de energía elástica de acuerdo con el nivel de daño del cascarón.

Este ensayo consistió en someter los cascarones a una fuerza de compresión hasta que el material presente microrroturas; los cascarones fueron embonados en la tabla base para inmovilizarlos, el cual poseía 0.5 [cm] de holgura aproximadamente, como se muestra en la Fig. 25.

Figura 25.

Ensayo de compresión del cascarón instalado con la base y el molde.



2.5.3. Obtención de datos

Del ensayo realizado se esperan obtener datos que describen como la deformación se produce a medida que la fuerza incrementa a un tiempo determinado, de manera que se obtienen gráficos del comportamiento de los especímenes de esfuerzo, módulo de elasticidad y deformaciones en las membranas.

2.6 Cálculos desarrollados

Las fuerzas de membrana en los cascarones pueden obtener exclusivamente a partir de la geometría y las cargas aplicadas. A diferencia de las placas, los cascarones son más eficientes en soportar cargas, ya que la tensión de la membrana es uniforme en todo el espesor.

2.6.1 Fuerzas y tensiones de membranas

Para los cascarones esféricos, las ecuaciones de equilibrio se derivan considerando la suma de fuerzas verticales sobre una unidad de longitud del cascaron en el eje x como se muestra en la ecuación 1.

$$2N_y \sin\psi + 2r_o P = 0 \quad (1)$$

Siendo:

N_y : La fuerza de la membrana

r_0 : radio del cascarón

P: Presión aplicada

Donde el componente vertical de presión que actúa sobre la superficie curva tiene el mismo efecto que una presión que actúa sobre el área proyectada $2r_0$. Entonces, la fuerza circunferencial por unidad de longitud se muestra en la ecuación 2 como:

$$N_y = P \frac{r_0}{\sin\psi} = pr_0 \quad (2)$$

De este modo, la fuerza ejercida sobre el cascaron se calcula con la ecuación 3:

$$F_{pressure} = P \cdot A = P \cdot a \cdot t \quad (3)$$

La fuerza del laminado se obtiene mediante la ecuación 4:

$$F_{membrane} = \sigma_{membrane} \cdot L \cdot t \quad (4)$$

En equilibrio, las fuerzas cumplen la siguiente condición:

$$F_{pressure} = F_{membrane} \Rightarrow p \cdot a \cdot t = \sigma \cdot L \cdot t$$

Siendo el esfuerzo circunferencial de la membrana:

$$\sigma = \frac{P \cdot a}{L}$$

Además $L = 2 \cdot t$ para dos caras opuestas. Si el cascarón es esférico ($r_x = r_y = r_z = r_0$), la fuerza de membrana es uniforme, el esfuerzo circunferencial de la membra se expresa con la ecuación 5:

$$\sigma = \frac{P \cdot r_0}{2 \cdot t} \quad (5)$$

2.6.2 El esfuerzo radial

El esfuerzo normal en la dirección radial es directamente igual o proporcional a la presión aplicada, ya que actúa perpendicularmente a la superficie del cascarón

$$\sigma_{rad\ i} = \frac{F_i}{A} = P_i \quad . \quad (6)$$

Donde:

$\sigma_{rad\ i}$: Esfuerzo radial interno en el cascarón para cada carga aplicada Progresiva P_i .

F_i : Fuerza aplicada progresivamente durante el ensayo ($i = 1,2,3, \dots$)

La magnitud del esfuerzo radial en cualquier punto es directamente proporcional a la presión externa aplicada. Sin embargo suele ser menor que el esfuerzo circunferencial.

2.6.3 Deformación y Comportamiento Mecánico

La deformación en cascarones esféricos de GFRP, se analiza considerando la variación del módulo de elasticidad (E), el cual depende de la presencia de microgrietas que afectan tanto la matriz como la interfaz fibra-matriz. Según la teoría de membranas, las tensiones principales se modelan en direcciones radial y circunferencial (tangencial), asumiendo esfuerzos predominantes en la componente tangencial.

El comportamiento no lineal del GFRP implica que el módulo de Young (E) varía con la formación y propagación de microgrietas. Por ello, se comparará la variación de E en función de la deformación experimentada, relacionándola con el comportamiento estructural del cascarón.

Durante el ensayo, la máquina aplica una fuerza Progresiva (P) que induce deformaciones en el cascarón. El desplazamiento vertical, medido directamente por la

máquina, se vincula con las propiedades del material y el comportamiento mecánico de la estructura.

La ecuación 8 de desplazamiento radial (ω) se deriva del análisis de la deformación de un cascarón bajo carga, proporcionando una herramienta fundamental para correlacionar los datos experimentales con el modelo teórico.

$$\omega = \frac{PR^3}{Et} \quad [m] \quad (8)$$

ω : deformación radia (desplazamiento vertical)

P : Presión ejercida (Fuerza/ área)

E : Modulo de elasticidad

t : espesor del cascarón

La variación del módulo de Young (E) se obtiene como:

$$\omega = \frac{FR^3}{AEt} \rightarrow E_i = \frac{F_i R^3}{\omega_i A t} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (9)$$

El desplazamiento radial representa el desplazamiento hacia el interior del cascaron en la dirección perpendicular a la superficie (radial). Siendo este valor como se deforma el cascaron bajo carga.

2.6.4 Esfuerzo Circunferencial

El esfuerzo normal en la dirección tangencial o circunferencial del cascarón, es decir, paralelo a la circunferencia en el plano de la sección transversal, también llamado *stress hoop*, está asociado con la tendencia a comprimir al cascarón alrededor de su circunferencia, siendo el esfuerzo critico porque afecta a la estabilidad estructural del cascarón, especialmente cuando el espesor es pequeño en relación con su radio.

A medida que la presión externa aumenta, el cascaron puede deformarse de manera inestable, adoptando formas onduladas. Esto ocurre mucho antes de que los materiales alcancen su límite de fluencia. Además, si se presentan irregularidades (uniones o defectos geométricos), la presión externa puede concentrarse tensiones en esas áreas, aumentando el riesgo de falla localizado

La fuerza aplicada en un cascarón genera esfuerzos biaxiales: circunferenciales (σ_θ) y radiales (σ_r). Estos esfuerzos están relacionados con la deformación tangencial (ϵ_θ) y radial (ϵ_r). En particular, la fuerza axial aplicada (F) en el cascarón puede expresarse mediante el equilibrio de fuerzas como se mencionó en la ecuación 1 se relaciona con el esfuerzo circunferencial promedio con la ecuación 10

$$F = 2\pi \left(r - \frac{\Delta\delta}{2} \right) t \sigma_\theta \quad \rightarrow \quad \sigma_\theta = \frac{F}{2\pi \left(r - \frac{\Delta\delta}{2} \right) t} \quad (10)$$

Donde:

r : Radio medio del cascarón.

$\Delta\delta$: Deformación vertical de la máquina de ensayos.

t : espesor del cascaron

σ_θ : Esfuerzo circunferencial promedio

2.4.3.1. Relación deformación Superficial y deformación total

La deformación tangencial ϵ_θ en la superficie del cascarón está relacionado con la deformación vertical total Δh , mediante la geometría del cascaron como se expresa en la ecuación 11.

$$\epsilon_\theta = \frac{\Delta h}{h} \quad (11)$$

Donde h es la altura inicial del cascarón, en este caso el radio

En el rango elástico, la deformación tangencial también se relaciona con el esfuerzo circunferencial promedio mediante el módulo de elasticidad según la Ley de Hooke con la ecuación 12:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E_i} \quad o \quad \sigma_{\theta} = \varepsilon_{\theta} E_i \quad (12)$$

Por lo tanto combinando las ecuaciones 10, 11, y 12, se obtiene la Fuerza de la membrana en sentido circunferencial expresado en la ecuación 13, como el producto del área transversal de la membrana y el esfuerzo circunferencial

$$F_{membrana} = 2\pi\left(r - \frac{\Delta\delta}{2}\right)t \frac{\Delta h}{h} E_i \quad (13)$$

Esta fuerza dependió de:

$r - \frac{\Delta\delta}{2}$: Radio efectivo, que define la longitud promedio del arco en el cascarón deformado.

$\frac{\Delta h}{h}$: deformación tangencial relativa, que describe el alargamiento o acortamiento en la dirección tangencial con la ecuación 11.

E_i : Modulo de la elasticidad obtenida con la ecuación 9.

Capítulo 3

3 Resultados y análisis

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados en el laboratorio. Durante los experimentos, se registraron datos numéricos de fuerza, desplazamiento vertical y microdeformaciones locales para cada cascarón. Dado a que la geometría era esférica, su desplazamiento fue uniforme en todas las coordenadas.

Con los datos recopilados, se aplicaron las formulaciones descritas en la metodología para generar gráficos de esfuerzo tangencial vs deformación tangencial, esfuerzo radial vs deformación radial, deformación local vs tiempo, y la relación entre la fuerza de respuesta de membrana y la fuerza aplicada por la máquina de ensayo en función de las deformaciones.

Además, se calculó el módulo de Elasticidad mediante la variación del desplazamiento y de la fuerza aplicada en el cascarón, lo que permitió evaluar el comportamiento con y sin material viscoelástico. Finalmente, se estableció la relación de esfuerzos circunferenciales y radiales desarrollados en las probetas ofreciendo una visión del comportamiento mecánico bajo las condiciones de cargas aplicadas.

3.1 Resultados de ensayo de compresión

El ensayo de compresión realizado en el laboratorio tuvo como finalidad analizar el comportamiento de los cascarones de fibra de vidrio, tanto en su estado sin modificaciones como con modificaciones viscoelásticas, bajo una carga distribuida que actuaba como presión sobre toda la superficie del cascarón semiesférico. Este ensayo permitió evaluar el comportamiento de la estructura laminada y los esfuerzos biaxiales generados en las microfibras de las probetas.

Además, mediante fotografía microscópica, se documentó el estado inicial y final de las probetas después de los ensayos, evidenciando cambio en la microestructura del material.

Estas imágenes, presentadas en la sección C y D ubicada en la sección de Apéndices, facilitaron un análisis cualitativo del comportamiento estructural del material, identificando posibles modos de fallo, deformaciones, localizadas y cambios en la integridad de la estructura

3.2 Resultados Cualitativos de Microfibras

En el siguiente apartado se presentan los resultados cualitativos de las probetas con menor cantidad geométricas durante su fabricación, ya que estas permitieron obtener resultados más precisos y consistentes. Por esta razón, sus resultados fueron analizados prioritariamente.

La Fig. 23 a) ilustra los resultados de la probeta sin modificación #2 en su estado inicial, donde se evidenció a las microfibras entrelazada antes de someterse a una carga externa. En contraste, la Fig. 23 b) mostró el estado final tras la realización de la prueba de compresión hasta escuchar el sonido característico de crujido, donde se evidenciaron microfracturas entre la matriz y las fibras

De manera similar, la Fig.24 presentó los resultados de la probeta modificada #2, la Fig.24 a) se capturó la imagen en una de las zonas de localización del material viscoelástico (área circunferencial), evidenciando la composición entre las microfibras y el material viscoelástico. Por otro lado, la Fig. 24 b) mostró el estado final de la probeta tras los ensayos de compresión, donde también se identificaron microfracturas internas en su estructura.

Ambos tipos de probetas, tanto sin modificación como con material viscoelástico, presentaron microfracturas internas tras ser sometidas a las pruebas de compresión. Sin embargo, es importante destacar que en la Fig. 25 se presentó una zona específica afectada por el efecto de compresión en el cascaron. Este resultado mostro un tipo de pandeo localizado a nivel circunferencial en la base del cascarón, lo que sugiere una concentración de

esfuerzos en esa región. Mientras que la Fig. 26 mostró la presencia de microfisuras en las fibras localizadas en la zona central del cascarón, donde la fuerza aplicada por la máquina de ensayo fue ejercida perpendicularmente.

Estas observaciones cualitativas complementan los análisis cualitativos, proporcionando una visión más completa del comportamiento estructural y las posibles zonas de críticas de falla en los cascarones estudiados.

Figura 23

Cascarón sin modificación #2, a) previo ensayo, b) post ensayo

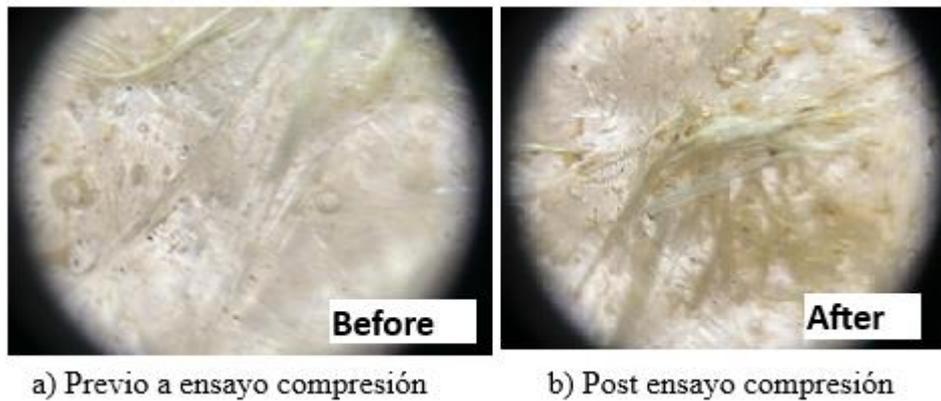


Figura 24

Cascarón con modificación #2, a) previo ensayo, b) post ensayo

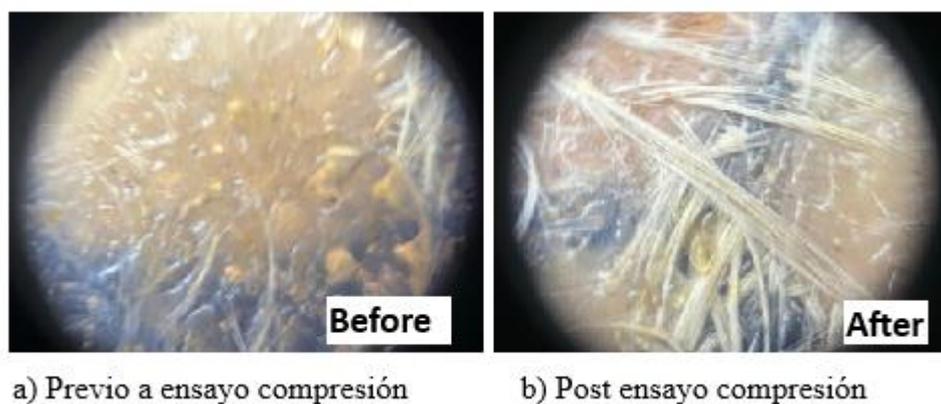
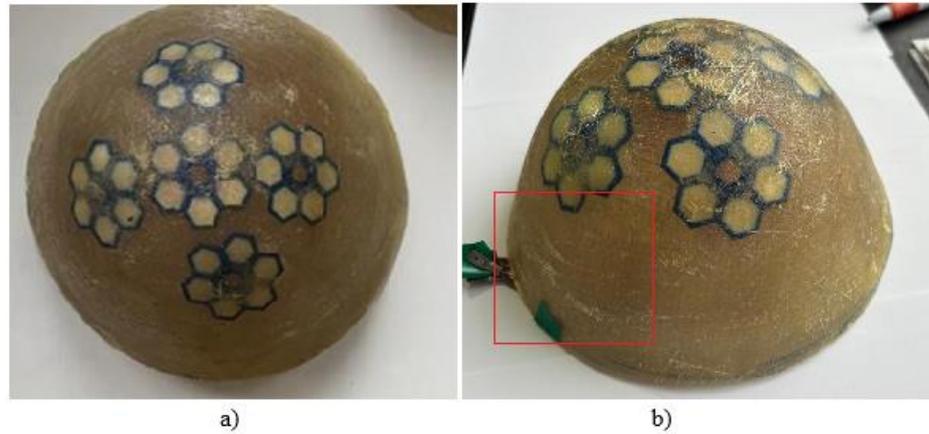
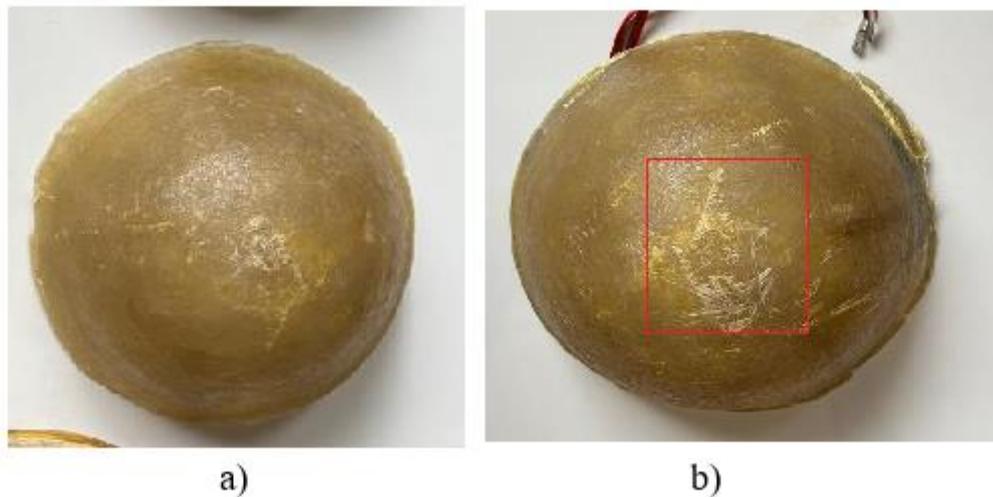


Figura 25.

Zona de falla en cascarón con modificación #2, a) antes de prueba, b) después de prueba

**Figura 26.**

Zona de falla en cascarón con modificación #2, a) antes de prueba, b) después de prueba



3.2.1. Esfuerzo radial vs deformación radial

Utilizando la máquina de compresión SHIMADZU UH-F500kNX, se llevaron a cabo las pruebas para evaluar el comportamiento de las probetas bajo una presión externa distribuida. A partir de estos ensayos, se generaron gráficos que relacionan el esfuerzo radial con la deformación radial. Mediante las formulaciones descritas previamente, el esfuerzo

radial se calculó a partir de la fuerza progresiva aplicada a las probetas. Esta fuerza se distribuyó de manera uniforme a través del espesor de los cascarones, de forma por el esfuerzo radial obtenido fue proporcional a los valores de presión aplicada.

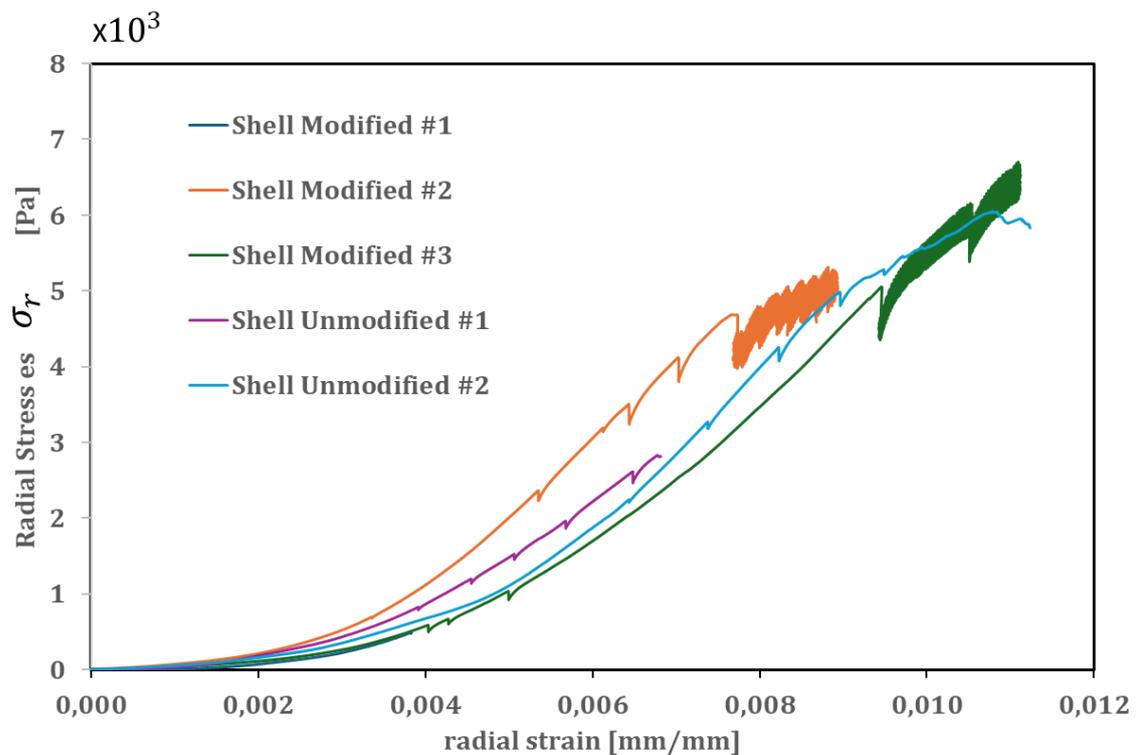
Las curvas de la Fig. 27 muestran que el esfuerzo radial aumentó proporcionalmente con la presión aplicada, alcanzando valores máximos en las probeta #2 con modificación viscoelástica. Las curva de la probeta modificada #1 y #3 presentaron una menor pendiente en proporción a la deformación, lo que se atribuye a las imperfecciones geométricas presentada en ambas, lo que resulto un menor esfuerzo en esas zonas

La curva modificada #1 no muestra un comportamiento notoriamente definido, debido a que el ensayo fue interrumpido a una menor fuerza aplicada, por la configuración de toma de datos a un mayor tiempo con respecto a su deformación. Por otro lado, la curva modificada #3 alcanzó mayores deformaciones al someterse a la misma fuerza que la probeta modificada #2, lo cual se debe a la presencia de burbujas entre las capas de laminación. Estas burbujas provocaron deformaciones inmediatas y evidentes durante la prueba.

En cuanto a las probetas no modificadas, la curva del cascaron no modificado #1 presentó un menor esfuerzo radial a medida que aumentaba la deformación. Sin embargo, no se alcanzó una mayor toma de datos debido a que la probeta sufrió microfracturas antes de alcanzar una deformación significativa. En contraste, la probeta no modificada #2 presentó mayor deformación ante el mismo valor de esfuerzo radial. Aunque las fracturas se produjeron a una mayor deformación, se destaca que el esfuerzo producido fue menor que el cascarón con modificación #2.

Figura 27

Curva de esfuerzo radial vs deformación radial



Nota: Las curvas muestran los esfuerzos radiales generados hasta la formación de microgrietas para las probeta con y sin modificación viscoelástica durante los ensayos.

Aunque el esfuerzo circunferencial es más significativo en cascarones esféricos debido a la teoría de las membranas, las gráficas de esfuerzo radial respecto a la deformación radial son fundamentales para comprender el comportamiento global del cascaron bajo carga.

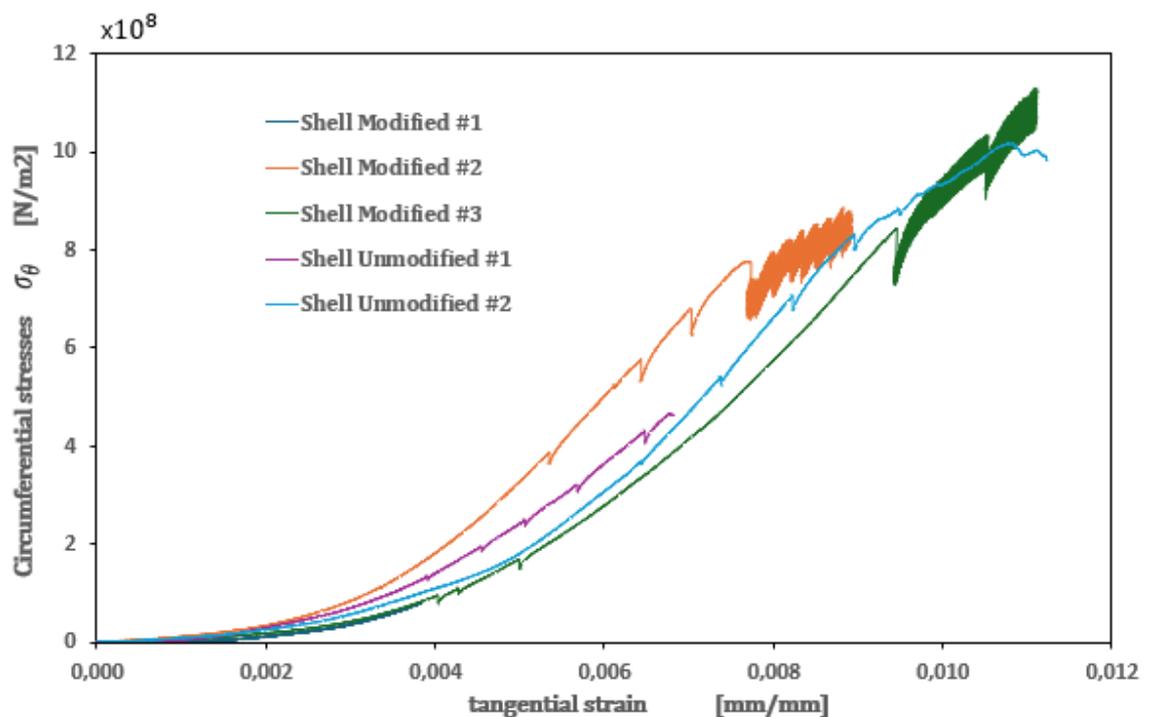
3.2.2. *Esfuerzo circunferencial vs deformación tangencial*

Mediante las formulaciones descritas se obtuvieron los valores de módulo de elasticidad y deformación tangencial para cada fuerza aplicada por lo que se obtuvieron los valores de esfuerzo circunferencial para cada probeta de ensayo. Las curvas de la Fig. 28, muestran la misma tendencia que el esfuerzo radial en cada probeta, aunque en esta alcanzan mayores valores, como se había mencionado anteriormente en cascarones esféricos, el esfuerzo circunferencial tiende a ser mayor debido a la distribución de las cargas y la

geometría de la estructura. Esto demuestra que la estructura está respondiendo principalmente a las tensiones circunferenciales, que son las dominantes bajo condiciones de carga. A medida que la carga aumentaba, tanto el esfuerzo radial como circunferencial aumentaban proporcionalmente. Sin embargo, la mayor diferencia se observó en las probeta modificada #2 de igual manera que la del esfuerzo radial, donde el esfuerzo circunferencial fue significativamente mayor, lo que refuerza la idea de que la modificación viscoelástica mejora la resistencia en la dirección circunferencial.

Figura 28.

Esfuerzo Circunferencial vs deformación tangencial



Nota: Las curvas muestran el esfuerzo circunferencial desarrollado en función de fuerza para probetas con y sin modificación durante los ensayos.

Estos valores de esfuerzo circunferencial obtenidos mostraron como los cascarones esféricos están reforzados en la dirección circunferencial dado a su geometría. La estructura

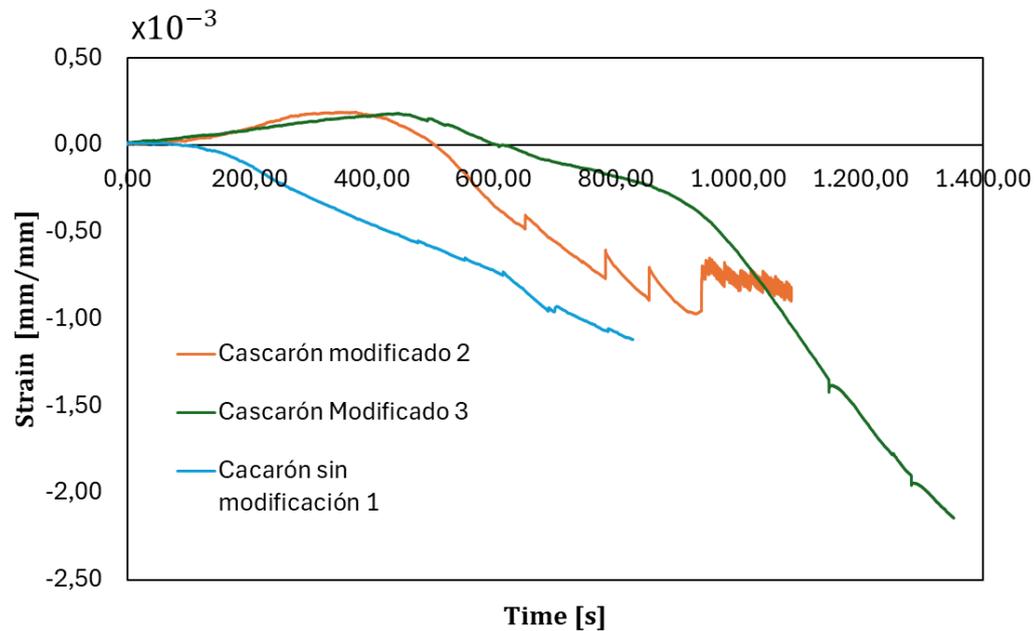
curvada hace que cualquier carga aplicada en la superficie genere un momento flecto que tiene mayor impacto en la dirección tangencial, creando un esfuerzo circunferencial más grande.

3.2.3. *Deformación local vs tiempo*

Los gráficos presentados, muestran la evolución de las deformaciones en las probetas sometidas a cargas controladas durante los ensayos. Estos resultados se obtuvieron mediante el uso de galgas extensiométricas, que capturaron las deformaciones en dos direcciones principales del cascaron: meridional y circunferencial. Esto permite analizar la respuesta estructural en términos de distribución y acumulación de deformaciones, proporcionando información crítica sobre el desempeño del material. En la Fig. 29 serán consideradas los datos recopilados a nivel circunferencial del cascaron modificado #2 y #3 y sin modificación #1 registrados con las galgas extensiométricas, dado a que estos no fallaron durante sus pruebas, los otros implementados se rompieron durante la acción de la presión ejercida por el molde.

Figura 29.

Deformación local (circunferencial) vs tiempo / strain gages



El cascarón modificado #2 (línea naranja) y el modificado #3 (línea verde) muestran un comportamiento de deformación más uniforme inicialmente, seguido por una disminución lenta en comparación con el cascarón no modificado #1 (línea azul). Este comportamiento gradual de los modificados muestra como las modificaciones viscoelásticas puede estar amortiguando la respuesta del material frente a los esfuerzos distribuyendo mejor la carga.

El cascarón no modificado #1 presenta un descenso más abrupto en la curva de deformación, lo que indica una menor capacidad de absorber esfuerzos antes de presentar fallos estructurales o microfracturas. El cascarón modificado #3 alcanza mayores valores de deformaciones en comparación con los otros, esto puede relacionarse con imperfecciones geométricas o fallos internos (burbujas de aire entre laminado) que reducen su capacidad de resistencia estructural bajo carga.

3.2.4. *Fuerza de membrana y Fuerza de compresión vs deformación*

Luego de haber obtenido los esfuerzos biaxiales desarrollados en las probetas, se utilizaron las formulaciones para el cálculo de la fuerza de membrana desarrollada en cada cascaron de estudio para comparar con la fuerza aplicada por la máquina de ensayo.

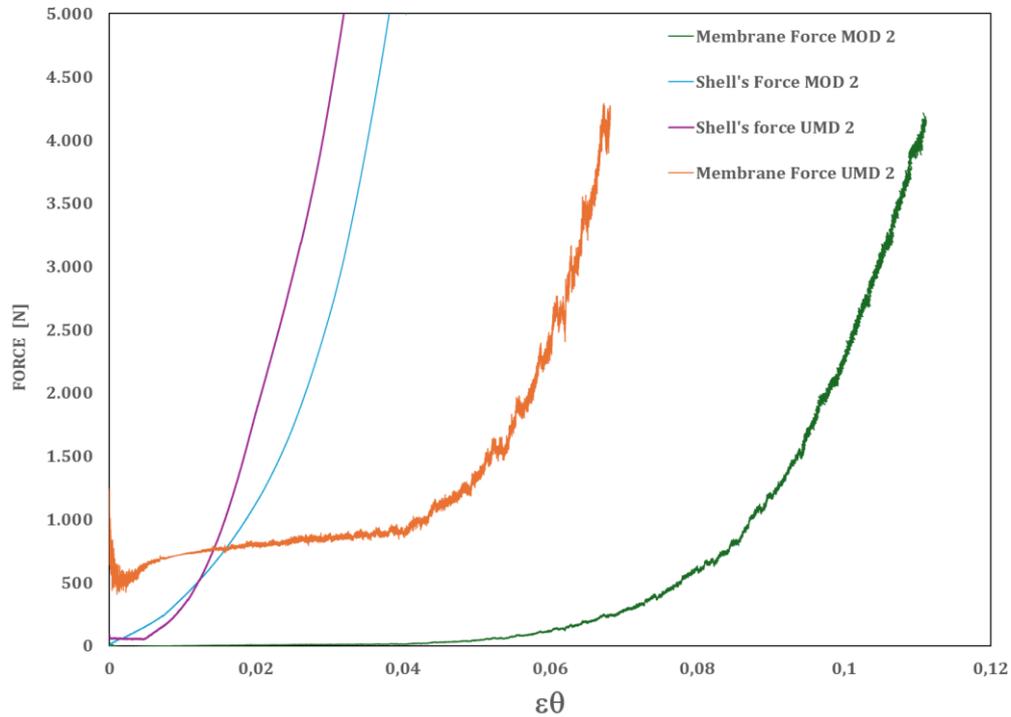
En la Fig. 30 las fuerzas de membrana teóricas muestran un comportamiento creciente y sostenido en ambos casos. Para el cascaron. modificado #2 (curva verde) la fuerza teórica sigue un aumento gradual hasta alcanzar mayores niveles de deformación. En el caso del cascaron no modificado #2 (curva naranja), la fuerza teórica presenta un incremento más abrupto, aunque alcanza un límite inferior de deformación antes de estabilizarse.

Por otra parte, la curva experimental de fuerza para el cascaron modificado #2 (curva azul) muestra un comportamiento más estable y alcanza mayores niveles de deformación antes del fallo.

En el caso del cascaron no modificado #2 (curva magenta), la fuerza aplicada crece de manera más rápida, pero el material falla a menores niveles de deformación. Mostrando de esta manera que, las curvas experimentales siguen inicialmente la tendencia de la fuerza teórica de la membrana, pero divergen a medida que aumentan las deformaciones.

Figura 30.

Fuerza de membrana y fuerza aplicada de compresión vs deformación tangencial



3.3 Análisis de resultados

3.3.1. Microfracturas en Probetas

Se priorizó el análisis de las probetas con menor cantidad de imperfecciones geométricas, dado a que estas proporcionaron resultados más consistentes y precisos. Este enfoque permitió reducir la variabilidad en los datos obtenidos mejorando la confiabilidad de las conclusiones.

Las microfracturas en las probetas sin modificación reflejan la fragilidad estructural de este tipo de cascarones, especialmente bajo cargas externas concentradas. Mientras que en la probeta modificada, se evidenció la interacción entre el material viscoelástico y las microfibras, observándose una composición más homogénea a nivel circunferencial. Aunque se identificaron microfracturas internas, estas fallas no fueron

inmediatas, identificando una mejor capacidad de absorción de energía y distribución de esfuerzos. Estas observaciones cualitativas revelaron zonas críticas de falla en los cascarones, en la Fig. 25 presentó una concentración de esfuerzos a nivel circunferencial, probablemente debido a la geometría y las condiciones de carga. Por otra parte, la Fig. 26 evidenció la formación de microfracturas en la región central del cascaron, donde la fuerza aplicada por la maquina intensifico esfuerzos locales.

3.3.2. *Esfuerzo radial vs deformación radial*

De los gráficos obtenidos mediante los resultados de esfuerzo y deformación radiales en la Fig. 27, se obtuvo que la probeta modificada #2 alcanzó los valores máximos de esfuerzo radial evidenciando una distribución uniforme de la presión aplicada y una respuesta estructural superior. Por otra parte, las probetas modificadas #1 y #3 presentaron pendientes menores, atribuibles a imperfecciones geométricas (probetas deformadas y burbujas en la laminación), lo que ocasiono una reducción en el esfuerzo máximo registrado. La curva del cascaron modificado #1 mostro un comportamiento menos definido debido a la interrupción del ensayo en una etapa temprana, mientras que el cascaron modificado #3 alcanzó mayores deformaciones dado a la presencia de defectos internos que propiciaron deformaciones inmediatas.

De los resultados de las probetas no modificadas, el cascaron #1 presentó esfuerzos radiales inferiores, acompañado de microfracturas prematuras que limitaron su capacidad para soportar mayores deformaciones. Mientras que, la curva del cascaron no modificado #2 mostró una mayor deformación antes de fracturarse, aunque con valores de esfuerzo radial inferiores a los modificados.

Estos resultados obtenidos reflejan el comportamiento estructural de los cascarones esféricos de GFRP, analizados mediante la teoría de membranas y ensayos experimentales.

Según esta teoría, los cascarones sometidos a presión externa, el esfuerzo circunferencial es dominante debido a la geometría, mientras que el esfuerzo radial, aunque menor, es crítico para reflejar la transmisión de cargas hacia el interior del material

3.3.3. *Esfuerzo circunferencial vs deformación tangencial*

En base a la Fig.28, los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo circunferencial presenta el mismo comportamiento para cada curva del esfuerzo radial, pero alcanzando valores significativamente mayores, lo cual es consistente con la teoría de membranas aplicadas a cascarones esféricos.

Los cascarones modificados con material viscoelástico, particularmente el cascaron #2, evidenciaron un comportamiento superior, con mayores valores de esfuerzo circunferencial comparados con las probetas no modificadas. Esto indica el efecto del material viscoelástico para mejorar la capacidad del cascaron para reducir tensiones tangenciales, reforzando la estructura en la dirección circunferencial y distribuyendo mejor las cargas. Por el contrario, los cascarones no modificados, presentó una menor capacidad de soportar esfuerzos circunferenciales y una mayor susceptibilidad a fallos por deformación o microfracturas.

Este análisis reafirma que los cascarones esféricos de GFRP presentan un comportamiento estructural dominado por esfuerzos circunferenciales, generados por la interacción de la curvatura y las cargas aplicadas. La geometría favorece la acumulación de momentos flectores en dirección tangencial, haciendo que el esfuerzo circunferencial sea crítico para el diseño y desempeño estructural.

3.3.4. *Deformación local vs tiempo*

Los resultados obtenidos en la Fig. 29 mediante el uso de galgas extensiométricas revelan diferencias significativas en el comportamiento de deformación entre los cascarones

modificados y no modificados, permitiendo evaluar su desempeño estructural en términos de distribución de esfuerzos

En los cascarones modificados #2 y #3, se observó un comportamiento más uniforme en las deformaciones durante las etapas iniciales de carga, seguido de una disminución progresiva. Este comportamiento sugiere que la modificación viscoelástica contribuye a una mejor distribución de los esfuerzos, amortiguando su impacto y retrasando la aparición de fallos estructurales. En partículas, el cascaron modificado #2 mostró un desempeño superior en términos de uniformidad y resistencia frente a cargas aplicadas, consolidando la efectividad de la modificación viscoelástica.

Por otro lado, el cascaron no modificado #1 presentó un descenso abrupto en su curva de deformación, lo que indica una menor capacidad para absorber esfuerzos antes de fallar. Este resultado evidencia que la ausencia de material viscoelástico limita la resistencia estructural del cascaron, haciéndolo más susceptible a microfracturas y fallos prematuros bajo carga.

Finalmente, aunque el cascaron modificado #3 alcanzó mayores valores de deformación, eso podría atribuirse a imperfecciones internas, que comprometieron su capacidad estructural. Este hallazgo destaca la importancia de un control de calidad riguroso en la fabricación para garantizar la eficacia de las modificaciones y la uniformidad en el desempeño estructural.

3.3.5. *Fuerza de membrana y Fuerza de compresión vs deformación*

La Fig. 30 muestra que los resultados obtenidos en la comparación entre la fuerza de membrana teórica y la fuerza experimental evidencian comportamientos distintos entre los cascarones modificados y no modificados, reflejando la influencia de las modificaciones viscoelásticas y la geometría del desempeño estructural.

En el caso del cascaron modificado #2, la fuerza de membrana teórica muestra un aumento gradual y sostenido, consistente con la capacidad del material modificado para distribuir las cargas y retrasar el fallo estructural. Este comportamiento también es evidente en la curva experimental, que presenta mayor estabilidad y alcanza niveles superiores de deformación antes de la falla. La relación inicial entre las curvas teóricas y experimentales refuerza la idea de que la modificación viscoelástica mejora la resistencia y la capacidad del cascaron para absorber esfuerzos.

Por otro lado, en el cascaron no modificado #2, la fuerza teórica exhibe un aumento más abrupto, alcanzando un límite inferior de deformación antes de estabilizarse. La curva experimental correspondiente sigue una tendencia similar al inicio, pero diverge rápidamente a medida que aumentan las deformaciones, lo que refleja una menor capacidad del material no modificado para soportar cargas progresivas. Este comportamiento también se relaciona con una menor absorción de esfuerzos y una mayor susceptibilidad a microfracturas y fallos prematuros.

Desde el enfoque teórico, el comportamiento observado concuerda con los principios de la teoría de membranas en cascarones esféricos, donde las fuerzas de membrana se distribuyen uniformemente a través de la superficie bajo carga.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

A través de los años, el uso de la fibra de vidrio en la industria marina ha sido un motor de innovación para lograr un mejor rendimiento de las embarcaciones, mejorando tanto su operatividad como los costos para los propietarios. Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrece el GFRP, este material es susceptible a fallas estructurales bajo condiciones extremas, como la presión externa y las cargas dinámicas, lo que requiere nuevas estrategias de diseño para mejorar su rendimiento.

Este trabajo de investigación y experimentación se centra en el análisis y mejora del diseño de bulbos para buques pesqueros de GFRP mediante la incorporación de materiales viscoelásticos, buscando mejorar su comportamiento frente a cargas de compresión y mejorar su resistencia estructural en condiciones operativas críticas.

Los ensayos realizados en los cascarones de GFRP, tanto modificados como no modificados, permiten evaluar la influencia del material viscoelástico sobre el comportamiento estructural. Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de este material viscoelástico mejora significativamente la capacidad del cascaron para soportar cargas externas, reduciendo la deformación y aumentando la integridad estructural. Esta modificación no solo contribuye a la resistencia al colapso estructural, sino que también disminuye las tensiones internas que se generan durante la operación del buque.

A pesar de que el estudio se basa en un enfoque experimental, los resultados obtenidos presentan variaciones que podrían estar influenciadas por factores como el proceso de fabricación, las condiciones ambientales y las especificaciones de las muestras. A pesar estas incertidumbres, los datos proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento del material viscoelástico y su interacción con el GFRP bajo condiciones de presión. Esta investigación abre la puerta a futuras pruebas más avanzadas que podrían permitir una mayor

precisión en los resultados y una mejor comprensión del comportamiento a largo plazo del GFRP modificado.

La innovación en el diseño de bulbos de GFRP representa una solución viable para mitigar los desafíos estructurales que enfrentan las embarcaciones pesqueras ecuatorianas. Además, no solo mejora la eficiencia operativa de las embarcaciones al reducir el consumo de combustible y los costos de mantenimiento, si no que contribuye a la sostenibilidad de la industria pesquera al alargar la vida útil de los motores y disminuir las emisiones contaminantes

4.2 Conclusiones

- En cascarones semiesféricos bajo presión externa, el comportamiento estructural está dominado por los esfuerzos de compresión radial y circunferencial, siendo este último el más crítico. El riesgo principal en estas estructuras es el pandeo, lo que requiere un diseño que no solo considere la resistencia del material, sino también su estabilidad frente a posibles deformaciones inestables. La modificación viscoelástica muestra ser efectiva al mejorar la resistencia y la capacidad de deformación, lo que contribuye a mitigar los efectos adversos de presión externa, alargando la vida útil de las embarcaciones.
- Los resultados experimentales muestran que los cascarones modificados con materiales viscoelásticos presentan un rendimiento superior en comparación con los no modificados. Estos cascarones no solo soportan deformaciones mayores antes de fallar, sino que también mantienen una correlación más fuerte entre la fuerza aplicada y la teoría de membranas. Las modificaciones viscoelásticas contribuyen a una mayor ductilidad, lo que retrasa los fallos estructurales.

- Las imperfecciones geométricas y los defectos internos, como burbujas de aire entre el laminado, afectan negativamente el comportamiento de los cascarones. Estos defectos fueron más pronunciados en los cascaron sin modificación, lo que resalta la importancia de controlar las condiciones de fabricación. Las modificaciones viscoelásticas no solo aumentan los esfuerzos máximos soportados por los cascarones, sino que también mitigan las fallas prematuras, haciendo que los cascarones modificados sean más adecuados para soportar cargas progresivas.

4.3 Recomendaciones

- Establecer rigurosos controles de calidad a lo largo del proceso de fabricación de los cascarones de GFRP, con el fin de minimizar las imperfecciones geométricas y defectos internos. La implementación protocolos de inspección, como la verificación continua de las capas de laminado y el uso de tecnologías avanzadas para el curado.
- Realizar simulaciones computacionales de la compresión de los cascarones, lo que permitirá predecir el comportamiento y realizar una comparación analítica en modelos reales y computacionales.
- Para optimizar aún más el rendimiento de los cascarones de GFRP en entornos marinos, se sugiere realizar estudios adicionales que evalúen el comportamiento estos materiales bajo cargas dinámicas, como las provocadas por el slamming y las vibraciones. Estas investigaciones proporcionarán información crucial sobre la respuesta estructural a cargas fluctuantes.

Referencias

- Abbasi, A., Yan, D., & Reis, P. M. (2021). Probing the buckling of pressurized spherical shells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 155, 104545.
<https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2021.104545>
- Aboudi, J., Arnold, S., & Bednarczyk, B. (2021). Lamination theory using macromechanics. *Practical Micromechanics of Composite Materials*, 21–75.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820637-9.00001-5>
- Askeland, D., Pradeep, P., & Wendelin, J. (2006). *Ciencia e ingeniería de materiales*.
- ASTM International. (2010). *Standard Test Methods for Compressive Properties of Rigid Plastics*.
- Audoly, B., & Hutchinson, J. W. (2020). Localization in spherical shell buckling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 136, 103720.
<https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2019.103720>
- Balart, G., Antonio, R., Jesús, L., Aimacaña, L., Lema, R., & Martínez, I. (2020). *Viscoelasticidad. Comportamiento mecánico de materiales plásticos a largo plazo*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/135054/Balart?sequence=1>
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to composite materials design*. CRC Press. .
- Castro, R. (2012). *DESCRIPCIONES DE LAS EMBARCACIONES PESQUERAS DE LA COSTA ECUATORIANA*.
- Código de Manta. (2020, October 18). *El bongo ícono ancestral y turístico de Manabí*.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. .
- El Diario.Ec. (2018, October 7). *En el bajo La Palma 'nacen' las fibras | El Diario Ecuador*. <https://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/484677-en-el-bajo-la-palma-nacen-las-fibras/>
- García Quesada, J. C. (2008). *Viscoelásticos*. Universidad Alicante.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>
- Goto, M. (2009). Chemical recycling of plastics using sub- and supercritical fluids. *Journal of Supercritical Fluids*, 47(3), 500–507.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.011>
- Jara, W. (2006). *Apuntes de Materiales en Medios Marinos*. ESPOL.

- Kim, S. Y., Shim, C. S., Sturtevant, C., Kim, D. D. W., & Song, H. C. (2014). Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 723–736. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0208>
- Li, K., Yu, Y., Wang, Y., & Hu, Z. (2018). Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm. *Advances in Engineering Software*, 121, 250–261. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2018.03.011>
- Liu, J., Yu, B., Zhou, Y., Zhang, Y., & Duan, M. (2021). The buckling of spherical-cylindrical composite shells by external pressure. *Composite Structures*, 265, 113773. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113773>
- Manohar, M. D. (2019). *Introduction to composites*. <https://crescent.education/wp-content/uploads/2019/02/Module1-Introductiontocomposites.pdf>
- Marín, J., Gómez, J., & Hidalgo, G. (2012). *Determinacion experimental de la influencia del bulbo de Proa en una Embarcación Sardinera Ecuatoriana*.
- Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca. (2024). *Registro Nacional de Embarcaciones Artesanales*. Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca.
- National Instruments. (2023). *NI 9235: Módulo para Medición de Deformación*. National Instruments.
- Ngo, T.-D. (2020). Introduction to Composite Materials. *Composite and Nanocomposite Materials*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.91285>
- Oh, D., Jang, J., Jee, J. hoon, Kwon, Y., Im, S., & Han, Z. (2022). Effects of fabric combinations on the quality of glass fiber reinforced polymer hull structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2022.100462>
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3721, 13(21)*, 3721. <https://doi.org/10.3390/POLYM13213721>
- Suaréz, J. (2018). *ESTUDIO TÉCNICO PARA INDUSTRIALIZAR LANCHAS DE FIBRA DE VIDRIO EN EL TALLER “ZAMBRANO OCÉANO FIBRA, UBICADO EN LA PARROQUIA ANCONCITO, PROVINCIA DE SANTA ELENA*. UEPS.
- Temeco. (2022). *Static testing machines*. <https://temeco.ch/en/static-testing-machines/>
- Townsend, P., Suárez-Bermejo, J. C., Sanz-Horcajo, E., & Pinilla-Cea, P. (2018). Reduction of slamming damage in the hull of high-speed crafts manufactured from

- composite materials using viscoelastic layers. *Ocean Engineering*, 159, 253–267. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2018.04.029>
- Vliegenthart, G. A., & Gompper, G. (2011). Compression, crumpling and collapse of spherical shells and capsules. *New Journal of Physics*, 13. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/4/045020>
- Wang, X., Li, H., Yang, T., Zhang, Z., Zheng, C., Wang, W., Zhang, D., & Qian, K. (2022). Multi-scale strength and buckling analysis of 3D woven composite spherical shells subjected to hydrostatic pressure. *Journal of Industrial Textiles*, 51(4), 6236S-6257S. https://doi.org/10.1177/1528083720981999/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1528083720981999-FIG9.JPEG
- Zhu, Y., Dai, Y., Ma, Q., & Tang, W. (2018). Buckling of externally pressurized cylindrical shell: A comparison of theoretical and experimental data. *Thin-Walled Structures*, 129, 309–316. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2018.04.016>

Apéndices

Sección A. Evidencia fotográfica de Proceso de Fabricación de Probetas de Estudio

Figura 33.

Proceso de fabricación de los cascarones sin modificar.



Figura 34.

Proceso de fabricación de los cascarones modificados.



Sección B. Evidencia fotográfica de probetas a someter a ensayos de Laboratorio

Figura 35.

Vista de los cascarones previo a ensayos en laboratorio.



Sección C. Captura Microscópica en fibras de Probetas Previo a Ensayos

Figura 36.

Captura microscópica previo a ensayos de cascarón #1 sin modificar con un aumento de x150.



Figura 37.

Captura microscópica previo a ensayos de cascarón #2 sin modificar con un aumento de x150.

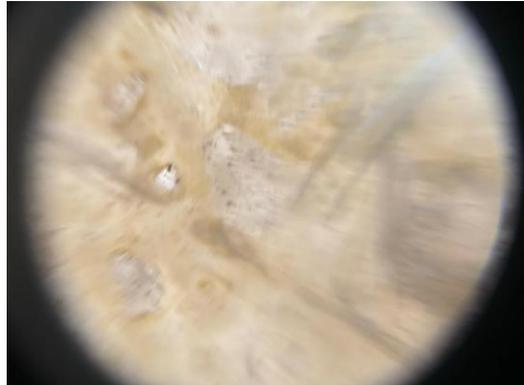


Figura 38.

Captura microscópica previo a ensayos de cascarón #1 modificado con un aumento de x150.



Figura 39.

Captura microscópica previo a ensayos de cascarón #2 modificado con un aumento de x150.



Figura 40.

Captura microscópica previo a ensayos de cascarón #3 modificado con un aumento de x150.



Sección D. Captura Microscópica en fibras de Probetas Posterior a Ensayos**Figura 41.**

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #1 sin modificar con un aumento de x150.

**Figura 42.**

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #1 sin modificar con un aumento de x150.



Figura 43.

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #2 sin modificar con un aumento de x150.



Figura 44.

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #1 modificado con un aumento de x150.

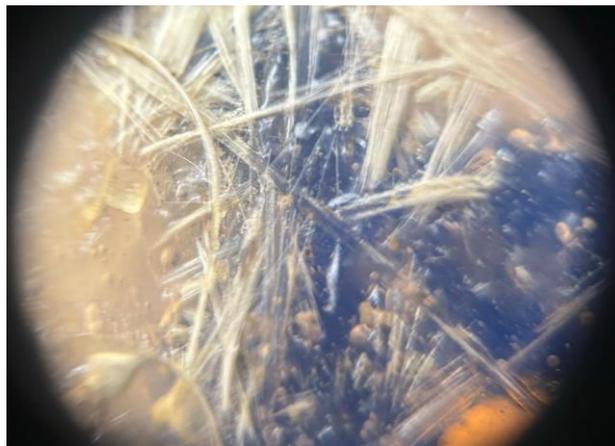


Figura 45.

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #2 modificado con un aumento de x150.



Figura 46.

Captura microscópica posterior a ensayos de cascarón #3 modificado con un aumento de x150.

